



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“IMPACTO DEL DISEÑO DE BOTADERO EN EL ALMACENAMIENTO DE MATERIAL DE BAJA LEY EN UNA MINA A TAJO ABIERTO, CAJAMARCA 2019”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Lenin Alexander Sánchez Rodrigo
Carlos Roberto Ulloque Caicedo

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

A nuestros padres quienes nos apoyaron todo el tiempo.

A nuestros hijos que nos alentaron para continuar, cuando parecía
que nos íbamos iba a rendir.

A nuestros maestros quienes siempre han tratado de transmitirnos
sus conocimientos adquiridos.

Lenin Sánchez y Carlos Ulloque

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios, por permitirme desarrollar una carrera profesional. A nuestra universidad quien nos brindó los mejores maestros quienes a su vez compartieron con nosotros sus conocimientos.

A nuestros padres por inculcarnos valores para lograr nuestra superación tanto personal como profesional.

Lenin Sánchez y Carlos Ulloque

Tabla de contenidos

	Pág.
DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Realidad problemática.....	8
1.2. Formulación del problema	11
1.3. Objetivos	11
1.4. Hipótesis.....	11
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	12
2.1. Tipo de investigación	12
2.2. Diseño de investigación.....	12
2.3. Población y muestra.....	12
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	12
CAPÍTULO III. RESULTADOS	14
3.1. Aspectos generales	14
3.2. Estabilización de botaderos.....	16
3.3. Propiedades fisicoquímicas del relave minero para la construcción de relaveras....	26
3.4. Concentración de metales en el relave minero para evitar la abrasión	34
3.5. Criterios de diseño minero para la construcción de las pozas de sedimentación....	41
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	57
ANEXOS.....	61
Anexo n°1. Plano topográfico	61
Anexo n°2. Plano hidrogeológico.....	62
Anexo n°3. Diseño de presa de relaves	63
Anexo n°4. Vista en planta de la presa de relaves.....	64
Anexo n°5. Perfil longitudinal de la presa de relaves	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Tipos de Especies para Revegetación.....	25
Tabla 2	Características Geoquímicas de los Relaves.....	28
Tabla 3	Calidad de Agua de los Relaves a Corto Plazo basados en los Resultados del SPLP.	33
Tabla 4	Calidad de Agua de los Relaves a Largo Plazo basados en los Resultados del Ensayo de Celda.	36
Tabla 5	Resumen de la Composición Pronosticada de la Calidad de Agua de la Poza de recuperación	38
Tabla 6	Resumen de las predicciones de Calidad de agua de la Poza de Recuperación – Post Cierre.	39
Tabla 7	Taludes Finales de Corte y Relleno para el Diseño Geométrico de un Canal.	45
Tabla 8	Resumen de los Criterios de Diseño del TSF.	46
Tabla 9	Resumen de las Aceleraciones Máximas de Suelo (PGA).	46
Tabla 10	Propiedades del Basamento Rocoso, Área TSF.	50
Tabla 11	Propiedades del Material para el Relleno de la Presa y los Relaves.....	50
Tabla 12	Resultados de los Análisis de Estabilidad - Talud Aguas Arriba, Reservorio vacío.	52
Tabla 13	Resultados de los Análisis de Estabilidad, Talud Aguas Arriba, Condición Sísmica.....	52
Tabla 14	Análisis de Deformación, Presa Principal de Relaves.....	53
Tabla 15	Criterios de diseño de los botaderos de relaves.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Detalle de la Cobertura y Revegetación del Depósito de Relaves.	19
Figura 2. Coberturas para Reducir la infiltración de Aguas de Escorrentía.	44

RESUMEN

Esta investigación se centra en realizar el diseño de botadero para almacenar material de baja ley en una mina de tajo abierto. Los relaves mineros deben tener las siguientes características: un nivel de pH en torno a 7,0, bajos niveles de sulfatos (<50 mg/l), concentraciones de arsénico en el rango de 0,01 - 0,02 mg/l, concentraciones de cobre de 0,01 - 0,02 mg/l, niveles de la mayoría de los demás solutos análogos a aquellos encontrados en el sistema de agua subterránea natural. Las muestras de los relaves indicaron valores más altos de ANP y valores más bajos de AGP que Perol. El carbón total varía de 0.27 a 0.57%, y el ANP de 0.84 - 1.7 % CO₂. Las concentraciones totales de azufre varían de 0.02 a 0.58%. A todas las muestras con excepción de MCS-4 (Potásico) que fue clasificada como ligeramente acida (SA) se les asignó valores de NCV de ligeramente básico (SB) a básico (B). El diseño de la poza de sedimentación de relaves se tiene que la altura total del depósito será de aproximadamente 220 m (desde el pie hasta la cresta) y la parte superior del depósito se ubicará a una elevación de 4 050 msnm. El talud total final de los lados del depósito será de 2,5:1 (H: V) (24,4°) (según se requiera para la rehabilitación). La inclinación mínima de la superficie superior será 1% aproximadamente para potenciar el drenaje de agua superficial.

Palabras clave: sedimentación, relave minero, criterios de diseño, estabilidad.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La problemática, radica en la disposición de material estéril a la intemperie y/o acumulado en cursos más cercanos de agua, el propósito de la locación sobre el curso más cercano de agua, fue que estos desechos fuesen arrastrados por las corrientes sin medir las consecuencias como devastación de los campos, peligro a la salud de los habitantes, envenenamiento de los animales y perjuicio a las actividades propias de la zona, (agricultura, ganadería, etc.). (Villanueva, Lino, y Huaña, 2016).

Los botaderos de mina son acumulaciones de material estéril o de contenido mineral de bajo rendimiento económico que son apilados en montones fuera del área de proceso, es necesario realizar un diseño adecuado con un control geotécnico y conociendo los riesgos que implica su construcción, tales como asentamiento de la plataforma, condición de las bermas, presencia de grietas, condición de la plataforma, instrumentación adecuada, presencia de agua, acción erosiva del viento, tipo de material, distribución del material a lo largo de los frentes de descarga, y ángulo del talud. (Ortíz, 2016).

Como consecuencia de las actividades mineras que se van a realizar en el yacimiento en estudio, que ha sido evaluado como pórfido; se van a generar botaderos de desmontes, provocando áreas impactadas, con volúmenes y restos mineros de gran consideración, de características diversas en su mineralogía; por lo que en esta investigación se van a evaluar los criterios utilizados para asegurar la estabilidad física de los diseños que se propone con fines de cierre. La estabilidad física implica el acondicionamiento de la estructura mediante trabajos de cortes, relleno y cobertura los cuales garanticen estabilidad duradera, para ello es sujeto de análisis en función a sus características físicas y de resistencia. El pórfido de cobre - oro estará ubicado en la

cuenca Chailhuagón aproximadamente 1.9 Km al norte del tajo, por lo que representa un peligro latente de contaminación por infiltración, por ello es necesario el adecuado diseño del botadero, aplicando los criterios adecuados, el análisis hidrológico y geotécnico, la infiltración y estabilidad, y estimando la cantidad de movimiento de tierras y materiales de construcción.

Seijas, (2017), diseñó un botadero de mineral y para la estabilidad física utilizó el software RocData pero también realizó los ensayos de laboratorio con el método de Mohr-Coulomb, obteniendo envolventes con parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna para cada una de estructuras. Estos valores se usaron como criterio para el diseño del botadero, usando un valor máximo de ángulo de talud de 45°. Este antecedente se utilizó como procedimiento para determinar la estabilidad física.

Azorin, (2017), **analizó** el colapso de la estructura del botadero debido, y concluyó que las deficiencias se encuentran en la compactación de las capas que conforman el talud, agravado potencialmente por la intensa saturación que provocó, en la masa de suelo, un tramo roto de una conductora de agua, a su vez genera contaminación por metales del botadero y pérdidas económicas para la empresa.

Valdiviezo, (2017), analizó los parámetros técnicos que consideran son: números de plataformas, tipo de material estéril a ser depositado y elementos geométricos, (la altura de la escombrera, ángulo del talud, berma de seguridad, ángulo de reposo).

Paucar, (2015), analizó la configuración adoptada del botadero de desmonte es por banquetas, muestra las características de un ecosistema compatible con un ambiente saludable y adecuado para el desarrollo de la vida y la preservación paisajista. Los resultados de la evaluación de estabilidad física en el diseño del botadero de desmonte, fueron para condición estática el $FS=1.893 > 1.5$ (FS Mínimo admisible) y para condición pseudoestática el $FS=1.183 > 1.0$ (FS Mínimo admisible).

Ortíz, (2016), obtuvo los resultados el más relevante fue, que es más económico hacer la descarga del material durante el periodo 2016-2018 en el botadero Cuajone se generaría un ahorro de 10.46M US\$ y del periodo 2019 - 2020 en el botadero Cocotea Oeste. Todo el material de desmonte es en total de 336 millones de toneladas de la fase 8 hasta llegar a nivel de mineral. Según los resultados obtenidos en laboratorio el material de desmonte no es generador de drenaje ácido, el sistema de clasificación unificado de suelos (SUCS) gravas, arenas, limonitas. En los ensayos de compresión triaxial el ángulo de fricción interna para el depósito de desmonte Cuajone es 37 grados y Cocotea Oeste de 39 grados.

Villanueva, Lino y Huaña, (2016), tuvieron que lidiar con la dificultad de ensayar muestras de desmonte en un tamaño reducido en comparación al diámetro de los bloques que se obtuvo en campo. Respecto a las propiedades dinámicas, el material fue sometido a un ensayo de columna resonante y corte torsional (RCTS) en la Universidad de Texas – USA. Se realizó la calibración del modelo constitutivo HS-Small con los resultados obtenidos de la caracterización geotécnica y se ejecutó un modelo numérico de la estructura.

Calderón, (2016), identificó los factores que producen inestabilidad de taludes del botadero, los cuales son: influencia de aguas superficiales y subterráneas, actividades de perforación y voladura, condiciones de discontinuidades, efectos sísmicos, calidad del macizo rocoso. Los equipos tecnológicos de monitoreo más importantes son: Site Monitor 4D que posee características como: Flexible, Alta Resolución, Exacto, Seguro y Simple.

Esta investigación es importante ya que si no se realiza un diseño adecuado del botadero no se garantizará el almacenamiento de mineral, y al ser un diseño

inadecuado puede colapsar y generar problemas ambientales y económicas para la empresa.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el impacto del diseño de botadero para almacenar material de baja ley en una mina a tajo abierto, Cajamarca 2019?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar el impacto del diseño de botadero en el almacenamiento de material de baja ley en una mina a tajo abierto.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la altura y el ángulo de inclinación de los bancos del botadero.
- Determinar la capacidad de almacenamiento del botadero.
- Determinar el peso específico del material almacenado en el botadero de una mina superficial.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El impacto del diseño de botadero es positivo para el almacenamiento de material de baja ley en una mina a tajo abierto en el departamento de Cajamarca, ya que se evitarán posibles riesgos de contaminación.

1.4.2. Hipótesis específicas

- La altura y el ángulo de inclinación de los bancos del botadero depende del volumen de desmonte generado en la mina superficial.
- La capacidad de almacenamiento del botadero es acorde a la generación de desmonte y a su tratamiento.
- El peso específico del material almacenado influye en la estabilidad física botadero de una mina superficial.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación desarrollada es cuantitativa, ya que en esta tesis el proceso consistió en observar y analizar los criterios que intervienen para el diseño de un botadero de desmonte producto de la explotación del pórfido. (Hernández, Fernández y Baptista 2014, p. 20).

2.2. Diseño de investigación

El nivel de la investigación fue descriptivo - Aplicativo ya que se realizó la descripción de los criterios de diseño de botaderos y estos van a ser aplicados al botadero de desmonte producto de la explotación del pórfido. (Hernández *et al.*, 2014, p. 75)

2.3. Población y muestra

2.3.1. Población

Desmonte generado desde agosto del 2018 hasta noviembre del 2018.

2.3.2. Muestra

Generación mensual de desmonte con baja ley en el botadero, desde agosto del 2018 hasta noviembre del 2018.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.4.1. Técnicas

- Revisión bibliográfica:
 - Tesis realizadas con anterioridad en el proyecto.
 - Manuales técnicos de diseño de botaderos.
 - Estudios preliminares.

- Observación Directa: Se tiene como principal autor al investigador o tesista del tema.
 - Archivos digitales.

- Tomas fotográficas
- Visita In situ.
- Análisis de resultados: factor de seguridad, estabilidad hidrológica, cantidad de movimiento de tierras y requerimiento de materiales.

2.4.2. Instrumentos

Los instrumentos a emplearse para la elaboración del presente trabajo de investigación serán:

- Determinación del factor de seguridad con Slide.
- Plan de minado del pórfido.
- Ficha de toma de coordenadas.
- Planos.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Aspectos generales

Los relaves producidos en el concentrador serán espesados a un 62% de sólidos en tres espesadores de relaves de alta compresión de 70 m de diámetro, que producirán una pulpa estable más uniforme y con una menor conductividad hidráulica (percolación) respecto a los relaves no espesados.

Luego mediante el sistema de bombeo y las tuberías de distribución los relaves serán transportados hasta el depósito de almacenamiento de relaves de 504 Mt.

Las tuberías de descarga han sido dispuestas de tal manera que permitan la deposición de relaves aprovechando la topografía y las condiciones climáticas ambientales según se requieran para una pendiente de deposición de relaves de 4%.

El agua de sobrenadante de los espesadores de relaves será recirculada al tanque de agua de proceso en el concentrador para ser reutilizada en el proceso.

– **Espesado y Bombeado de Relaves**

La Planta de Espesado de Alta Compresión (HCTP: Thickening Plant High Compression) estará ubicada en la extensión aguas abajo del molino hacia el sur del reservorio superior de agua. La alimentación del HCTP es recibida a través de una planta depuradora y un conjunto de cajas de separación.

El HCTP será construido en la zona de operación del molino para minimizar infraestructura adicional que pudiera ser requerida de un terreno remoto.

Operacionalmente, esta disposición es simple y permite el fácil acceso del personal de supervisión, mantenimiento y operaciones entre el molino y la planta de espesamiento.

Los tres espesadores (HCT) normalmente son alimentados vía gravedad a través de la caja de separación que divide los relaves por igual. Si uno de los HCT no está operando, el flujo total del relave de entrada será dirigido hacia los dos HCTs remanentes.

El líquido de desborde de cada HCT será recolectado en un depurador de vertedero dentado y fluirá por gravedad hacia una tubería común que descarga en el estanque de agua de reclamación y es reutilizado en el proceso.

El sobrenadante del HCT estará equipado con un sistema de adelgazamiento por flujo y dos bombas de descarga centrífugas (1 en servicio y 1 en stand-by). La tubería incorporará un sistema para permitir la re-circulación del sub-desbordamiento cuando sea necesario. El cono de descarga será accesible a través de un túnel debajo del espesador; las bombas de espesamiento serán ubicadas a la entrada de cada túnel. El sobrenadante será bombeado hacia el estanque de mantenimiento de los relaves agitados.

Los derrames de emergencia en la planta serán recolectados en el estanque de recolección de la planta.

– **Sistema de Distribución de Relaves**

Los relaves serán bombeados hacia el depósito de eliminación mediante una serie de tuberías principales que distribuyen la pulpa a cada parte del depósito. Los relaves serán distribuidos en elevadores delgados para mejorar el secado y consolidación. Para condiciones de engrosamientos de emergencia, estará disponible una tubería separada para descargar en el extremo sur de las instalaciones de almacenamiento de relaves, adyacente al vertedero de Perol. Ver plano en planta del depósito de relaves y el arreglo general del depósito de relaves.

Las tuberías de descarga han sido dispuestas de tal manera que permitan la eliminación de relaves aprovechando la topografía y las condiciones climáticas ambientales según se requieran para una pendiente de deposición de relaves de 4%. Se planean tres tuberías de descarga principales. Éstas son: La tubería Este (desde el Reservorio Superior de Agua hacia el depósito de desechos Perol), la tubería Oeste (desde el Reservorio Superior de Agua hacia la represa Toromacho) y la tubería de emergencia que considera hasta un 60% del flujo total de descarga durante condiciones de engrosamiento.

3.2. Estabilización de botaderos

3.2.1. Estabilidad Física

La empresa ha establecido diferentes criterios para garantizar la estabilidad física de sus instalaciones, considerando un factor de seguridad (FS) igual o mayor que el utilizado durante sus operaciones para condiciones estáticas, es decir a 1.3 para depósitos de desmonte, mientras que para los depósitos de material de desbroce se utiliza un valor promedio de 1.3 y para las paredes de los tajos se usa 1.2, los cuales se consideran técnicamente conservadores y se aplican para el diseño del cierre final de las instalaciones.

Asimismo, considera que la colocación de barreras anti-erosión para ayudar a reducir la velocidad del agua de escorrentía superficial provocada por la lluvia permite minimizar la pérdida del suelo y finalmente, la vegetación reducirá la posibilidad de que el suelo superficial se desplace y se erosione, considerando que la forestación asociada a esta actividad propiciará la generación de terrazas de formación lenta.

La estabilidad física de las instalaciones tales como diques mayores para contener sedimentos y depósitos de desmonte entre otros, depende de las

pendientes de los taludes y características geotécnicas de los diferentes tipos de material rocoso y/o suelos que componen sus laderas, aceptándose la eventual ocurrencia de desplazamientos menores, razón por la cual la empresa realiza permanentemente estudios específicos en sus instalaciones para determinar los criterios de estabilidad física necesaria para sus instalaciones en proceso de cierre de minas.

Para la rehabilitación de las instalaciones, como por ejemplo los taludes de los depósitos de desmonte, se tienen en cuenta – además de las consideraciones de estabilidad física antes señaladas – criterios paisajísticos que contemplan la reconformación de los mismos con una pendiente adecuada para incorporarlos al entorno circundante en función del uso futuro que se vaya a dar al área, y su posterior cobertura y revegetación con especies nativas de la zona y especies forestales, trabajos que se ejecutarán de manera progresiva, iniciándose durante la etapa de operación o de cierre progresivo y extendiéndose hasta la etapa de cierre final.

3.2.2. Estabilidad Química

El término "estabilidad química" se define en el Reglamento de Cierre de Minas como el comportamiento estable en el corto, mediano y largo plazo de los componentes o residuos mineros que, en su interacción con los factores ambientales, no genere emisiones o efluentes cuyo efecto implique el incumplimiento de los estándares de calidad ambiental, es decir, que eviten o controlen los riesgos de contaminación del agua, aire o suelos, efectos negativos sobre la fauna y flora, los ecosistemas circundantes o sobre la salud y seguridad de las personas.

Se ha identificado que el factor principal a controlar y mitigar en términos de estabilidad química al momento del cierre, es la roca con potencial de generar drenaje ácido, identificada como PAG (Potencial Acid Generator), que se encontraría en algunas zonas expuestas a la superficie durante el desarrollo de las actividades mineras, ya sea en los tajos, depósitos de desmonte u otros.

Es común que los yacimientos mineros, tales como los que explota la empresa, contengan minerales sulfurosos que al estar expuestos simultáneamente al oxígeno del aire y al agua de lluvia se oxidan y acidifican el agua que entra en contacto con ellos. El agua ácida podría dar origen a la generación de efluentes con un alto grado de acidez y/o con una elevada concentración de metales disueltos que podrían generar impactos ambientales en el entorno inmediato de las operaciones mineras. Es por ello que es necesaria una adecuada caracterización del potencial de generación de drenaje ácido de roca, de modo que se puedan implementar las medidas necesarias para prevenir esta generación y/o mitigar los efectos del mismo.

En la empresa la metodología para determinar el potencial de generación de drenaje ácido de roca se basa en la determinación del Valor de Carbonato Neto (NCV, Net Carbonate Value), método que cumple con los estándares requeridos en el estado de Nevada (EE.UU.) y para la cual se hace uso de un equipo analizador denominado Leco SC444-DR o Leco CS 600.

3.2.3. Estabilización Geoquímica e Hidrológica

Como los relaves son potenciales generadores de drenaje ácido, al cierre se colocará una cobertura conformada por una capa de material impermeable, e inerte de un espesor no menor de 1.0 m que evite el contacto de los materiales

de relave con el agua y el aire y que asegure su estabilidad química en el largo plazo.

La segunda capa será de un espesor no menor a 0.25m de suelo orgánico (Top soil) sobre la cual se sembrará la mezcla de especies nativas, acompañada de nutrientes y fertilizantes para promover el rápido crecimiento de la vegetación.

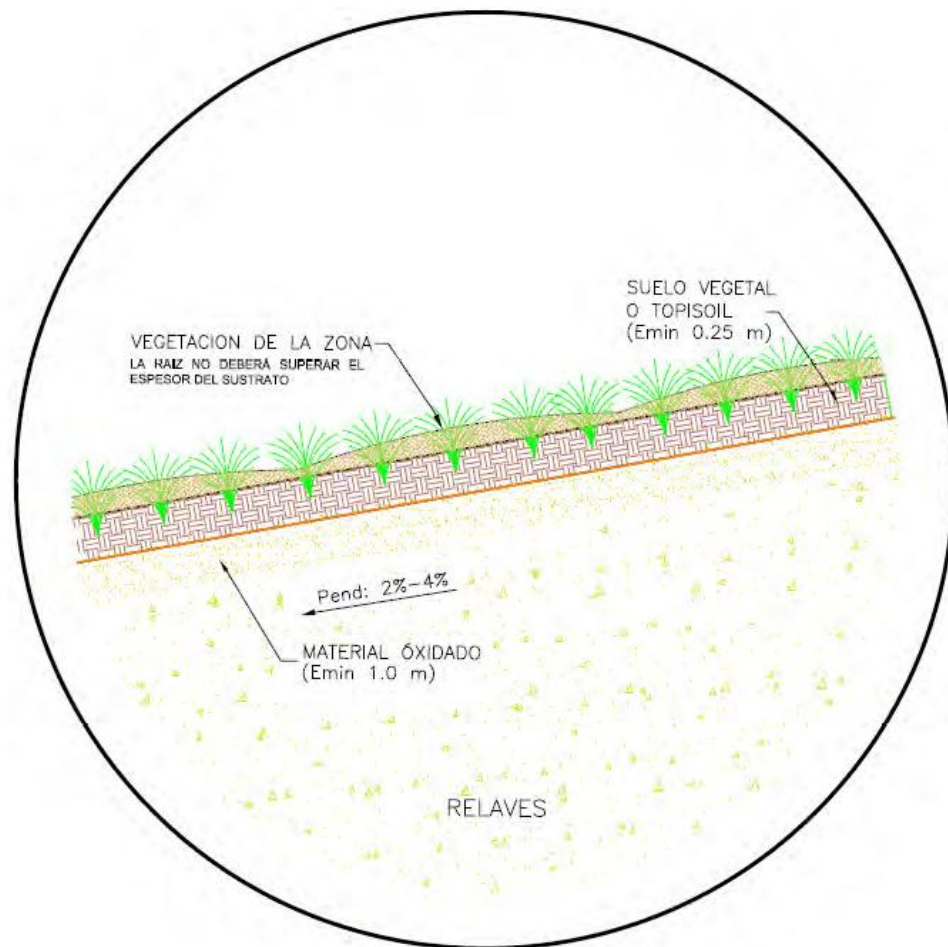


Figura 1. Detalle de la Cobertura y Revegetación del Depósito de Relaves.

Durante los primeros años de la etapa de operación el Proyecto recopilará mayor información, a fin de plantear las estrategias necesarias para evitar el escenario de un depósito de relaves con agua ácida.

Finalmente, para la rehabilitación de las áreas en el depósito de relaves se consideran dos tipos de estrategia de cobertura: una porción de los relaves será

utilizados para crear un área de humedales, de acuerdo al compromiso de la empresa de compensar la pérdida de bofedales en los cuales estarán ubicados los componentes del proyecto y el resto, de ser posible desde una perspectiva de ecotoxicidad, será sembrado con pastos adecuados para el pastoreo de ganado.

Para la etapa de cierre, la mayor parte del área del depósito de relaves será revegetada, tal como se ha descrito anteriormente; sin embargo, se mantendrá operativa una poza en el área del depósito de relaves para permitir la colección, almacenamiento y posterior tratamiento de las aguas. El monitoreo post-cierre permitirá determinar el momento cuando el agua cumpla con los estándares peruanos de calidad sin que sea necesario su tratamiento.

La proporción entre la extensión final de bofedales y las tierras de pasturas se determinará en las negociaciones entre los representantes del proyecto, las autoridades competentes (es decir, MINAG y MEM), y las comunidades. Se anticipa que por lo menos 103 ha del área se convertirán en humedales, con el propósito de restituir la misma extensión de las que se perderían a causa del desarrollo del proyecto. Sin embargo, la meta será crear humedales de una mejor calidad que los bofedales perdidos, específicamente en lo que se refiere a los hábitats y biodiversidad.

La creación de humedales como parte del cierre del depósito de relaves no estará orientada a proporcionar un hábitat específico para la vida acuática. El Proyecto ha diseñado como medidas de mitigación para los impactos potenciales de vida acuática, la construcción y operación de cuatro reservorios de agua fresca, que proporcionarán mayor volumen y superficie de hábitat

acuático abierto comparado con el que se perderá debido al trasvase de lagunas y afectación de quebradas.

Los reservorios se han dimensionado de manera que puedan proporcionar caudales mayores a los actualmente existentes, sobre todo en estiaje entre los meses de junio a octubre. Estos incrementos en los flujos beneficiarán a los hábitats ribereños a lo largo de las quebradas, así como también proveerán mejores condiciones para la vida acuática, dado que se ha identificado que los flujos durante la temporada seca constituyen una limitación al hábitat de las quebradas.

El plan de cierre también reconoce que algunas aguas en el emplazamiento, que incluyen la infiltración del depósito de desmonte Perol y el tajo Perol, requerirán manejo en el largo plazo. En reconocimiento de ello, el plan especifica la operación continua de la planta de tratamiento de aguas ácidas en forma permanente, que podría extenderse más allá del periodo de post-cierre. El monitoreo en el largo plazo durante el cierre y el post-cierre determinará si la operación de esta planta puede detenerse y cuándo podría hacerlo.

La planta de tratamiento de aguas ácidas (AWTP por sus siglas en Inglés Acid Water Treatment Plant) se construirá para el tratamiento de agua del proceso y aguas ácidas en general en las etapas de construcción y operación del Proyecto, permanecerá operativa durante la etapa de cierre, para continuar manejando las aguas ácidas en el emplazamiento. Las fuentes continuas de agua ácida incluirán la infiltración del depósito de desmonte Perol así como el manejo de las aguas de la laguna del tajo Perol, después de 56 años de llenado.

Estas aguas serán canalizadas a un pequeño estanque de recolección que se ubicará en la parte inferior del depósito de relaves. Adicionalmente, los

sistemas de colección de infiltraciones que serán instalados por debajo de la presa principal y presa Toromacho, se mantendrán tanto tiempo como sea necesario para manejar cualquier infiltración proveniente del depósito de relaves.

Se prevé que la cobertura para el área de humedal que se creará será similar a la del resto del depósito de relaves. Más importante que el tipo de material usado para la cobertura será establecer el sistema hidrológico necesario para crear suelos hídricos. Se anticipa que la profundidad de cobertura sea no menor de 0.25m de suelo orgánico, el cual se obtendrá del suelo orgánico removido como parte de las actividades de construcción.

El relave, especialmente el acumulado en la porción aguas abajo del depósito de relaves, probablemente permanecerá saturado debido a las propiedades físicas del mismo y a la ubicación topográfica. Como parte de los estudios a realizarse durante la etapa de operación para comprender los requerimientos para la creación de bofedales, se incluirán estudios hidrológicos. En caso se necesite agua adicional para mantener las condiciones hidrológicas que permitan crear suelos hídricos, se podrá utilizar el agua del reservorio superior.

a. Cobertura y revegetación:

Posteriormente al perfilado de la superficie del relave a una pendiente de 2 a 4%, se colocará sobre el relave una capa de material (caliza granular) de un espesor mínimo de 1.0 m y luego se colocará el estrato superior que estará formado por suelo orgánico (top soil), para el sembrado de las especies a revegetar con un espesor no menor de 0.25m. Se necesitará 1'940,812 m³ de suelo orgánico antes de proceder a la revegetación.

El plan de revegetación comprende la recolonización de la zona del depósito de relaves.

Tras su rehabilitación, mediante su estabilización física, química y cobertura con suelo orgánico, las actividades de revegetación se llevarán a cabo de forma progresiva, mientras se realicen actividades en otras áreas.

b. Uso de tierras:

Tendrá en cuenta el uso del suelo antes del inicio de las actividades (vocación para pasturas y sostenimiento de bosque); los objetivos estarán enfocados a:

- Rehabilitar pastizales utilizados por el ganado local.
- Minimizar fuentes de erosión en zonas intervenidas.
- Rehabilitar las zonas intervenidas mediante la siembra de especies arbóreas nativas de rápido crecimiento.

c. Siembra y trasplante:

Antes de la siembra y trasplante de las especies elegidas, se procederá a perfilar el terreno y a colocar la capa de suelo orgánico, la cual será de no menos de 0.25m de espesor.

d. Estabilización del suelo:

Será necesario combinar la siembra con una o más prácticas de estabilización del suelo para asegurar su adecuada protección contra la erosión hídrica y eólica durante los primeros estadios de crecimiento. La forma predominante de estabilizar el suelo es con el uso de vegetación. Se considera también el uso opcional de una manta para control de la erosión de tal forma que se proteja por lo menos una temporada de crecimiento de la vegetación (se podría usar una manta biodegradable compuesta por 70%

de paja agrícola y 30% de fibra de coco encima dentro de una red pesada de polipropileno estabilizada contra los rayos UV por arriba y una red liviana de polipropileno fotodegradable para proteger por más de una temporada de crecimiento).

- **Insumos y fertilizantes:**

Los insumos y fertilizantes se aplicarán basándose en los resultados de la caracterización de suelos y de acuerdo con el Plan de Manejo Ambiental de la empresa. Los parámetros relevantes para la determinación del tipo y cantidad de insumos y fertilizantes requeridos son: pH, conductividad eléctrica, micronutrientes, nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica. Adicionalmente, en la etapa de cierre final, y con el fin de recuperar las tierras de acuerdo a las condiciones anteriores a la minería, en todas las áreas perturbadas se restablecerá la vegetación, a excepción de los caminos que permanecerán operativos durante el post-cierre.

Las actividades de revegetación requerirán de la preparación de la tierra para que pueda sostener la vegetación. Estas actividades incluirán específicamente:

- Nivelación para proporcionar una superficie estable que resista la erosión.
- Escarificado de caminos y zonas de tráfico para descompactar el suelo.
- Preparación de la superficie mediante la colocación de suelo orgánico y nutrientes.
- La siembra con una mezcla de semillas que incluya las especies de plantas que se adapten a las condiciones edáficas y climáticas de la

zona y que sean auto-sostenibles. Se prevé que la mezcla de revegetación que fue utilizada para el Complejo minero, también será utilizada en el Proyecto. Estas técnicas se han desarrollado y perfeccionado en los últimos años. La técnica actual utiliza una mezcla de siembra manual y de trasplante de pastos nativos y arbustos. La aplicación de semillas promedio y las tasas de modificación de suelo utilizadas se presentan en la siguiente Tabla:

Tabla 1
Tipos de Especies para Revegetación.

Especies de pastos utilizados	Cantidad (Kg/ha)
Rye grass italiano	6
Rye grass híbrido	3
Rye grass tetraploide	3
Pasto ovillo	16
Trébol rojo	4
Festuca alta	3
Avena forrajera	21
Especies nativas	7
Enmiendas y fertilizantes utilizados	Cantidad (Kg/ha)
Cal agrícola	500 – 1000
Súper fosfato triple	80 – 100
Úrea	150 - 180
fertilizantes	500 - 1000

La revegetación de áreas afectadas se realizará utilizando preferentemente especies de flora nativa; sin embargo, es probable que durante la etapa de cierre se empleen algunas especies foráneas de rápido crecimiento y efímeras con la finalidad de cubrir rápidamente áreas expuestas, de modo que se reduzca el potencial erosivo del agua y se aporte materia orgánica al suelo. Estas especies foráneas pueden actuar como especies pioneras que poco a poco sean reemplazadas por especies nativas.

De acuerdo con los resultados de línea base y evaluación de impactos, la mayor parte del área que será afectada como consecuencia del emplazamiento de la infraestructura está cubierta por pajonales en donde las especies predominantes son *Agrostistolucensis*, *Paspalumpallidum*, *Calamagrostisnitidula*, *Jaravaichuy*. Estas mismas especies serán consideradas en el plan de revegetación, Asimismo, también se revegetará con especies que se encuentran dentro de la huella del proyecto y presentan algún estatus especial de conservación.

3.3. Propiedades fisicoquímicas del relave minero para la construcción de las pozas de sedimentación en el proyecto

La Tabla 9, proporciona una descripción general del programa de caracterización geoquímica de los relaves hasta la fecha, incluyendo las características generales de cada muestra de relaves (tajo, litología, relaves gruesos/limpio). La caracterización de los relaves se realizó en tres (3) etapas:

- En el 2004 y 2005, se evaluó la composición de la fase sólida de los relaves y se realizaron los ensayos de lixiviación de corto plazo. Los métodos de ensayos de lixiviación a largo plazo se realizaron usando las muestras de ensayo de Perol y Chailhuagón. Los ensayos de celda de humedad estándar (HCT, siglas en inglés) se realizaron para evaluar las tendencias de reactividad a largo plazo en las muestras de relaves de Perol y Chailhuagón. Los HCT a gran escala se iniciaron con el fin de generar grandes volúmenes (100galones) de efluente de relaves para evaluar las alternativas de tratamiento de agua.

- En el 2006, se realizaron los ensayos de celda de humedad (HCT, siglas en inglés) en cuatro (4) muestras de relaves. Durante esta fase de ensayos de celda de humedad, se lixivió una muestra de 1 kg con 500 mL de agua ionizada semanalmente. Se realizaron ensayos cinéticos durante un periodo de 20 semanas. Se recolectaron y analizaron los lixiviados semanalmente.
- En el 2008 - 2009, se iniciaron los ensayos en columna a gran escala de acuerdo al método descrito en McClelland (2009). Los ensayos se realizaron usando los mismos tipos de relaves que fueron evaluados en el programa de HCT del 2006. Las muestras de los relaves han sido almacenadas en el laboratorio entre los años 2008 y 2009. En los ensayos a gran escala, las cargas de los ensayos consistieron en muestras de 12 kg que fueron aglomerados en 1.7 kg de vidrio inerte usando agua del sitio. El propósito de aglomerar las muestras en vidrio inerte era promover la percolación de la solución a través de cargas de ensayo. Durante las seis (6) semanas de ensayo, se lixiviaron las muestras con 6 a 8 litros de agua del sitio por día (L/día). Entre las semanas 7 y 10 se empleó agua deionizada como lixivante. Los ensayos fueron suspendidos y luego reiniciados muchas semanas después en la semana 10 del ensayo. Se empleó agua deionizada como lixivante después de la semana 10. Se recolectaron y analizaron los lixiviados semanalmente. Los ensayos se realizaron durante un periodo inicial de 10 semanas, durante los cuales se interrumpieron los ensayos en columna durante un periodo de 33 semanas. Después de la interrupción de 33 semanas, se reiniciaron las columnas de relaves de Perol.

Tabla 2

Características Geoquímicas de los Relaves.

Descripción de la Muestra					Análisis				
ID de la Muestra	Clasificación	Tipo de Roca	Mineralogía (XRD)	Análisis de Metal (ICP)	Valor neto de carbonato (NCV, por sus siglas en Inglés)	Ensayo de lixiviación a corto plazo	Análisis de filtración /decantación	Ensayo de Celda de Humedad (2006)	Ensayo de Celda de Humedad (2009)
Chailhuagón									
CHAIL PRI COMP RT/CT	RT/CT	-	x	x	Decantación	Decantación			
CHAIL RUN 10-7/8	RT	-	x	x	x	Filtrado	Filtrado		
Arenas Primarias Potásica MCH	*	Potásico	x (1 de 2 y 2 de 2)	x (1 de 2 y 2 de 2)	x (1 de 2 y 2 de 2)	Decantación	20 semanas	10 semanas	
T10-62/SVT(1-5)	Cola al	Norte de Chailhuagón	RT	-	x	x	x	SPLP,Filtrado, BAPP	Filtrado
Perol									
MCE Arenas Intermedias Argílicas	*	Argílica	x	x	x	Decantación	20 semanas	33 semanas	
Arenas Primarias Fílicas MCE	*	Fílico	x	x	x	Decantación	20 semanas	33 semanas	
Arenas Skarn MCE	*	Skarn	x	x	x	Decantación	20 semanas	33 semanas	
T10-61/SVT(1-5) 40u:60l al	Cola Oeste de Perol	RT	-	x	x	x	SPLP,Filtrado, BAPP	Filtrado	
T11-122-1/RT/1CT	RT/CT	Fílico	x	x	x	BAPP,Filtrado	Filtrado		
T11-122-2/RT/1CT	RT/CT	Argílica	x	x	x	BAPP,Filtrado	Filtrado		
T11-122-3/RT/1CT	RT/CT	Skarn	x	x	x	BAPP,Filtrado	Filtrado		
CORRIDA ARGÍLICA 14-7/8	RT	Argílica	Filtrado	Filtrado					

Descripción de la Muestra					Análisis				
ID de la Muestra	Clasificación	Tipo de Roca	Mineralogía (XRD)	Análisis de Metal (ICP)	Valor neto de carbonato (NCV, por sus siglas en Inglés)	Ensayo de lixiviación a corto plazo	Análisis de filtración /decantación	Ensayo de Celda de Humedad (2006)	Ensayo de Celda de Humedad (2009)
CORRIDA FÍLICA 5/RO TLS7/8 SOL FILTRADO	RT	Fílico	x	x	x	Filtrado	Filtrado		
CORRIDA FÍLICA 9/CL TLS SOL FILTRADO	CT	Fílico	x	x	x	Filtrado	Filtrado		
CORRIDA 17 INT. SOL ARGILICA CT FIL	CT	Argílica Int.	Filtrado	Filtrado					
CORRIDA 18 1-2 AÑO 7/8 SOL FIL RT	RT	Mezclado	Filtrado	Filtrado					
CORRIDA DE SKARN 16-7/8 T13-43/SKARN SOL CT FIL	RT	Skarn	Filtrado	Filtrado					
	CT	Skarn	Filtrado	Filtrado					

Las fases mineralógicas dominantes en los compuestos de relaves de Perol son cuarzo, K-feldespato, ortoclasa y plagioclasa. Los minerales de arcilla presentes en las muestras de relaves de Perol incluyen caolita, clorita y esmectita. Los relaves contienen de 1 a 7% de pirita con una sola muestra (fílica, corrida 9/CL, relaves) con 36% de pirita. Las fases de carbonato, tales como la calcita y siderita, por lo general no se detectaron o se encontraban sólo en trazas. En general, las muestras de relaves de Perol tienen mayores concentraciones de minerales de sulfuro y traza de metales que las muestras de relaves de Chailhuagón. Las muestras de relaves de Perol contienen entre 0.14 y 3.6% de

azufre total con excepción de una sola muestra que contiene 22% S. El contenido de carbón de los relaves de Perol oscilan entre 0.02 a 0.27 % y el potencial de neutralización de ácido (ANP, siglas en inglés) contiene 0.92 % de CO₂ a no detectado.

De acuerdo al método de clasificación de muestras estándar de Newmont basados en el NCV, la mayoría de las muestras fueron designadas como acidas a ligeramente acidas. Una muestra es clasificada como altamente acida, mientras que otra es clasificada como ligeramente básica. Aunque la clasificación de NCV indica que los relaves de Perol tiene un potencial para la generación de ácido, no se detectaron valores de pH ácidos en ninguna de las

soluciones de corto plazo, soluciones de decantación o infiltración. (Las muestras de decantación están conformadas por una solución separada de la pasta de relaves, mientras que el filtrado está conformado por agua de poros que filtra de los relaves).

La decantación e infiltraciones son una representación de la calidad de agua a corto plazo (infiltración así como esorrentía) antes de cualquier reacción geoquímica importante resultante de la exposición de los relaves a la atmosfera, en especial a la oxidación de sulfuro. Estos resultados por lo tanto fueron usados para predecir la calidad de agua a corto plazo. El pH de los lixiviados de la Precipitación Sintética por Procedimiento de Lixiviación (SPLP), las soluciones de infiltración y decantación varían de 7.0 a 10, y las concentraciones de sulfato se encuentran en el rango de 45 y 334 mg/L.

La Tabla 10 presenta un resumen de las concentraciones de la traza de metales en el agua de decantación, infiltración y lixiviados a corto plazo.

Las pruebas de HCT estándar (2006) realizadas en las muestras de relaves de Perol indican que los relaves de Perol probablemente sean generadores de ácido a largo plazo. De las tres (3) muestras de Perol sometidas a ensayo cinético, el MCS-2 (fílico) indicaron valores de pH de lixiviación acida ($\text{pH} < 5.5$) en la primera semana del ensayo y el MCS-3 (argílico) después 7 semanas de ensayo. A pesar de que no se

lograron las condiciones ácidas en el MCS-1 (skarn), los cálculos de reducción de alcalinidad y sulfuro indicaron que era posible la generación de ácido a largo plazo.

Los ensayos en columna confirmaron los resultados de las pruebas HCT para las muestras de relaves argílicos y fílicos. Mientras que las condiciones de acidez se desarrollaron durante muchas semanas de ensayos en las pruebas de HCT estándar, las pruebas de HCT de Perol a mayor escala generaron acidez desde el inicio de los ensayos. Esto se debe a las interrupciones considerables entre los dos (2) programas de ensayos que originaron una considerable oxidación de sulfuro. Los resultados de HCT fueron usados para determinar la calidad de agua a largo plazo por medio del cálculo de las concentraciones promedio de cada parámetro en muchas de las últimas semanas de los ensayos (Tabla 10). Los parámetros principales en los lixiviados a largo plazo proveniente de los relaves fílicos (MCS-2) y relaves argílicos (MCS-3) que poseen similitud en el orden de magnitud.

Los lixiviados (MCS-1) de los relaves skarn de HCT estándar tenían un pH neutral y concentraciones de metal comparativamente bajas. Las HTC de los relaves skarn a mayor escala indicaron pH ácido y concentraciones de trazas de metal y sulfato elevado al inicio de las pruebas.

En general las concentraciones de trazas de metal son más bajas en los ensayos en columna a mayor escala que en los lixiviados provenientes de los ensayos de celdas húmedas estándar. Esto probablemente se deba a las diferentes proporciones de sólidos lixiviados de los dos (2) métodos de ensayo. Los lixiviados de las pruebas HCT fueron lixiviados en una tasa de 500 ml_ de agua deionizada una vez a la semana. Los ensayos en columna fueron lixiviados con aproximadamente 6 L de agua por día. A pesar de que se recolectó el agua proveniente de las celdas semanalmente, la proporción de sólido lixiviado fue significativamente mayor (es decir más

disolución) en los ensayos en columna (incremento de 40 L de agua a 12 kg de sólido por semana). Las tasas de carga para estos parámetros por lo general fueron similares para los relaves argílicos y fílicos indicando tasas similares de reacción sobre una base de masa. Las tasas de carga de metal y sulfato en la HCT estándar del skarn eran menores que las tasas de las pruebas en columna a mayor escala.

En general, las tendencias de concentraciones de sulfato, metal y pH fueron similares entre los dos (2) métodos de ensayo para las pruebas HCT de relaves argílicos y fílicos. Los lixiviados de largo plazo provenientes de todas las muestras de los relaves de Perol indicaban drenaje ácido de rocas (DAR). Los cálculos de reducción de sulfuro indicaron que el sulfuro podía desaparecer totalmente de las celdas de 1 a 17 años.

Tabla 3
Calidad de Agua de los Relaves a Corto Plazo basados en los Resultados del SPLP.

Parámetros	Perol			Chailhuagón		
	Desde	Hasta	Media	Desde	Hasta	Media
pH	7	10	8.2	7.5	8.5	8
Alcalinidad	21	125	52	45	45	45
SO4	45	334	140	29	50	39
Conductividad	441	745	650	330	330	330
Ag	0.001	0.006	0.004	0.001	0.002	0.002
Al	0.05	1.2	0.2	0.07	0.72	0.22
As	0.0003	0.12	0.007	0.003	0.035	0.01
B	0.004	0.17	0.03	0.01	0.17	0.02
Ca	11	362	77	5	302	35
Cd	0.00001	0.25	0.007	0.00006	0.002	0.001
Cl	20	45	32	24	88	56
Co	0.001	0.22	0.006	0.004	0.006	0.005
Cr	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001
Cu	0.001	4	0.04	0.004	0.011	0.004
Fe	0.02	0.1	0.04	0.007	0.03	0.01

Hg	0.0002	0.002	0.0004	0.0003	0.0008	0.0005
K	10	35	19	3	26	10
Mg	0.3	24	4	0.54	6.6	1
Mn	0.007	2.2	0.08	0.004	0.23	0.02
Mo	0.005	0.2	0.03	0.0005	0.07	0.02
Na	17	39	25	23	67	29
NH3	0.2	1.3	0.5	0.48	0.48	0.48
Ni	0.002	0.31	0.01	0.00002	0.01	0.005
P	0.004	0.2	0.02	0.02	0.29	0.03
Pb	0.001	0.03	0.03	0.0001	0.03	0.013
Sb	0.0004	0.1	0.002	0.0003	0.02	0.002
Se	0.0002	0.2	0.02	0.0005	0.07	0.01
Sr	0.03	0.73	0.21	0.01	0.98	0.1
TDS	22	915	365	32	240	180
Ti	0.001	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
Tl	0.00003	0.2	0.001	0.00004	0.003	0.001
V	0.001	0.01	0.001	0.001	0.01	0.001
Zn	0.01	0.75	0.03	0.004	0.004	0.004

3.4. Concentración de metales en el relave minero para evitar la abrasión en la construcción de las pozas de sedimentación

De acuerdo a los resultados de los análisis mineralógicos, las muestras de los relaves indicaron valores más altos de ANP y valores más bajos de AGP que Perol. El carbón total varía de 0.27 a 0.57%, y el ANP de 0.84 - 1.7 % CO₂. Las concentraciones totales de azufre varía de 0.02 a 0.58%. A todas las muestras con excepción de MCS-4 (Potásico) que fue clasificada como ligeramente acida (SA) se les asignó valores de NCV de ligeramente básico (SB) a básico (B). Los resultados detallados de los análisis de infiltración y decantación de los relaves de Chailhuagón que se emplearon para calcular la calidad de agua a corto plazo en los relaves de Chailhuagón, el pH del lixiviado de corto plazo fluctuó de 7.5 a 8.5, y las concentraciones de sulfato fluctuaron de 29 a 50 mg/L. La Tabla 11 presenta el rango de concentración de traza

de metal medido en los lixiviados a corto plazo que (por lo general) era menor que el rango medido en los relaves de Perol. A pesar que la muestra de MCS-4 (Potásico) era clasificada como ligeramente acida, ni la prueba de HCT o el ensayo en columna indicaron que se podría producir condiciones de acidez a largo plazo. Los cálculos de reducción realizados usando los ensayos cinéticos de los relaves de Chailhuagón indicaron que el sulfuro se reduciría antes de la alcalinidad, también indicaron que es posible que esta muestra no sea generadora de ácido a largo plazo. La Tabla 11 compara la química del lixiviado de HCT a largo plazo con los resultados de los ensayos en columna de los relaves de Chailhuagón. En ambos ensayos, el lixiviado a largo plazo tiene un pH circumneutral y bajas concentraciones de sulfato y metal. A pesar de que las tasas de carga del sulfato fueron similares en el HCT y en los ensayos en columna, las tasas de carga de zinc y cobre por lo general eran menores en los lixiviados HCT que en el lixiviado de los ensayos en columna.

Tabla 4

Calidad de Agua de los Relaves a Largo Plazo basados en los Resultados del Ensayo de Celda de Humedad y los Ensayos en Columna.

	MCS-1 Skarn, Perol		MCS-2 Fílico, Perol		MCS-3 Argílico, Perol		MCS-4, Chailhuagón		Relaves de Perol		Relaves Chailhuagón
	2006 HCT	2009 HCT	2006 HCT	2009 HCT	2006 HCT	2009 HCT	2006 HCT	2009 HCT	No acidez	Acido	
Semanas ¹	15 -20	27 -33	15 -20	27 -33	15 -20	27 -33	15 -20	27 -33			
pH	7.8	2.2	2.4	2	3.1	2.2	7.8	7.5	7.8	2	7.8
Potencial	Redox	600	559	589	232	600					
Conductividad	1.4	2.3	1.6	0.01	2.3						
Cl	6	15	6	0.3	15						
F	1.3	0.6	0.61	0.1	1.3						
SO ₄	26	319	1561	581	380	437	24	33	26	581	24
Al	5	37.75	7	13.65	23	0.03	0.05	23	0.03		
Sb	0.001	0.003	0.0003	0.003	0.0002	0.003	0.003	0.001	0.0002	0.003	0.003
As	0.0004	0.005	0.04	0.01	0	0.01	0.0017	0.003	0.0004	0.01	0.002
Ba	0.009	0.01	0.08	0.02	0.01	0.01	0.002	0.02	0.01	0.02	0.002
Be	0.00001	0.001	0.0007	0.001	0.0113	0.002	0.00001	0.0001	0.00001	0.002	0.00001
B	0.006	0.1	0.004	0.1	0.004	0.1	0.003	0.02	0.004	0.1	0.003
Cd	0.0001	0.004	0.008	0.016	0.021	0.007	0.00003	0.0001	0.0001	0.016	0.00003
Ca	26	35	2.6	1	43	13	24	20	2.6	35	24
Cr	0.0005	0.01	1.2	0.06	0.017	0.06	0.05	0.0005	0.06		
Co	0.41	0.36	0.08	0.19	0.1	0.05	0.41				
Cu	0.002	0.83	14	0.87	25	2.15	0.009	0.05	0.0015	2.15	0.009
Fe	0.01	56	545	180	16	70	0.02	0.05	0.0102	180	0.02
Pb	0.0005	0.003	0.02	0.003	0.002	0.003	0.00004	0.00012	0.0005	0.003	0.00004
Li	0.003	0.1	0.004	0.1	0.007	0.1	0.007	0.001	0.003	0.1	0.007

Mg	1.93	4.05	3.4	1.4	11.3	19	0.65	0.7	1.9	19	0.65
Mn	0.01	0.67	1.6	0.1	2.4	1.3	0.01	0.01	0	1.3	0.01
Hg	0	0.0001	0.0003	0.0001	0.0019	0.0001	0	0.0001	0.0003	0.0001	0.0002
Mo	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
Ni	0.003	0.04	0.58	0.02	0.31	0.04	0.006	0.05	0.003	0.04	0.006
P	0.02	0.5	0.23	0.5	0.36	0.5	0.02	0.14	0.02	0.5	0.02
K	6.2	0.5	1.8	0.5	3.9	0.5	9.9	4.08	1.8	0.5	9.9
Se	0.002	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.001	0.0004	0.002	0.01	0.001
Ag	0.002	0.01	0.01	0.001	0.01	0.05	0.01				
Na	0.27	0.5	0.28	0.5	0.81	0.5	4.3	3.2	0.27	0.5	4.3
Tl	0.06	0.001	0.69	0.001	0.28	0.001	0.2	0.0001	0.06	0.001	0.2
Sn	0.1	0	0.1	0.1	0.05	0.1					
Ti	0.1	0.1	0.1	0	0.05	0.1	0.001				
V	0.01	0.003	0.01	0.01	0.05	0.01					
Zn	0.001	0.15	1.2	0.07	7.4	0.63	0.001	0.05	0.001	0.63	0.001

Las predicciones sobre la calidad de agua de la Poza de Recuperación de cierre y post cierre representados en la Tabla 12, muestran el efecto de la recuperación simultánea al incluir la incorporación del potencial de neutralización a los relaves reactivos de Perol en la playa de relaves antes de la instalación de la cobertura de cierre (Años 2034), y los efectos subsecuentes al tratar la infiltración y la escorrentía del Depósito de Desmontes Perol (Año 2060 y Año 2100) y el agua del Lago del Tajo Perol (Año 2100) antes de la descarga de estos flujos a la Poza de Recuperación.

Las medidas de mitigación incluyendo la incorporación del potencial de neutralización en las capas superiores de los relaves y el tratamiento de los flujos ácidos en la Poza de Recuperación, mejorará la composición del agua en la Poza de Recuperación de post cierre.

Tabla 5

Resumen de la Composición Pronosticada de la Calidad de Agua de la Poza de recuperación durante el año 2, año 9 y año 15 de operación de la Mina

		Criterios - Categoría 3		LMP Real ¹	Condiciones de estiaje		Condiciones Lluvias		General	
		Tallo bajo / Tallo	Bebida de animales	LÍMITE EN	Concentraciones Mínimas	Concentraciones Máximas	Concentraciones Mínimas	Concentraciones Máximas	Concentraciones Mínimas	Concentraciones Máximas
pH	s.u.	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4	6.0 - 9.0	7.8	2.6	7.3	2.3	7.8	2.3
pe	s.u.				2.0	10	3.0	10	2.0	10
Alcalinidad	mg/L como CaCO ₃				56		59		59	
Aluminio	mg/l	5.0	5.0		0.37	5.2	0.69	11	0.37	11
Arsénico	mg/l	0.05	0.10	1.0	0.003	0.007	0.002	0.007	0.002	0.007
Boro	mg/l	0.5 - 6	5.0		0.01	0.03	0.01	0.05	0.01	0.05
Calcio	mg/l	200			26	63	21	45	21	63
Cadmio	mg/l	0.005	0.01	0.10	0.001	0.005	0.001	0.01	0.001	0.01
Cloruro	mg/l	100 - 700			13	25	8.7	17	8.7	25
Cobalto	mg/l	0.05	1.0		0.002	0.09	0.002	0.19	0.002	0.19
Cromo	mg/l	0.10	1.0	1.0	0.001	0.01	0.002	0.03	0.001	0.03
Cobre	mg/l	0.20	0.50	1.0	0.03	0.71	0.03	1.3	0.03	1.3
Hierro	mg/l	1.0	1.0	2.0	0.23	29	0.42	85	0.23	85
Mercurio	mg/l	0.001	0.001	0.002	0.0002	0.0003	0.0001	0.0003	0.0001	0.0003
Potasio	mg/l				3.7	11.1	11	28	3.7	28
Magnesio	mg/l	150	150		0.45	4.3	0.50	9.0	0.45	9.0
Manganeso	mg/l	0.2	0.2		0.03	0.35	0.05	0.75	0.03	0.75
Molibdeno	mg/l				0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
Sodio	mg/l	200			9.3	6	4.4	8.4	4.4	16
Níquel	mg/l	0.20	0.20		0.004	0.01	0.01	0.03	0.004	0.03
Piomo	mg/l	0.05	0.05	0.40	0.004	0.01	0.003	0.008	0.003	0.01
Selenio	mg/l	0.05	0.05		0.001	0.01	0.001	0.008	0.001	0.01
Sulfatos	mg/l	300	500		41	378	57	716	41	716
Estroncio	mg/l				0.02	0.12	0.01	0.06	0.01	0.12
Vanadio	mg/l				0.001	0.01	0.001	0.03	0.001	0.03
Zinc	mg/l	2	24	3	0.04	0.30	0.08	0.95	0.04	0.95

Tabla 6

Resumen de las predicciones de Calidad de agua de la Poza de Recuperación – Post Cierre- escorrentia e infiltracion No tratada proveniente del Depósito.

	Criterios - Categoría 3	LMP Real ¹	Cierre – Año 2034				Post - Cierre Fase 1 – Año 2060		Post - Cierre Fase 2 – Año 2100				
			Talfo bajo / Talfo alto	Bebida de animales	LÍMITE EN CUALQUIER MOMENTO	Época de Estiaje ²⁻ Escorrentia y Filtración no tratada del Botadero de Perol		Época de Lluvias ²⁻ Escorrentia y Filtración no tratada del Botadero de Perol		Época de Estiaje ²⁻ Escorrentia y Filtración no tratada del Botadero de Perol		Época de Lluvias ²⁻ Escorrentia y Filtración no tratada del Botadero de Perol	
						8.1	7.6	3.2	4.5	3.6	6.2		
pH	s.u.	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4	6.0 - 9.0									
Alcalinidad	mg/L as CaCO ₃				32	11			-20	0			
Aluminio	mg/l	5.0	5.0		0.014	0.005	24	2.2	20	0.0007			
Arsénico	mg/l	0.05	0.10	1.00	0.00001	0.000001	0.02	0.005	0.02	0.0001			
Boro	mg/l	0.5 - 6	5.0		0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.004			
Calcio	mg/l	200			54	53	73	71	106	125			
Cadmio	mg/l	0.005	0.01	0.10	0.005	0.02	0.11	0.03	0.10	0.04			
Cloruro	mg/l	100 - 700			29	30	79	35	66	25			
Cobalto	mg/l	0.05	1.0		0.004	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001			
Cromo	mg/l	0.10	1.0	1.0	0.0001	0.0003	0.02	0.002	0.01	0.002			
Cobre	mg/l	0.20	0.50	1.00	0.07	0.86	27	2.9	32	12			
Hierro	mg/l	1.0	1.0	2.0	0.0001	0.07	4.8	1.4	11	6.7			
Mercurio	mg/l	0.001	0.001	0.0020	0.0004	0.0003	0.0005	0.0004	0.0005	0.0005			
Potasio	mg/l				25	89	455	105	383	80			
Magnesio	mg/l	150	150		0.57	1.1	0.46	0.56	6.1	10			
Manganeso	mg/l	0.2	0.2		0.18	0.71	3.9	1.1	3.7	1.7			
Molibdeno	mg/l				0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01			
Sodio	mg/l	200			18	8.9	16	7.7	16	9.2			
Niquel	mg/l	0.200	0.2		0.005	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05			
Plomo	mg/l	0.05	0.05	0.40	0.002	0.001	0.10	0.03	0.08	0.02			
Selenio	mg/l	0.05	0.05		0.01	0.01	0.01	0.003	0.01	0.005			
Sulfatos	mg/l	300	500		133	215	909	299	905	453			
Estroncio	mg/l				0.10	0.05	0.09	0.07	0.22	0.28			
Vanadio	mg/l				0.00000	0.003	0.01	0.005	0.008	0.003			
Zinc	mg/l	2	24	3	0.39	3.0	12	5.2	11	4.4			
Gibbsita	Al(OH) ₃				P	P		P		P			
Malaquita	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃				P								
Ferrihidrita	Fe(OH) ₃				P	P	P	P	P	P			
Rodocrosita	MnCO ₃												

		Criterios - Categoría 3		LMP Real ¹ LIMITE EN CUALQUIER MOMENTO	Cierre - Años 2034		Post-Cierre - Fase 1 - Años 2060		Post cierre - Fase 2 - Año 2100	
		Tallo bajo / Tallo alto	Bebida de animales		Epoca de Estiaje ² - Escorrentía y Filtración tratada del Botadero de	Epoca de lluvia ² - Escorrentía y Filtración tratada del Botadero de	Epoca de Estiaje ² - Escorrentía y Filtración tratada del Botadero de	Epoca de lluvia ² - Escorrentía y Filtración tratada del Botadero de	Epoca de Estiaje ² - Escorrentía y Filtración tratada del Botadero de	Epoca de lluvia ² - Escorrentía y Filtración tratada del Botadero de
					Perol	Perol	Perol	Perol	Perol	Perol
pH	s.u.	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4	6.0 - 9.0	8.1	8.1	8.0	8.1	8.0	8.0
Alcalinidad	mg/L as CaCO ₃				36	33	31	33	30	28
Aluminio	mg/l	5.0	5.0		0.02	0.01	0.013	0.014	0.012	0.012
Arsénico	mg/l	0.05	0.10	1.00	0.005	0.0005	0.002	0.001	0.001	0.001
Boro	mg/l	0.5 - 6	5.0		0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.004
Calcio	mg/l	200			55	57	148	87	169	136
Cadmio	mg/l	0.005	0.01	0.10	0.004	0.02	0.10	0.03	0.09	0.03
Cloruro	mg/l	100 - 700			29	30	79	35	66	25
Cobalto	mg/l	0.05	1.0		0.004	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001
Cromo	mg/l	0.10	1.0	1.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.00	0.000
Cobre	mg/l	0.20	0.50	1.00	0.01	0.80	2.2	1.2	1.1	1.1
Hierro	mg/l	1.0	1.0	2.0	0.0001	0.12	0.003	0.19	1.2	2.2
Mercurio	mg/l	0.001	0.001	0.0020	0.0004	0.0003	0.0005	0.0004	0.0005	0.0005
Potasio	mg/l				25	89	455	105	383	80
Magnesio	mg/l	150	150		0.57	1.1	0.46	0.56	6.1	10
Manganeso	mg/l	0.2	0.2		0.30	0.45	1.5	0.8	1.8	1.4
Molibdeno	mg/l				0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
Sodio	mg/l	200			18	8.9	16	7.7	16	9.2
Niquel	mg/l	0.200	0.2		0.005	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
Plomo	mg/l	0.05	0.05	0.40	0.011	0.004	0.01	0.00	0.01	0.003
Selenio	mg/l	0.05	0.05		0.01	0.01	0.01	0.003	0.01	0.01
Sulfatos	mg/l	300	500		130	200	824	282	832	441
Estroncio	mg/l				0.10	0.05	0.09	0.07	0.22	0.28
Vanadio	mg/l				0.0006	0.003	0.00	0.004	0.001	0.003
Zinc	mg/l	2	24	3	0.14	1.0	3.6	1.6	3.4	1.7
Gibbsita	Al(OH) ₃				P	P	P	P	P	P
Malaquita	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃				P					
ferrihidrita	Fe(OH) ₃				P	P	P	P		P
Radocrosita	MnCO ₃									

3.5. Criterios de diseño minero para la construcción de las pozas de sedimentación

Los depósitos de desmonte de roca son instalaciones construidas y operadas para la recepción del desmonte de roca de la mina, ya sea éste material inerte o material con potencial de generar drenaje ácido de roca (PAG). El desarrollo, construcción y descargas de los depósitos de desmonte son llevados a cabo de tal manera de minimizar la posibilidad de generar drenaje ácido de roca mediante la colocación del material potencialmente generador de drenaje ácido de roca en el interior del depósito, encapsulándolo de ese modo con material inerte (principalmente desmonte de material oxidado).

Los criterios de diseño para la rehabilitación de los depósitos de desmonte de roca son los siguientes:

- Se deben reconformar los taludes con la finalidad que queden físicamente estables. Por lo general, el ángulo entre bancos debe tener una pendiente de 2.0 H: 1 V y un ángulo de talud general de 2.5 H: 1 V; sin embargo, esto puede variar de acuerdo a los estudios geotécnicos de estabilidad de los depósitos de desmonte de roca con fines de cierre final.
- Entre dos bancos o niveles deberá dejarse una plataforma de 10 m de ancho como mínimo, en la que se construirán canales de drenaje permanente que tengan la capacidad de soportar un evento de tormenta de 200 años/ 24 horas.
- Con la finalidad de minimizar la generación de agua ácida dentro del depósito de desmonte de roca, se considerará, cuando sea factible, la instalación de una capa de material oxidado de un (1) metro de espesor.
- Para reducir la infiltración de agua al interior de los depósitos de desmonte a ser cerradas, se podría considerar.

- Luego de reconformar las áreas de cierre, estas serán cubiertas con una capa de suelo superficial no menor a 0.25 m de espesor para su posterior revegetación y deberán estar provistas de las medidas necesarias para controlar la erosión de los suelos y la sedimentación.

3.5.1. Sedimentadores

La empresa opera un número importante de estructuras para el control de sedimentos. Estas estructuras se excavan por lo general en el terreno natural. En la estrategia de rehabilitación y cierre de las minas se ha considerado la reducción del número de estas estructuras a través de su cierre progresivo.

Para la rehabilitación de las pozas de sedimentación se requiere la ejecución de las siguientes acciones:

- Relleno de la estructura con un material similar al que fue removido para construir el sedimentador.
- Reconformación del área hasta lograr un paisaje que se asemeje a la topografía del lugar.
- Se debe colocar una cobertura de suelo superficial no menor a 0.25 m de espesor, para su posterior revegetación e instalación de las medidas necesarias para controlar la erosión de los suelos y la sedimentación.

3.5.2. Tratamiento de Agua

El proyecto realizará, como parte de sus operaciones, el tratamiento activo de agua ácida para lo cual contará con una planta de tratamiento de aguas ácidas (AWTP por sus siglas en inglés Acid Water Treatment Plant).

Hacia la AWTP se conducirá el agua que provendrá principalmente del bombeo del agua del tajo Perol, así como las infiltraciones del depósito de desmonte Perol, de la plataforma de almacenamiento de material de mina (ROM Pad) y

potencialmente, las infiltraciones del depósito de relaves, las que serán colectadas en la poza de recuperación asociada al depósito de relaves. El agua tratada en dicha planta será descargada al reservorio inferior o superior, de acuerdo a las autorizaciones respectivas y a los límites máximos permisibles exigidos por la normatividad peruana vigente.

Se anticipa que el tratamiento de las aguas que provienen de las operaciones de mina, principalmente en lo que se refiere al drenaje ácido de roca que se genera tanto en el Tajo Perol y el depósito de desmonte Perol, será un requerimiento permanente. Sin embargo, el volumen de agua a tratar deberá disminuir después de la implementación de medidas para reducir la infiltración, como por ejemplo la cobertura de suelo orgánico y la revegetación que se instale sobre esta.

Se prevé la necesidad de mantener el tratamiento de agua de manera permanente en las siguientes instalaciones:

- Tajo abierto Perol que tiene potencial para generar drenaje ácido de roca, y
- Depósitos de desmonte Perol.

Para la estimación de los costos de tratamiento de agua para las diferentes instalaciones, se utilizará la información de campo o modelos de cálculo con rangos de infiltración generados por estudios anteriores y mediciones en campo, promedios de precipitación de cada área de la mina usando los promedios anuales registrados en las estaciones meteorológicas de la empresa y los estimados de las áreas totales correspondiente al término de la vida de la mina.

El éxito de las estrategias de reducción de la infiltración se evidenciará con la reducción progresiva de los flujos en las salidas de las infiltraciones de cada instalación, reduciendo de esta manera el volumen de agua a tratar.

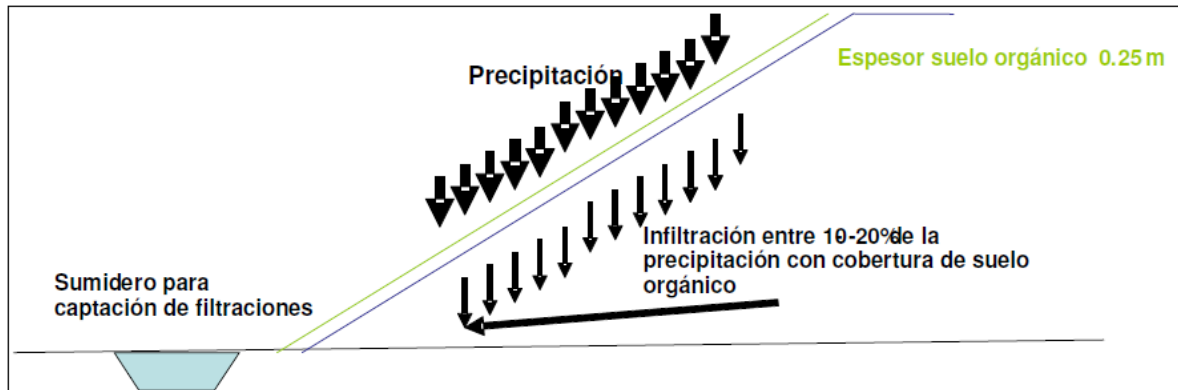


Figura 2. Coberturas para Reducir la infiltración de Aguas de Escorrentía.

- El tratamiento permanente de agua en la planta AWTP indica que el Proyecto mantendrá como mínimo un personal encargado del manejo de la planta, logística para la compra de insumos, personal para el monitoreo de agua, mantenimiento de pozas, disposición de residuos, entre otras actividades necesarias para el manejo de esta actividad.

3.5.3. Canales de Drenaje y Derivación

El diseño de los canales de drenaje y de derivación se hará considerando que su utilización podrá ser permanente durante y luego del término de la vida operativa de la mina.

En general el diseño para el control del agua superficial de estas instalaciones se hace sobre la base de que deben ser capaces de soportar un evento de tormenta no menor a 200 años/ 24 horas.

Los canales serán diseñados con una sección trapezoidal, con taludes de pendiente menor o igual a 2H:1V. La geometría del mismo se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 7
Taludes Finales de Corte y Relleno para el Diseño Geométrico de un Canal.

Parámetro	Valor	
Ancho de la Base	Mínimo 1 m	
Pendiente de la Base	Mínimo 0.5 %	
Taludes	2 H: 1 V	
Borde Libre	Máximo	750 mm
	Mínimo	300 mm
	$Fr \leq 1$	25 % de la profundidad del flujo
	$1 < Fr \leq 3$	25 % de la profundidad del flujo
	$Fr > 3$	Profundidad del flujo normal

Fr = Número de Froude

El cierre de los canales temporales se hará de la siguiente manera:

- Los canales serán rellenos con desmonte de roca inerte y reconformados hasta lograr su integración a la topografía circundante.
- Las áreas rehabilitadas deberán contar con un sistema de drenaje apropiado que asegure el control de la escorrentía superficial y de la erosión potencial.
- Cualquier material excedente que se genere como resultado de la reconformación del área, deberá ser distribuido en la zona adyacente de manera que no se evidencien acumulaciones de material.
- Las áreas reconformadas serán cubiertas con una capa de suelo superficial no menor a 0.25 m de espesor para su posterior revegetación, debiendo estar provistas de las medidas necesarias para controlar la erosión de los suelos y la sedimentación.

3.5.4. Criterios de Diseño de la Presa de Relaves

El diseño de las presas del Depósito de relaves (TSF por sus siglas en inglés Tailings Storage Facilities), incluye la Presa de Relaves Principal, la Presa Principal de Colección de Infiltraciones, la Ataguía Principal y la Presa de Relaves Toromacho.

Los criterios de diseño consisten en información derivada de reglamentos, normas, lineamientos, requerimientos del cliente y las condiciones del proyecto usando como normas para el diseño y análisis. Las Tablas 15 y 16, resumen los criterios de diseño adoptados para el diseño de las presas del TSF.

Tabla 8
Resumen de los Criterios de Diseño del TSF.

Criterios de diseño	Presa principal de relaves	Atagüía principal	Presa de relaves	Presa principal de colección de filtración
Ancho de la cresta	15 m	15 m	15 m	8 m
Cara del talud aguas arriba	2.5H:1V	1.7H:1V	2.5H:1V	2H:1V
Cara del talud aguas abajo	2H:1V	1.5H:1V	2H:1V	2H:1V
Coefficiente de diseño sísmico	Kh=0.50 PGA	Kh=0.50 PGA	Kh=0.50 PGA	Kh=0.50 PGA
Factor mínimo de seguridad, condición estática a largo plazo	1.50	1.50	1.50	1.50
Factor mínimo de seguridad, condición post sísmica	1.20	1.20	1.20	1.20
Factor mínimo de seguridad, condición pseudo-estática	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 9
Resumen de las Aceleraciones Máximas de Suelo (PGA).

Sismicidad	PGA	Comentarios
Sismo - Periodo de Retorno de 1/10,000 años	0.4 g	Consecuencia de Falla "Muy Alta", CDA (Tabla 2: Niveles de Diseño Sugeridos para inundaciones y Sismos (evaluación determinista) (CDA, 2007)) (*)
Sismo - Periodo de Retorno de 1/2,500 años	0.3 g	Consecuencia de Falla "Alta", CDA (Tabla 2: Niveles de Diseño Sugeridos para inundaciones y Sismos (evaluación determinista) (CDA, 2007))
Sismo - Periodo de Retorno de 1/500 años	0.2 g	Consecuencia de Falla "Baja", CDA (Tabla 2: Niveles de Diseño Sugeridos para inundaciones y Sismos (evaluación determinista) (CDA, 2007))

(*) se ha adoptado en forma conservadora el sismo con periodo de retorno de 1/10,000 años correspondiente a la consecuencia de falla "Extrema" para el análisis de estabilidad de las presas con consecuencia de falla "Muy Alta".

3.5.5. Condiciones de la Cimentación

Presa Principal de Relaves y Presa Principal de Colección de Infiltración el emplazamiento de la Presa Principal de Relaves y la Presa Principal de Colección de Infiltración se ubica en una sección angosta del valle de Río Grande, con pendientes moderadamente empinadas que definen la sección simétrica del valle. Esta zona angosta del cauce del río se extiende hasta la confluencia con la quebrada Lluspioc, aguas abajo del Reservorio Inferior, donde el valle se vuelve más ancho y se desarrollan terrazas aluviales.

El basamento rocoso está compuesto por brechas volcánicas con capas delgadas de tobas andesíticas que forman parte de la formación Frailones. En general, la roca es masiva a no muy fracturada, ligeramente meteorizada a fresca y moderadamente dura.

Las condiciones del suelo de acuerdo a las calicatas realizadas y las perforaciones muestran que el basamento rocoso en el área de la base de la presa se encuentra debajo de una cobertura delgada de suelo que por lo general no excede los 0,5 m de espesor aunque puede alcanzar los 4 m de espesor en el centro del valle y las áreas del estribo derecho. En los estribos, el suelo es limoso y/o orgánico con baja plasticidad.

3.5.6. Estructuras Hidráulicas

La construcción de la Presa de Relaves Toromacho requerirá la construcción de la Ataguía Toromacho para proteger las áreas de construcción. Esta estructura de 12.5 m de altura estará ubicada junto al pie aguas arriba de la Presa de Relaves Toromacho, y se construirá usando relleno común compacto protegiendo el talud aguas arriba con una geomembrana. El ancho propuesto de la cresta es de 5 m con taludes aguas arriba y aguas abajo de 2.51-1:1 V.

La cara aguas arriba de la Ataguía Toromacho incluye una cobertura continua con un revestimiento de geomembrana HDPE de 1,5 mm para proporcionar una contención hidráulica antes de la construcción de la Presa de Relaves Toromacho. Se propone que el sistema de revestimiento de geomembrana sea colocado por debajo de un geotextil no tejido de 270 g/m² instalado sobre una superficie preparada e inspeccionada. El empalme del perímetro de la geomembrana será proporcionada por zanjas de anclaje comunes a lo largo de la cresta y estribos.

Debido a que el sistema del revestimiento con geomembrana de la Ataguía Toromacho es una barrera temporal, no se cuenta con subdrenaje para poder prevenir posibles levantamientos e inestabilidad local en caso de una presión de poros no balanceada que se forme debajo de la geomembrana. Para evitar posibles presiones de agua de poros no balanceadas por debajo de la geomembrana se recomienda limitar el ciclo rápido y repetido y el abatimiento del estanque temporal almacenado por la ataguía y retirar la geomembrana de la ataguía temporal, o proporcionar drenaje a través de dicho revestimiento cuando la geomembrana ya no sea necesaria (es decir, después que la Presa de Relaves Toromacho esté operativa).

Otras estructuras hidráulicas incluyen:

- Una caja de alcantarilla de concreto de 1m x 1m que cruce la Ataguía Toromacho y la base de la Presa de Relaves Toromacho.
- Una estructura para la disipación de energía en la descarga de la alcantarilla de desviación de construcción a la quebrada natural.
- Un canal de drenaje para la Etapa 1 - Presa de Relaves Toromacho

3.5.7. Diseño de la Geomembrana

La cara aguas arriba de la Presa de Relaves Toromacho incluye una cobertura continua con una geomembrana de HDPE de 2,00 mm con una parte superior suave y una parte inferior texturizada para proporcionar una contención hidráulica adicional y protección al núcleo aguas arriba. El empalme del perímetro de la geomembrana será proporcionado por zanjas de anclaje comunes a lo largo de la cresta y estribos con la geomembrana conectada al plinto de la cortina de inyecciones a lo largo de las porciones de elevación más baja del pie aguas arriba.

El depósito de la Presa de Relaves Toromacho también contará con geomembrana. Debido a que no se espera que la Presa de Relaves Toromacho contenga agua embalsada, no se cuenta con un sistema de subdrenaje para la geomembrana para poder prevenir posibles levantamientos e inestabilidad local en caso una presión de poros no balanceada que se forme debajo de la geomembrana.

3.5.8. Análisis de Estabilidad de la Presa

Se llevaron a cabo análisis estáticos y pseudo-estáticos (sísmicos) de estabilidad del talud de las presas del Depósito de Relaves utilizando el software SLIDE, versión 5.040, desarrollado por Rocscience (Rocscience, 2018). Se seleccionó una sección representativa de cada presa para el análisis de estabilidad, incluyendo la configuración después de los trabajos de preparación de la cimentación anteriormente descritos. La Tabla 17 presenta las propiedades del material del basamento rocoso para la cimentación y la Tabla 18 muestra las propiedades de los materiales del Relleno y de los Relaves de la Presa utilizados para el análisis de estabilidad.

Tabla 10
Propiedades del Basamento Rocoso, Área TSF.

Capa	Material	Espesor	Peso unitario y (kN/m ³)	Ángulo de Fricción Φ(°)	Cohesión C (kPa)
H-1	Roca 1	5.0	23	42	500

 Tabla 11
Propiedades del Material para el Relleno de la Presa y los Relaves.

	Peso unitario γ(kN/m ³)	Ángulo de Fricción Φ (°)	Cohesión C (kPa)	Resistencia al corte no drenada Su (kPa)
Enrocado	20	42	0	-
Núcleo drenado	18	32	0	-
Núcleo No drenado	18	-	-	90 (*)
Filtro	19	36	0	-
Transición	19	36	0	-
Enrocado relleno de concreto	20	42	0	-
Relaves drenados	16	25	0	-
Relaves no drenados	16	-	-	0.22 σ _v

Los análisis sísmicos se realizaron utilizando un coeficiente sísmico horizontal de acuerdo con los criterios de diseño presentados en la Tabla 18.

Adicionalmente se realizó un análisis de deformación sísmica para casos selectos utilizando el procedimiento propuesto por Bray y Travasarou (2007). Esta es una relación semi-empírica para el cálculo del desplazamiento permanente debido a deformaciones elásticas inducidas por sismos.

El modelo predictivo para calcular el desplazamiento sísmico es:

$$\ln(D) = -1.0 - 2.83 \ln(ky) - 0.333(\ln(ky))^2 + 0.566 \ln(ky) \ln(Sa(1.5Ts)) + 3.04 \ln(Sa(1.5Ts)) - 0.244 (\ln(Sa(1.5Ts)))^2 + 1.5 Ts$$

Donde:

k_y = coeficiente de rendimiento.

T_s = período fundamental inicial de la presa (s).

$S_a(1.5T_s)$ = aceleración espectral del movimiento sísmico de entrada en un período de

1,5 T_s en las unidades de "g".

D = desplazamiento (cm).

Para el análisis de deformación, la aceleración espectral seleccionada para el emplazamiento, la cual se obtuvo siguiendo las recomendaciones presentadas en Young et al. (1997) y considerando una magnitud máxima promedio del sismo de diseño igual a $M_w=8,0$ a una distancia de ruptura de $R=100$ km, lo que corresponde a un sismo de 1/10.000 años ($PGA = 0,4g$). Se utilizó esta aceleración espectral en forma conservadora para el análisis de deformación de todas las presas TSF, independientemente de su sismo de diseño correspondiente.

La Tabla 12, muestra los resultados del análisis de estabilidad estática para las superficies de deslizamiento aguas arriba, considerando que el reservorio está vacío (caso crítico).

Tabla 12

Resultados de los Análisis de Estabilidad - Talud Aguas Arriba, Reservorio vacío.

Etapa	Caso de análisis	FSDS1 (Superficie de deslizamiento con poca profundidad)	FSDS2 (Superficie de deslizamiento a través de la cresta de la presa)	FSDS3 (Superficie de deslizamiento a través de la cara aguas arriba de la presa)
Etapa 1 - Presa de Arranque	Estático	1,6	1,7	2,0
Presa de arranque	Estático	1,6	1,6	1,7
Presa Principal de Relaves	Estático	1,6	2,0	2,3

Así mismo en la Tabla 13, se muestran los resultados del análisis de estabilidad símica para las fallas de la zona de aguas arriba (US) considerando diferentes elevaciones de pozas.

Tabla 13

Resultados de los Análisis de Estabilidad, Talud Aguas Arriba, Condición Sísmica.

Etapa	FS Aguas Arriba Poza vacía	FS Aguas Arriba	
		Altura de Poza 40m (operación normal)	FS Aguas Arriba Pozo Lleno
Etapa 1- Presa de arranque	0,8	N/A	1,1
Presa de arranque	0,8	1,0	1,1
Presa Principal de Relaves	0,8	1,0	1,3

La Tabla 13 indica que la estabilidad del talud aguas arriba cumple con los requisitos de los criterios de diseño bajo condiciones normales de operación y de poza llena. No se cumple con los factores mínimos de seguridad (FS) si la poza está vacía. Esta situación ocurriría únicamente en condiciones especiales, por ejemplo, cuando sea necesaria una reparación importante en el sistema de revestimiento. Se considera que es casi imposible que se produzca un sismo

máximo creíble con la poza vacía, por lo tanto, los factores de seguridad obtenidos de este análisis son adecuados.

Se ha realizado un análisis de desplazamiento sísmico para la Presa Principal de Relaves de acuerdo con el procedimiento propuesto por Bray y Travararou (2007).

Para este propósito, la Presa Principal de Relaves se modeló como una presa de tierra bien compactada. Se consideraron representativas dos velocidades de onda de corte en la presa: $V_s=400$ y 600 (m/s). La presa también se modeló como si estuviera cimentada sobre roca volcánica de buena calidad.

El análisis consideró un coeficiente de rendimiento (k_{yield}) para cuatro superficies de falla. Los resultados obtenidos de estos análisis se presentan en la Tabla 14 y se han considerado aceptables.

Tabla 14
Análisis de Deformación, Presa Principal de Relaves.

Superficie de Deslizamiento	K_{yield}	V_s [m/s]	T_s [s]	$S_a(1.5T_s)$	D [cm]
DS1	0,3	400 600	0,66 0,44	0,4 0,6	2,1-4,5
DS2	0,42	400 600	0,66 0,44	0,4 0,6	0,8-2,0
DS3	0,44	400 600	0,66 0,44	0,4 0,6	0,7-1,7
US (agua en condiciones operativas)	0,2	400 600	0,66 0,44	0,4 0,6	5,5-10,8

Tabla 15
Criterios de diseño de los botaderos de relaves.

Ítem	Parámetro	Criterios	
		KP Etapa III	Golder 2011 (Criterios de Construcción)
Ubicación del botadero		1,9 km al Norte del Tajo Chailhuagón	
	Tipo de roca	Caliza / microgranodiorita	
	Comportamiento geoquímico	Se considera que el desmonte no es generador de ácido (NAG)	
Material de desmonte	Promedio como densidad seca colocada (tonelada/m ³)	1,96	1,80
	Capacidad final (millones de toneladas)	174, basada en el Plano de la Mina emitido en setiembre de 2009	
Capacidad del botadero	Volumen de los desmontes (Millón m ³ como volumen colocado)	88,8	96,7
	Limitaciones de la base	-	Lado Norte de la base limitado por la base de la cinta transportadora.
		-	Pie con restricciones cerca del camino de acarreo al Este
Criterio de aceptación del análisis de estabilidad del talud	FdS Mínimo (Estático)	1,3	1,3
	Análisis pseudoestático, FdS mínimo y/o deformación máxima permisible	Deformaciones previstas menores a 0,25 m	1,0 O Deformaciones horizontales previstas menores a 0,5 m después del sismo
Sismo de diseño	Intervalo de recurrencia	1 en 2500 años	
	Aceleración máxima del terreno (PGA)	0,3 g	
	Coefficiente sísmico para el análisis pseudoestático	Kh = ½ pga	
Bermas periféricas		-	Requerido para detener el deslizamiento de roca
Recuperación total del talud (topografía final)		2,5:1 (H:V) supuesto, requerido para la rehabilitación (21,8°)	2,2:1 (H:V) supuesto, requerido para la rehabilitación(24,4°)
Preparación de la cimentación	Superficie de rasante irregular	Todo el suelo orgánico deberá ser removido y apilado, el material inadecuado deberá ser removido donde sea necesario para proporcionar una cimentación adecuada para la estabilidad.	
Manejo de agua	Sistema de subdrenaje	Para drenar la base del botadero e interceptar las filtraciones y manantiales naturales.	
	Inclinación mínima para el sistema de subdrenaje	1%	

Ítem	Parámetro	Criterios	
		KP Etapa III	Golder 2011 (Criterios de Construcción)
	Requerimientos para el revestimiento de la cimentación		Sin revestimiento
	Canales de desviación temporal	Evento de 24 horas en 25 años con borde libre de 0,3 m	
	Inclinación mínima de los canales de desviación temporales	1%	0,5% Si está en suelo natural puede tener una planicidad de hasta 0,3%
	Sistema de colección de agua de contacto	-	Evento de 24 horas en 25 años con borde libre de 0,3 m
	Control de filtraciones	Salidas desde subdrenajes dirigidas hacia la Poza de Sedimentación Chirimayo	
	Control de sedimento	Sistema de colección de agua de contacto y Buenas Prácticas hacia la Poza de Sedimentación Chirimayo	

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.2 Conclusiones

- El diseño de la poza de sedimentación de relaves se tiene que la altura total del depósito será de aproximadamente 220 m (desde el pie hasta la cresta) y la parte superior del depósito se ubicará a una elevación de 4 050 msnm. El talud total final de los lados del depósito será de 2,5:1 (H: V) (24,4°) (según se requiera para la rehabilitación). La inclinación mínima de la superficie superior será 1% aproximadamente para potenciar el drenaje de agua superficial.
- Los relaves mineros deben tener las siguientes características: un nivel de pH en torno a 7,0, bajos niveles de sulfatos (<50 mg/l), concentraciones de arsénico en el rango de 0,01 - 0,02 mg/l, concentraciones de cobre de 0,01 - 0,02 mg/l, niveles de la mayoría de los demás solutos análogos a aquellos encontrados en el sistema de agua subterránea natural.
- Las muestras de los relaves de Chailhuagón indicaron valores más altos de ANP y valores más bajos de AGP que Perol. El carbón total varía de 0.27 a 0.57%, y el ANP de 0.84 - 1.7 % CO₂. Las concentraciones totales de azufre varían de 0.02 a 0.58%. A todas las muestras de Chailhuagón con excepción de MCS-4 (Potásico) que fue clasificada como ligeramente acida (SA) se les asignó valores de NCV de ligeramente básico (SB) a básico (B).

REFERENCIAS

- Almerco, D. (2014). Construcción de Dique con Tratamiento del Relave, en Mina Catalina Huanca – Región Ayacucho. (Tesis de pregrado). Ayacucho, Perú: Universidad San Martín de Porreas. Obtenido de <http://www.repositorioacademico.usmp.edu.pe>
- Álvarez, M. (2017). Sostenibilidad de tratamientos de residuos mineros asociada al riesgo. (Tesis de maestría). Oviedo, España: Universidad de Oviedo. Obtenido de <http://digibuo.uniovi.es>
- Anaya, R. (2016). Estudio de la Influencia del Espesador de Cono Profundo, para la Recuperación de Agua en la Compañía Minera Volcan S.A. (Tesis de Pregrado). Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe>
- Andia, B. (2015). Recuperación de Oro a Partir de Lodos de Relave Cianurados, Utilizando la Resina Estireno Divinilbenceno. (tesis de pregrado). Arequipa, Perú: Universidad Nacional San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle>
- Azorin, R. (2014). Análisis de Estabilidad de Taludes mediante técnicas de modelación numérica en 3D utilizando Plaxis 3D Foundation. *Trabajo de diploma*. Villa Clara, Cuba: Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Obtenido de <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2544/Tesis.%20Reinier>.
- Calderón, F. (2016). Control de Inestabilidad de Taludes del Desmonte del Tajo La Quinua Oeste – Minera Yanacocha, 2016. *Tesis profesional*. Cajamarca, Perú: Universidad César Vallejo. Obtenido de <http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream>.
- Calvo, D., Casado, J., Zamora, G., & Alfonso, P. (2017). Estudio para el Tratamiento de las Aguas Ácidas por Neutralización Precipitación en Interior de la Mina Santa Fé,

- Bolivia. (Estudio de Investigación). Oruro, Bolivia: Universidad Técnica de Oruro.
Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/20956/C15%](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/20956/C15%20)
- Delgado, J. (2017). Experiencia piloto en la remediación y mitigación de sulfuros y la generación de AMD en el relaveras del distrito minero de Zaruma-Potovelo. (Artículo científico). Quito, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/>
- Díaz, S. (2014). “Eficiencia de las Estructuras Construidas para Mejorar la Calidad del Agua en el Cierre de Actividades en la Mina Banco Minero y Tahona- Hualgayoc - Cajamarca. (Tesis de pregrado). Hualgayoc, Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca. Obtenido de <http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC>
- Gallo, I. (2014). Estudio de la Relavera en Minera Yanacocha Oeste. (tesis de pregrado). Lima, Perú: Universidad Nacional del Callao. Obtenido de <https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri>
- Herrera, A., & Heredia, E. (2017). Determinación de los niveles de concentración de metales pesados en la Cuenca Mashcón – Cajamarca en los meses de Setiembre y Diciembre, 2016. Tesis para optar el título de ingeniero ambiental. Chiclayo, Lambayeque: Universidad de Lambayeque. Obtenido de <http://repositorio.udl.edu.pe>
- Hurtado, J., & Berastain, A. (2014). Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración. (artículo científico). Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v19n2/a10v19n2.pdf>
- Izquierdo, J., & Verástegui, S. (2016). Concentración de Metales Pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) en el Agua de la Cuenca Baja del Río Jequetepeque, en Relación a los Estándares de Calidad del Agua - Categoría 3, Cajamarca - 2016. Tesis para optar el título de

- ingeniero ambiental. Cajamarca, Perú: Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo. Obtenido de <http://repositorio.upagu.edu.pe>
- Luna, R. (2016). Determinación de las concentraciones de cadmio y plomo en papa (*Solanum tuberosum*) cosechada en las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta – Cajamarca. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream>
- Mancebo, J. (2014). Tratamiento de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería. (Tesis de Maestría). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/44286/1/INVE_MEM_2014_238768.pdf
- Mendvisky, R., & Caroca. (2015). Informe sobre la situación de los Relaves Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile. (informe técnico). Santiago, Chile: Fundacion Relaves Chile. Obtenido de <https://tbinternet.ohchr.org/Treaties>
- Ocas, S., & Escobar, A. (2016). Electrorremediación en Función de la Densidad de Corriente y la Concentración de Ácido Acético, como Alternativa para la Disminución de Plomo en Relaves Mineros - Mina Paredones, Cajamarca, 2016. (tesis de pregrado). Cajamarca, Perú: Universidad Privada del Norte. Obtenido de <http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10682>
- Ortíz, W. (2016). Diseño de Botaderos de Desmonte en Open Pit Usando Minesight 7.0 E.E. Piramide Cis Cuajone. *Tesis profesional*. Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA.pdf>
- Paucar, G. (2015). Diseño y Estabilidad de Botaderos de Desmonte para la Remediación de Pasivos Ambientales de la Mina Recuperada· Huancavelica. *Tesis profesional*.

Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de
http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/402/TCIV_12.pdf?

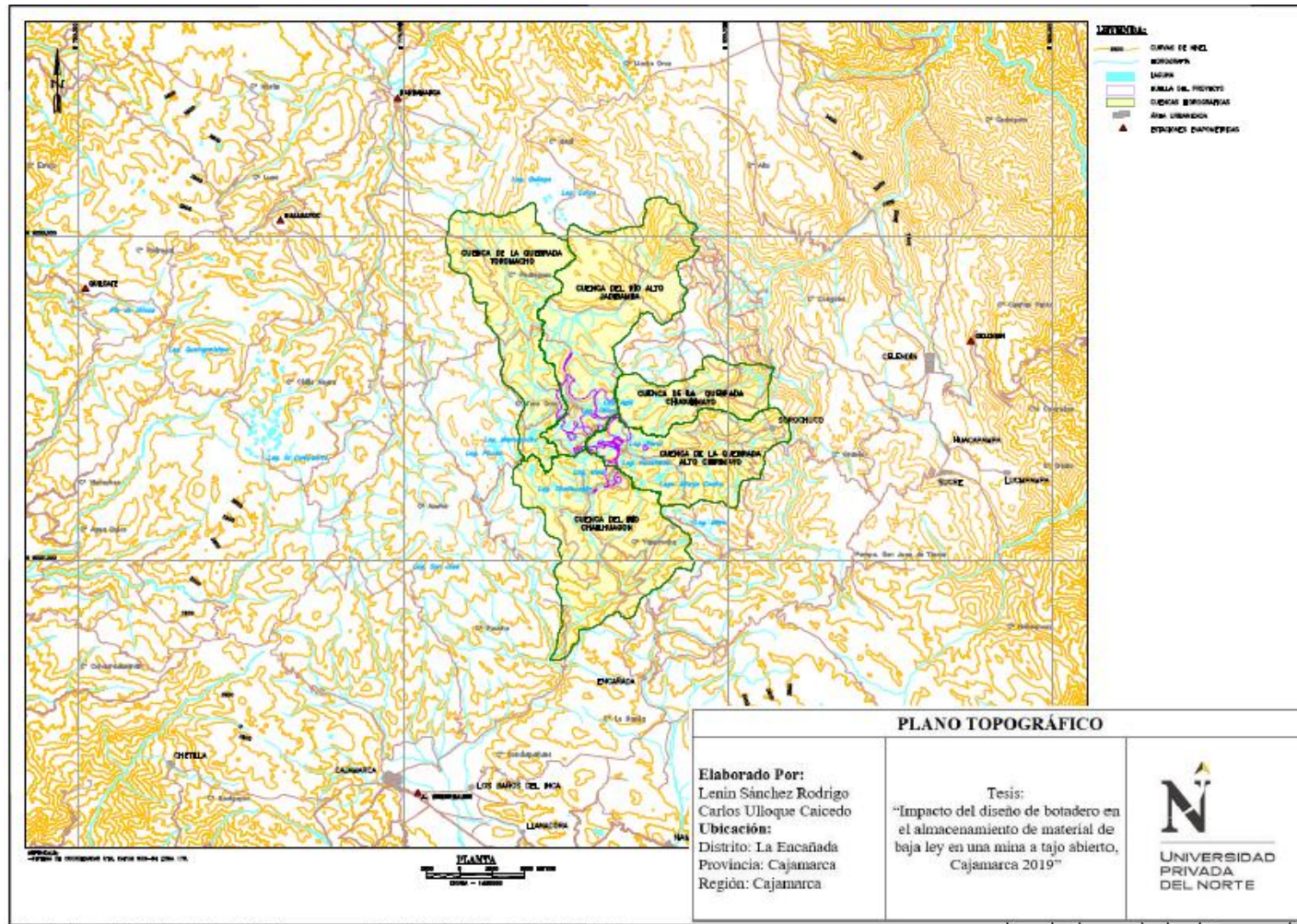
Seijas, T. (2017). Propuesta de Diseño de Taludes Operativos y Talud Final del Botadero Noreste de la Mina Paso Diablo, Carbones del Zulia S.A, Estado Zulia. *Trabajo especial de grado*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Obtenido de saber.ucv.ve/handle/123456789/1585

Valdivieso, J. (2017). Selección, Análisis y Diseño Técnico de la Escombrera para la Concesión Minera “Selva Alegre” Ubicada en la Provincia de Imbabura, Cantón Otavalo Parroquia Selva Alegre. *Proyecto Integrador*. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. Obtenido de www.dspace.uce.edu.ec/bitstream.

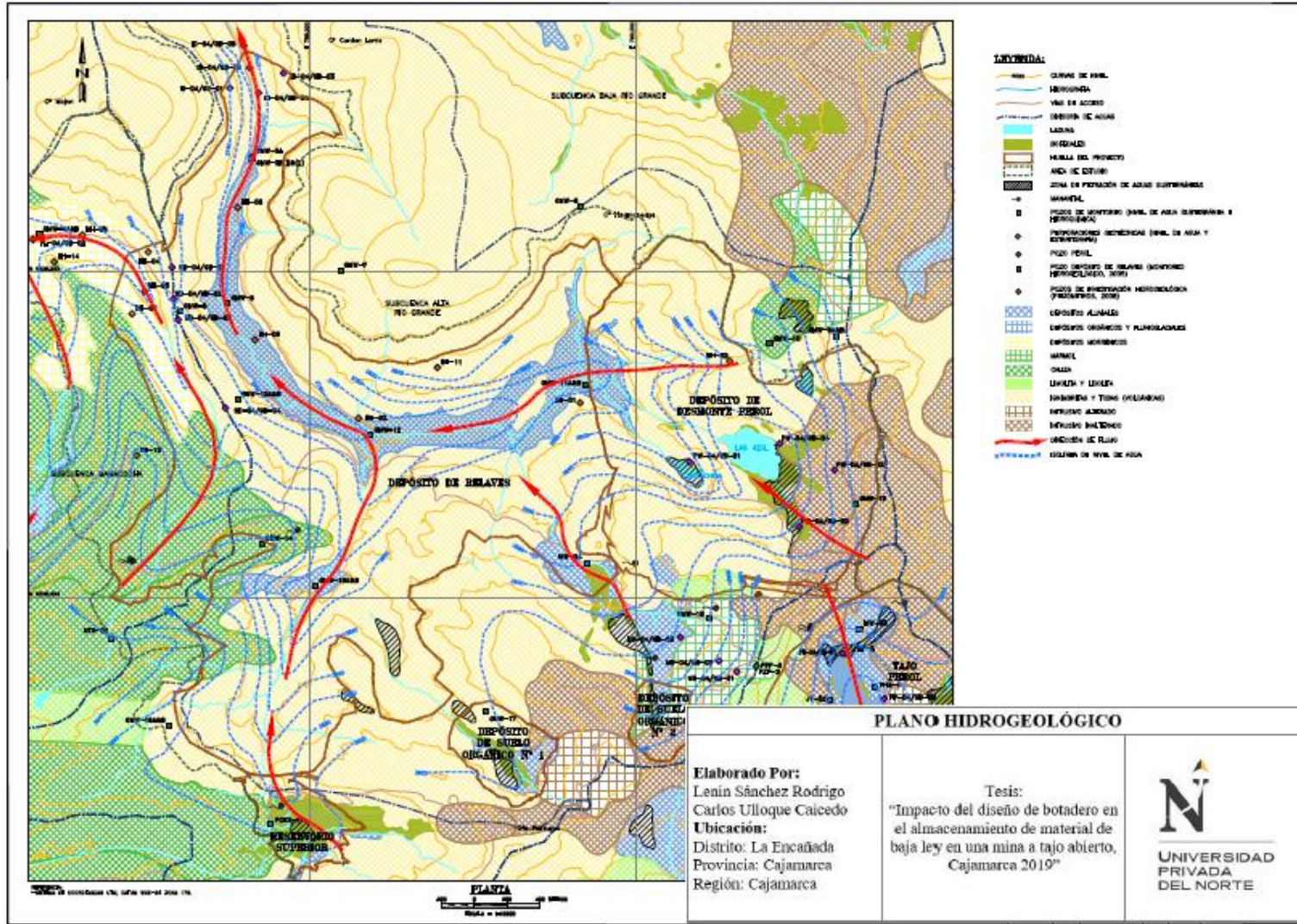
Villanueva, M., Lino, E., & Huaña, O. (2016). Caracterización Geotécnica y Diseño de Botaderos en Mina. *Estudio preliminar*. Lima, Perú: SRK Consulting (Peru) S.A. Obtenido de <https://www.latam.srk.com/sites/default/files/file/MVillanueva>.

ANEXOS

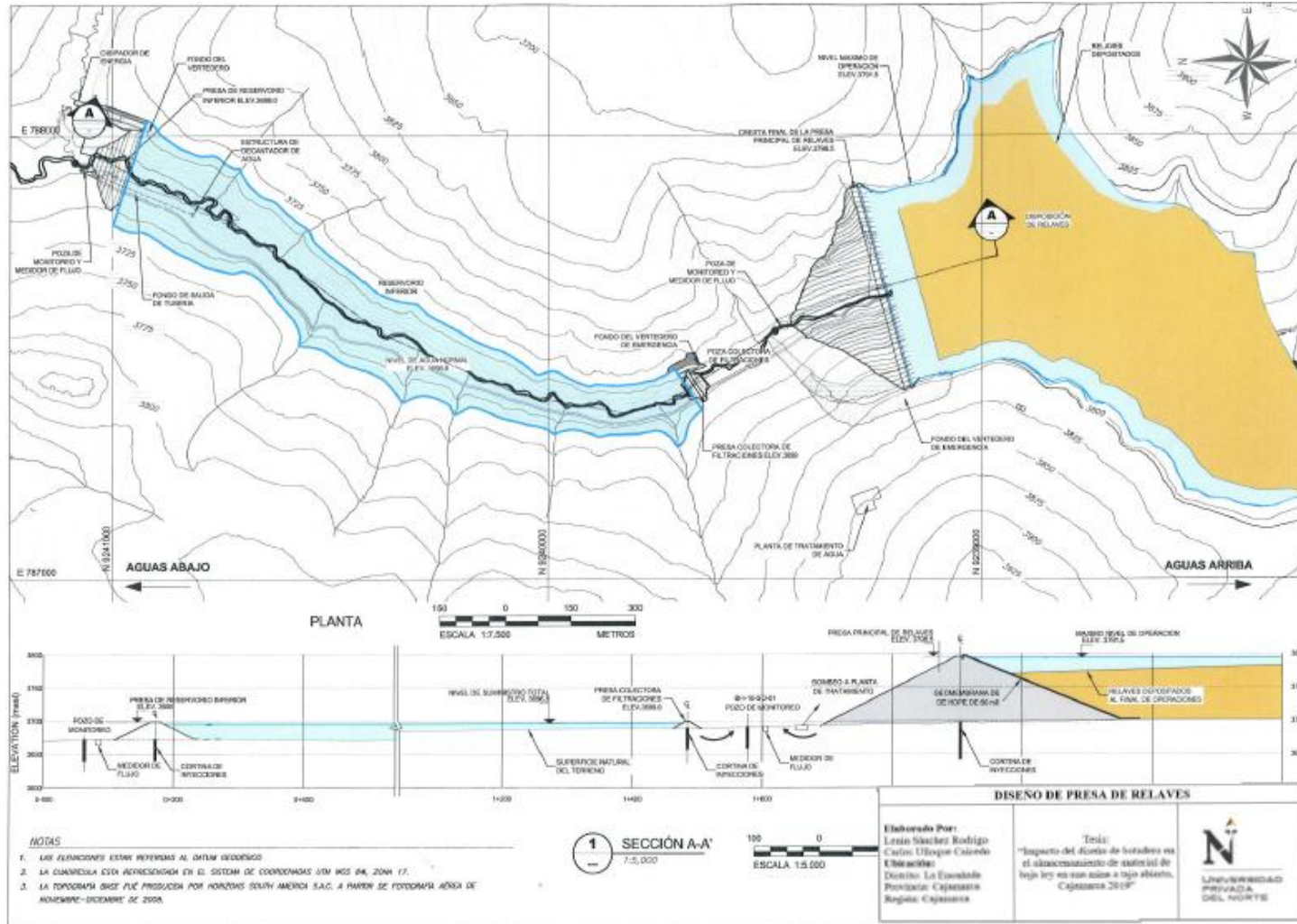
Anexo n°1. Plano topográfico



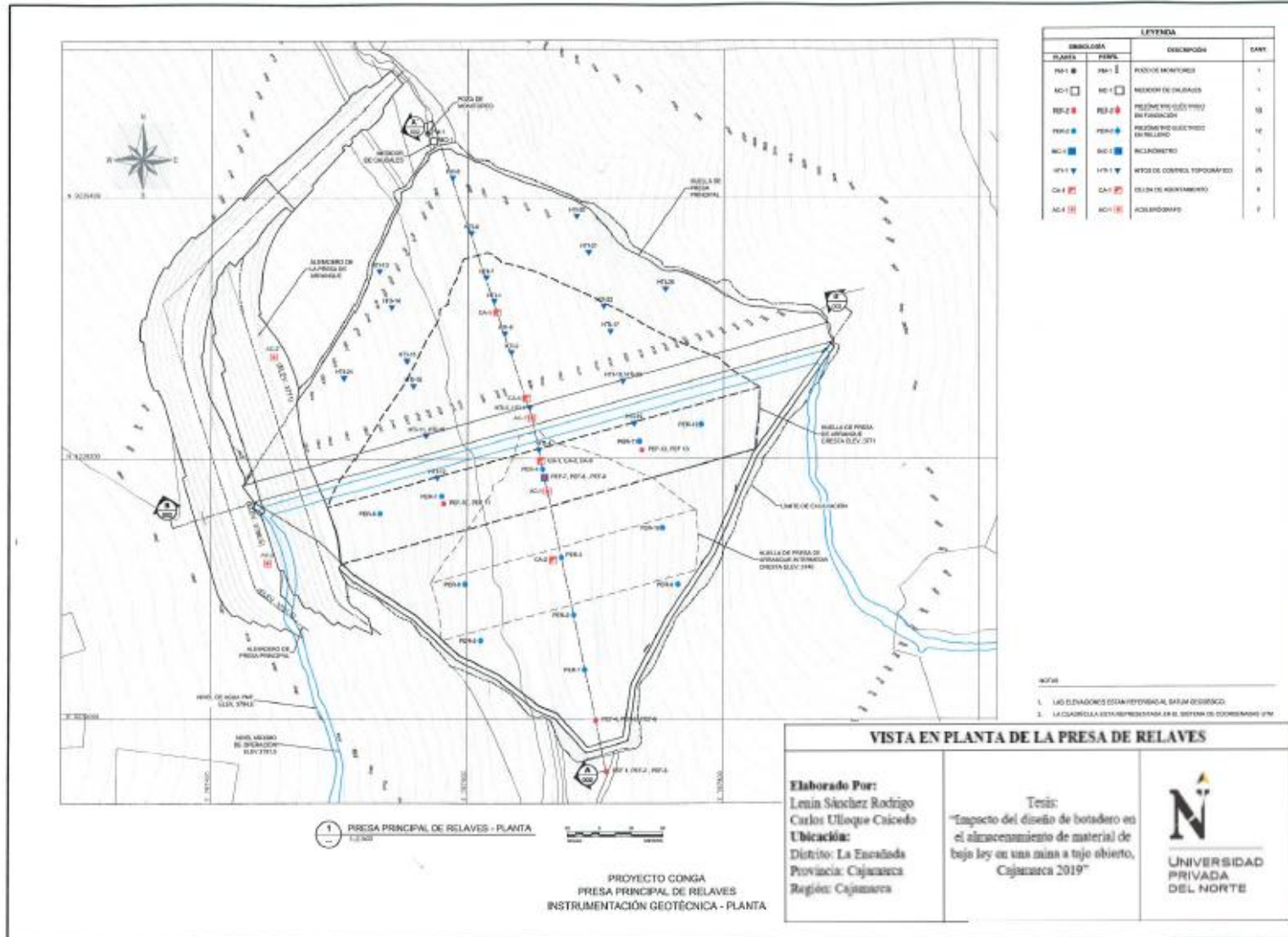
Anexo n°2. Plano hidrogeológico



Anexo n°3. Diseño de presa de relaves



Anexo n°4. Vista en planta de la presa de relaves



Anexo n°5. Perfil longitudinal de la presa de relaves

