

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**PROCEDIMIENTO PARA PREDECIR LA UBICACIÓN DE  
LAGUNA EN DEPÓSITO DE RELAVES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**FRANK RENZO RUIZ VEGA**

**Lima- Perú**

**2015**

	N° Pág.
<b>RESUMEN.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE CUADROS .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I : MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
1.1    OBJETIVOS DE UN DEPÓSITO DE RELAVES.....	12
1.2    OPCIONES PARA LA DESCARGA DE LOS RELAVES .....	12
1.2.1    Opción A: Descarga del relave completo .....	12
1.2.1.1    Embalses de relaves.....	13
1.2.2    Opción B: Construcción de muro resistente con parte del relave .....	14
1.2.2.1    Construcción de muro método aguas arriba .....	14
1.2.2.2    Construcción de muro método aguas abajo .....	15
1.2.2.3    Construcción de muro método eje central o mixto.....	16
1.2.3    Opción C: Material de relaves equivalente a un suelo húmedo .....	17
1.2.4    Depósitos de Relaves Espesados.....	17
1.2.5    Depósitos de Relaves Filtrados.....	19
1.2.6    Depósitos de Relaves en Pasta .....	20
1.2.7    Parámetros Adicionales de los Relaves .....	22
1.2.7.1    Efectos de la razón sólido/agua (S:A) .....	22
1.2.7.2    Densidad seca .....	22
<b>CAPÍTULO II : CRITERIOS DE DISEÑO.....</b>	<b>24</b>
2.1    CASO I: DEPOSITACIÓN EN TAJO .....	24
2.1.1    Descripción General del Caso I: Depositación en Tajo "A" .....	27
2.1.2    Depósito de Relaves Tajo "A".....	27
2.1.3    Sistema de Revestimiento, Tajo "A" .....	28
2.1.3.1    Geotextil de alta resistencia PP-PET (500 g/m <sup>2</sup> ), Tajo "A" .....	29
2.1.3.2    Revestimiento geosintético de arcilla (GCL).....	29
2.1.3.3    Geomembrana de LLDPE SST de 1,5 mm.....	29
2.1.4    Diseño de Obras Hidráulicas a Gravedad .....	30
2.1.4.1    Tubería para descarga de relaves.....	30
2.1.4.2    Estructura disipadora .....	31
2.1.4.3    Aliviadero de emergencia.....	32

2.1.5	Consideraciones de Cierre .....	33
2.1.6	Criterios para la Estabilidad Física .....	33
2.1.7	Criterios para la Estabilidad Química .....	34
2.1.8	Criterios para la Estabilidad Hidrológica .....	34
2.1.9	Criterios para la Instalación de Coberturas .....	35
2.2	CASO II: DEPOSITACIÓN EN VALLE .....	35
2.2.1	Sistema de Subdrenaje .....	37
2.2.2	Poza de Monitoreo .....	38
2.2.3	Crecimiento del Dique hasta la Cota 4092 msnm .....	38
2.2.4	Método de Disposición de Relaves .....	39
2.2.5	Cierre de Galerías de Túnel Existente .....	40
2.2.6	Diseño Hidráulico .....	41
2.2.7	Diseño de Obras Hidráulicas .....	41
2.2.7.1	<i>Estructuras de Captación</i> .....	41
2.2.7.2	<i>Estructuras de Derivación</i> .....	42
2.2.7.3	<i>Estructuras de Emergencia</i> .....	42
2.2.7.3.1	<i>Descripción de las estructuras de emergencia</i> .....	42
2.2.8	Balance de Aguas .....	43
2.2.8.1	<i>Descripción del modelo de balance de aguas</i> .....	44
2.2.8.2	<i>Parámetros y criterios de simulación</i> .....	44
2.2.8.3	<i>Periodo de simulación</i> .....	45
2.2.8.4	<i>Plan de construcción del depósito de relaves</i> .....	46
2.2.8.5	<i>Características de los Relaves</i> .....	46
2.2.8.6	<i>Plan de Producción de Relaves</i> .....	46
2.2.8.7	<i>Configuración del Depósito de Relaves</i> .....	46
2.2.8.8	<i>Resultados del Balance de Aguas</i> .....	47
2.2.8.9	<i>Flujos de Bombeo Disponible</i> .....	47
2.2.8.10	<i>Niveles de Agua de Operación</i> .....	48
<b>CAPÍTULO III : PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....</b>		<b>49</b>
3.1	CONSIDERACIONES GENERALES .....	49
3.2	PROCEDIMIENTO BÁSICO EN EL SOFTWARE TMS .....	49
3.3	CASO 1: DISPOSICIÓN DE RELAVES EN TAJO .....	56
3.4	CASO 2: DISPOSICIÓN DE RELAVES EN VALLE .....	62
<b>CAPÍTULO IV : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>64</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	64

5.2	RECOMENDACIONES .....	65
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>67</b>

## RESUMEN

El presente Informe de Suficiencia es resultado de la experiencia obtenida en el diseño de la disposición de depósitos de relave a diferentes niveles de ingeniería, que ha permitido agrupar consideraciones básicas que permitirán optimizar futuros diseños.

El problema encontrado ha sido la falta de seguimiento de algunas mineras a los planes de depositación (estrategia), dichos planes están relacionados con la ubicación de lagunas dentro de los depósitos. Cada depósito de relave tiene consideraciones y necesidades particulares por lo que no existe una regla general, a pesar de ello pueden mencionarse algunas consideraciones para los diseños y estrategias de estos componentes.

Para establecer la disposición de relaves y elegir una estrategia de llenado se debe evaluar distintos factores tales como: pendiente sub-aérea, pendiente sub-acuática, producción de relaves, números de puntos de descarga, entre otros. Estos factores son abordados en el presente documento el cual brindará pautas generales para una correcta disposición de relaves.

Finalmente se han abordado dos casos prácticos de disposición de relaves, en escenarios y topografías distintas tales como la disposición de relaves en valle y en tajos, siendo esos dos casos los más empleados en el sector minero. Este documento pretende contribuir para la elaboración de diseños de depósitos de relaves, brindando criterios básicos para una correcta estrategia de llenado.

## LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1.- Fuentes de criterios de Diseño – Caso 1 .....	24
Cuadro N° 2.- Criterios de Diseño Civil – Caso 1 .....	24
Cuadro N° 3.- Parámetros Hidráulicos en las Tuberías por Cada Tramo .....	31
Cuadro N° 4.- Determinación de las Longitudes para cada Caja Disipadora.....	32
Cuadro N° 5.- Dimensionamiento de Aliviadero de Emergencia .....	33
Cuadro N° 6.- Fuentes de criterios de Diseño Civil – Caso II .....	36
Cuadro N° 7.- Criterios de Diseño Civil – Caso 2 .....	36
Cuadro N° 8.- Características del Crecimiento del Dique.....	39
Cuadro N° 9.- Volúmenes de Relaves y Agua de Decantación .....	40
Cuadro N° 10.- Fuentes de criterios de Diseño – Balance de Aguas Caso 2 .....	45
Cuadro N° 11.- Criterios de Diseño– Balance de Aguas Caso 2 .....	45
Cuadro N° 12.- Flujos de Bombeo Disponible – Balance de Aguas Caso 2 .....	47
Cuadro N° 13.- Cálculo del Sistema de Bombeo de la Laguna .....	48

## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.- Descarga de relaves por hidrociclón .....	11
Figura N° 2.- Depositación de relaves en tajo. ....	12
Figura N° 3.- Muro construido con material de empréstito.....	13
Figura N° 4.- Método Aguas Arriba. ....	15
Figura N° 5.- Método Aguas Abajo.....	16
Figura N° 6.- Método Eje Central. ....	17
Figura N° 7.- Disposición de Relaves Espesados, Método Robinsky.....	19
Figura N° 8.- Depósito de Relaves Filtrado .....	20
Figura N° 9.- Depósito de Relaves en Pasta - Collahuasi .....	22
Figura N° 10.- Creación del archivo DAT .....	49
Figura N° 11.- Creación de la malla GRID .....	50
Figura N° 12.- Topografía en Curvas de Nivel.....	51
Figura N° 13.- Puntos Probables de la ubicación de las barcazas o torretas .....	51
Figura N° 14.- Creación de un punto de descarga (spigot).....	52
Figura N° 15.- Se define un punto de descarga (Zona Sur).....	52
Figura N° 16.- Se define un nuevo punto de descarga.....	53
Figura N° 17.- Se define el dominio, límites de la simulación .....	53
Figura N° 18.- Se define el contorno del dominio .....	53
Figura N° 19.- Se establece el dominio.....	54
Figura N° 20.- Definición de los parámetros del relave .....	54
Figura N° 21.- Definición de los parámetros del relave .....	54
Figura N° 22.- Cálculo de la Curva de Llenado .....	55
Figura N° 23.- Modelamiento de la estrategia (plan) de llenado del depósito .....	55
Figura N° 24.- Modelamiento de la estrategia, parámetros .....	56
Figura N° 25.- Simulación según los parámetros planteados .....	56
Figura N° 26.- Depositación Año 1, Tajo A.....	57
Figura N° 27.- Depositación Año 2, Tajo A.....	58
Figura N° 28.- Depositación Año 3, Tajo A.....	59
Figura N° 29.- Depositación Año 4, Tajo A.....	60
Figura N° 30.- Depositación Año 5, Tajo A.....	61
Figura N° 31.- Depositación Etapa 1.....	62
Figura N° 32.- Depositación Etapa 10.....	63
Figura N° 33.- Etapas del dique .....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

$\alpha$	: Angulo de depositación de relaves
$\gamma_d$	: Densidad seca
x	: abscisa, coordenada horizontal.
y	: ordenada, coordenada vertical.
z	: coordenada perpendicular al plano formado por XY.
Ksi	: Equivalente a 1000 Psi
Kg	: Kilogramo, unidad de masa.
t	: Tonelada, unidad de masa.
ha	: hectáreas, referido a la magnitud de área, según el S.I.
m	: Metro, referido a la magnitud de longitud, según el S.I.
m <sup>2</sup>	: Metro cuadrado, referido a la magnitud de área, según el S.I.
m <sup>3</sup> /s	: Metro cúbico, referido a la magnitud de caudal, según el S.I.
mm	: Milímetro, la milésima parte del metro, según el S.I.
m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar
Psi	: Pounds per square inch, Unidad de presión. Libra/pulgada <sup>2</sup>
Rpm	: Revoluciones por minuto
S.I.	: Sistema Internacional de unidades.
PLS	: Pregnant Leach Solution, Poza de Solución rica
ILS	: Intermediate Leach Solution, Poza Intermedia de Solución
TMS	: Tailings Management System
CDA	: Canadian Dam Association

## INTRODUCCIÓN

Presento a consideración de los miembros del jurado el Informe de Suficiencia titulado: "Procedimiento para Predecir la Ubicación de Laguna en Depósitos de Relaves". El programa seguido obedece a los Términos de Referencia mencionados en el documento "Instrucciones Editoriales para el Informe de Suficiencia" otorgado por la Dirección de Escuela Profesional. Así mismo obedece también a la necesidad de contar con bibliografía que brinde criterios para el diseño de disposición de relaves.

Los depósitos de relaves son estructuras donde se disponen los residuos procedentes del proceso de extracción del mineral aprovechable por la mina. Los relaves están compuesto por material molido y agua con reactivos. Por lo general entre los componentes de un depósito de relaves se pueden identificar los siguientes: el dique de retención, la playa del depósito y la laguna del depósito.

El dique de retención permitirá contener los residuos dentro del depósito. Los sólidos contenidos dentro del depósito se sedimentan por lo que observa dos zonas marcadas: la playa del depósito, que corresponde a la zona cercana a la descarga de relaves y la laguna del depósito, producto de la consolidación de los sólidos y que por defecto se ubica en la zona opuesta a la descarga de relaves.

En los últimos años el precio de los minerales se ha incrementado de manera sostenible, motivo por el cual, la industria de extracción minera ha tomado un rol protagónico en nuestra economía, debido a esto las estructuras mineras y sus ampliaciones han ido en aumento, tal es el caso de las pilas de lixiviación, depósitos de desmonte, depósitos de relaves, pozas PLS y pozas ILS, entre otras. El sector minero a lo largo de la historia y en la actualidad ha tenido siempre un papel relevante en nuestra economía, sin embargo fueron descuidados los aspectos ambientales y sociales, siendo estos últimos de vital importancia para la viabilidad de muchos proyectos. Por ello se cree conveniente que la ubicación de cada estructura minera debe ser concebida apropiadamente, de modo tal que el impacto social y ambiental sea el menor posible. En el caso concreto de los depósitos de relaves parte de este manejo ambiental ha sido plasmado en "La guía ambiental para el manejo de depósitos de relaves".

En caso de producirse una falla en un depósito de relaves, podría producirse daños ambientales y sociales inmensurables. A pesar que posiblemente los perjuicios ambientales fuesen remediados, el aspecto social podría generar problemas y/o conflictos muy graves en el futuro. Las fallas en los depósitos de relaves pueden producirse por muchas variables, una de estas es el manejo durante la operación, y precisamente este documento proporciona un aporte para la estrategia de llenado del depósito y la respectiva ubicación de la laguna.

Actualmente se dispone de una gama de conocimientos y programas de cómputo que permiten predecir de forma precisa la disposición de los relaves y de manera consecuente la ubicación de sus lagunas, siendo esta una parte importante dentro de la estrategia de llenado. En los últimos años se está evaluando la disposición de relaves filtrados los cuales involucran una disposición totalmente diferente a los convencionales, ya que en la disposición de relaves filtrados la recuperación de agua es mucho mayor y esto desde un punto de vista ambiental es positivo. Sin embargo, hasta que la práctica de disposición de relave filtrado se convierta en un estándar en la industria, la disposición de relaves convencionales requiere tener un plan de depositación más precisa. En el presente documento se busca plantear planes de disposición tomando como punto de referencia la ubicación de la laguna.

Como objetivo principal, es describir la disposición de relaves a través de dos ejemplos cuya aplicación es muy usual en la industria minera, y a la vez establecer criterios que permitan proponer estrategias de llenado en los depósitos y de manera consecuente establecer la ubicación de la laguna, para dicho fin se ha utilizado el programa Tailings Management System (TMS) desarrollado por Codice Ingeniería - Chile, sin embargo, las consideraciones vertidas en el presente documento no se limitan al uso exclusivo de este programa.

- En el Capítulo I, se presenta en líneas generales los conceptos básicos sobre relaves, los tipos de depositación, tipos de relaves, características de los relaves y otros.
- En el Capítulo II, se mencionan los criterios de diseño, los cuales consisten en parámetros relacionados a la producción y características de los relaves, tiempo de vida de la mina, así como las asunciones referidas a las pendientes

de disposición, entre otros. Los parámetros indicados en este capítulo servirán para desarrollar los casos mencionados en el capítulo IV, así mismo se describe brevemente el balance de aguas.

- En el Capítulo III, se presenta dos diferentes casos con la finalidad de estudiar algunas consideraciones para definir planes de depositación. Además se describen la metodología del trabajo, así como los procedimientos para realizar una simulación de depositación de relaves con el programa informático TMS.
- En el Capítulo IV, se mencionan las conclusiones y recomendaciones que se desprenden del presente informe, para que pueda ser considerado en futuros diseños de depósito de relaves.

Adicionalmente se presentan los anexos que han servido de complemento para la elaboración del presente informe.

## CAPÍTULO I : MARCO TEÓRICO

Toda planta minera cuyo proceso de concentración sea flotación, produce residuos sólidos que se denominan relaves y que corresponden a una "suspensión fina de sólidos en líquido", constituidos fundamentalmente por el mismo material presente in-situ en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, conformando una pulpa que se desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerá de la razón agua/sólidos y también de las características de las partículas sólidas. Esto puede ilustrarse si se consideran los siguientes ejemplos:

- Una masa de relaves con un gran contenido de agua escurrirá fácilmente, incluso con pendientes pequeñas.
- Una masa de relaves con un contenido bajo de agua (por ejemplo, relaves filtrados) no escurrirá gravitacionalmente.
- Si las partículas sólidas son de muy pequeño tamaño (equivalentes a arcillas), se demorarán un gran tiempo en sedimentar, manteniéndose en suspensión y alcanzando grandes distancias respecto al punto de descarga antes de sedimentar.
- Si las partículas sólidas son de gran tamaño (equivalentes a arenas) sedimentarán rápidamente y se acumularán a corta distancia del punto de descarga.



Figura N° 1.- Descarga de relaves por hidrociclón

Fuente: Elaboración propia.

Por esto, para la descarga de relaves completos, resulta técnica y ambientalmente más aceptable construir un muro perimetral con talud interno impermeabilizado, hecho con material grueso de empréstito y generar así capacidad de depositación. Este tipo de depósito de relaves se denomina “Embalses de Relaves” y han sido aceptados como alternativa de depositación en nuestro país, a continuación se describe esta alternativa.

#### 1.2.1.1 Embalses de relaves

Este tipo de depósito de relaves consiste en construir un muro resistente hecho totalmente de material de empréstito, compactando e impermeabilizando el talud interior del muro y también parte o todo su coronamiento (ver Figura 3); los relaves se depositan completos en el embalse sin necesidad de clasificación, pero también deben disponer, de un sistema de evacuación de las aguas claras de la laguna que se forma. Los embalses de relaves no se diferencian esencialmente de las presas de embalse de aguas, las que constituyen una técnica ampliamente desarrollada en todo el mundo. Es interesante destacar, no obstante, que las técnicas de diseño evolucionan con gran rapidez y cada día se descubren nuevos métodos.

Tal vez la diferencia fundamental entre un embalse destinado a la acumulación de agua y uno destinado a relaves es que mientras el embalse para agua se construye de una vez con su capacidad definitiva, el embalse para relaves se puede ejecutar por etapas a medida que se avanza con el depósito de los relaves, a fin de no anticipar inversiones y reducir a un mínimo su valor presente. El crecimiento del embalse por etapas obliga a que la zona impermeable se conforme en todo momento en dirección al talud de la cara aguas arriba (en contacto con los relaves).

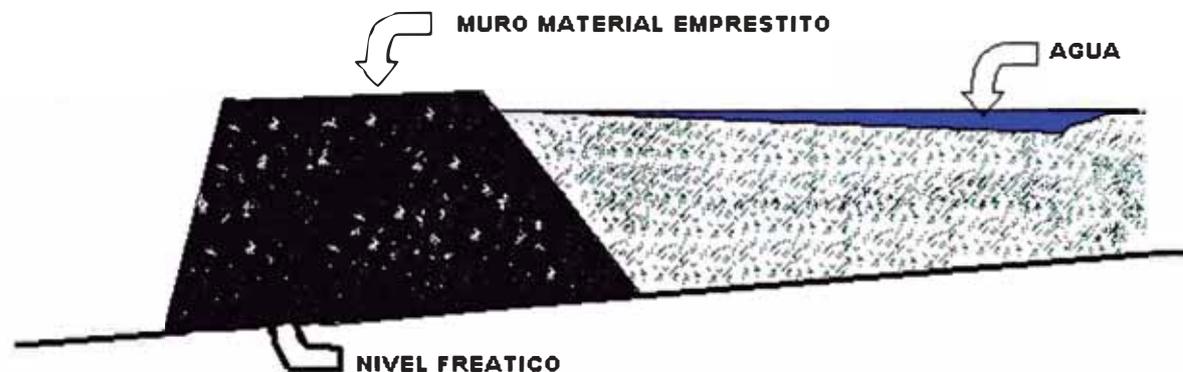


Figura N° 3.- Muro construido con material de empréstito.

Fuente: Boletín 97, International Commission on Large Dams(ICOLD) 1994

Desde el punto de vista sísmico, los embalses de relaves son más resistentes que cualquiera de los métodos indicados en la opción B (tranques de relaves).

### 1.2.2 Opción B: Construcción de muro resistente con parte del relave

Esta opción es también llamada depósito convencional o tranque de relaves, corresponde a tratar los relaves provenientes de la planta de procesos, separando la fracción gruesa (arenas de relaves) de la fracción fina (lamas), para poder utilizar la primera como material para la construcción del muro perimetral y descargar la segunda hacia el embalse. Al construir el muro utilizando las arenas de los relaves, es posible hacerlo de 3 formas o métodos de crecimiento distintas: crecimiento del muro hacia "aguas arriba", crecimiento del muro hacia "aguas abajo" y crecimiento del muro según el método llamado "eje central o mixto".

A continuación se describen brevemente las alternativas de construcción del muro resistente con parte de relaves:

#### 1.2.2.1 Construcción de muro método aguas arriba

Consiste en conformar un muro inicial (*starter dam*) construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la depositación de los relaves, utilizando clasificadores denominados "Hidrociclones". La fracción más gruesa o arena, se descarga por el flujo inferior del hidrociclón (*underflow*) y se deposita junto al muro inicial, mientras la fracción más fina o lamas, que sale por el flujo superior del hidrociclón (*overflow*) se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado del muro, de modo tal que se va formando una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas de lamas y gran parte del agua escurre, formando la laguna del depósito o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de recuperación, que pueden ser las denominadas torres de evacuación (torretas), o bien, se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante (barcazas). Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al crecimiento del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas arriba y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, manteniendo en todo momento un borde libre de operación; este proceso continúa sucesivamente hasta alcanzar la cota final establecida.

Con este método, en la práctica, se pueden alcanzar alturas de hasta 25 metros (ver Figura 4). Si bien este método es el que requiere un menor volumen de material arenoso, por lo que ha sido utilizado en la pequeña minería para construir numerosos tranques, es el que produce el tipo de muro menos resistente frente a oscilaciones sísmicas.

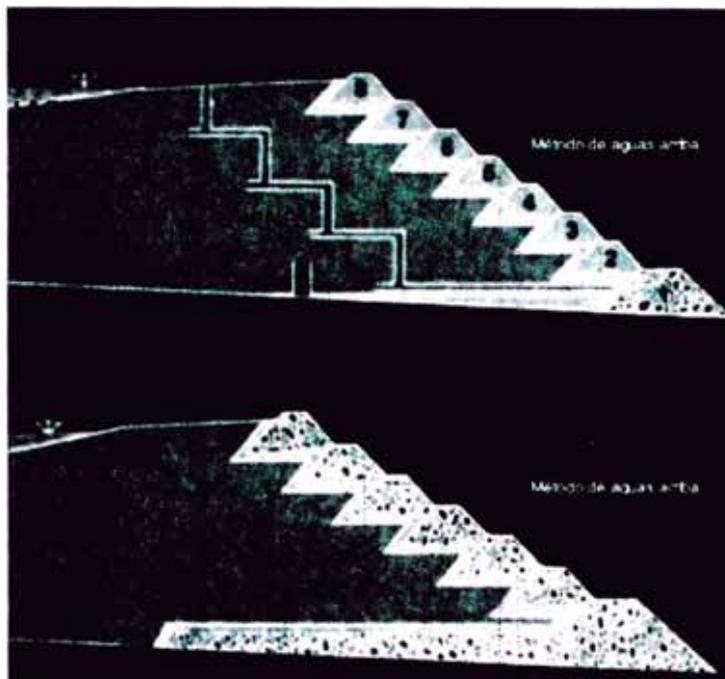


Figura N° 4.- Método Aguas Arriba.

Fuente: Boletín 97, International Commission on Large Dams(ICOLD) 1994

#### 1.2.2.2 Construcción de muro método aguas abajo

La construcción se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado desde el cual se vacía la arena cicloneada hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba. Cuando el muro ha alcanzado un borde de operación, usualmente, de 2 a 4 m., se efectúa el crecimiento del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas abajo y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas y crecimiento del muro. A veces se dispone también de un segundo muro pre-existente aguas abajo (ver Figura 5). Las arenas se pueden disponer en capas inclinadas, según el talud del muro de partida, o bien disponerlas en capas horizontales hacia aguas abajo del muro de partida.

Este método requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables desde el punto de vista de la resistencia sísmica.

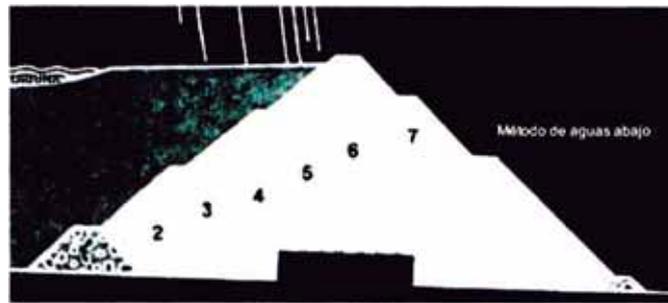


Figura N° 5.- Método Aguas Abajo.

Fuente: Boletín 97, International Commission on Large Dams(ICOLD) 1994

### 1.2.2.3 Construcción de muro método eje central o mixto

Se inicia al igual que los métodos anteriores con un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el lado de aguas abajo y las lamas hacia el lado de aguas arriba. Una vez completado el vaciado de arenas y lamas correspondiente al muro inicial, se eleva la línea de alimentación de arenas y lamas, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida. Lo que permite lograr un muro de arenas cuyo eje se mantiene en el mismo plano vertical, su talud aguas arriba es más o menos vertical, y su talud aguas abajo puede tener la inclinación que el diseño considere adecuado.

Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los dos métodos anteriores, y permite lograr muros suficientemente estables.

La inseguridad que muchas veces despiertan los tranques de arenas de relave no deben atribuirse al material con que se construyen, sino al sistema de construcción del muro, ya que este puede llegar a tener un alto contenido de humedad que puede inducir elevadas presiones de poros e incluso la licuefacción total en caso de un sismo. Sin embargo, las técnicas modernas de diseño, construcción y control permiten obtener estructuras seguras a base de buenos sistemas de drenaje, de un eficiente sistema de cicloneo y disposición de las arenas, y también de una buena compactación de la arena que permita alcanzar una elevada densidad, utilizando un equipo adecuado para ello. Lo anterior, complementado con un control piezométrico en el cuerpo del muro, deja al tranque de arenas de relave en condiciones de estabilidad semejante al de otras obras de ingeniería de importancia.

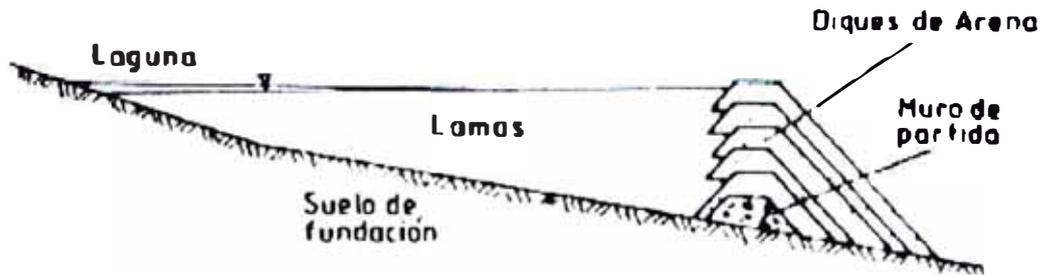


Figura N° 6.- Método Eje Central.

Fuente: Boletín 97, International Commission on Large Dams(ICOLD) 1994

### 1.2.3 Opción C: Material de relaves equivalente a un suelo húmedo

Esta opción requiere tratar los relaves provenientes de la planta de procesos, de manera de extraerle la mayor cantidad de agua, obteniendo así un material equivalente a un suelo húmedo el cual puede ser depositado sin necesidad de un muro perimetral para su contención. Para este propósito existen distintos métodos: "Espesar los Relaves", "Filtrar los Relaves" y la alternativa más reciente es la de crear lo que se denomina "Pasta de Relaves".

### 1.2.4 Depósitos de Relaves Espesados

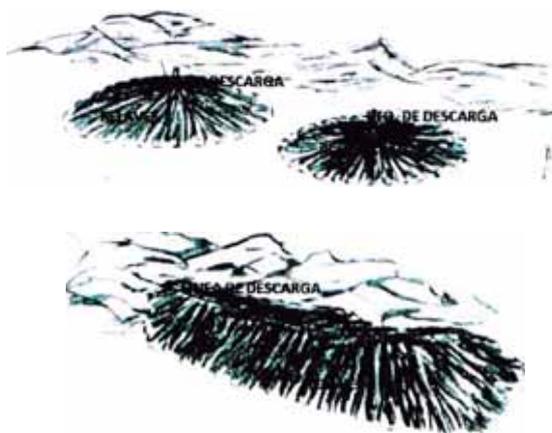
El Ingeniero canadiense Eli I. Robinsky ha desarrollado un sistema de depósito que no requiere de un dique o muro contenedor para su construcción. El procedimiento se basa en la mayor viscosidad que alcanza la pulpa de relave al aumentar la concentración de sólidos. El autor propone una curva en la que relaciona el ángulo de reposo del relave con el contenido de sólidos de la pulpa. Para concentración del orden de 53% en peso, la pendiente de reposo es del 2% y ésta aumenta hasta un 6% si la concentración sube a 65%. De esta manera pueden disponerse los relaves en forma de un cono cuya pendiente será la que corresponde a la respectiva concentración de sólidos. Si se trata, por ejemplo, de depositar relaves en un valle plano desde la ladera que limita dicho valle, se puede iniciar el depósito desde pequeña altura con una pulpa relativamente diluida para luego elevar el punto de descarga simultáneamente con un aumento de la concentración a fin de disponer para las capas siguientes de una pendiente más pronunciada. El punto de descarga puede luego ser desplazado lateralmente con el objeto de formar un depósito de base ovoidal.

No obstante que este tipo de depósito no requiere la construcción de un dique para limitar el área comprometida, se recomienda la construcción de un pequeño terraplén algo alejado del borde exterior del depósito, el cual sirve para el depósito del agua desalojada por el relave, la cual es captada por un vertedero u otro dispositivo para ser bombeada y recirculada. Este pequeño terraplén sirve a la vez para coleccionar las aguas lluvias y conducir las hacia cauces naturales.

Otro principio básico de este tipo de depósito se deriva de la diferencia en lo que a segregación del material se refiere, entre una pulpa diluida y otra concentrada.

En efecto, si la concentración de sólidos es baja, el escurrimiento de la pulpa produce una segregación de materiales, depositándose en primer lugar los granos mayores y a continuación y separadamente, los más finos. Es el fenómeno usual en el depósito de lamas en un tranque y más aún el que ocurre en los tranques construidos por el método de aguas arriba. Si por el contrario, la pulpa es concentrada (del orden del 50% o más), la pulpa escurre como un todo sin ocasionar segregación. Es el caso que ocurre con el escurrimiento de relaves por tuberías, en que es conveniente evitar la segregación mediante el uso de concentraciones del orden del 50% ya que con el uso de pulpas más diluidas, los granos gruesos se separan y ruedan por el fondo aumentando la abrasión de la tubería. Según el autor, en un escurrimiento libre ocurre el mismo fenómeno, y al evitarse la segregación se obtiene una mayor densidad que impide que el relave depositado sea erosionado por el agua desalojada por el propio relave, por las aguas lluvias o por el viento.

El procedimiento propuesto por Robinsky resulta aparentemente muy atractivo especialmente en aquellos casos en que la topografía es favorable. La relativa baja altura de los depósitos, al tener estos una pendiente máxima de aproximadamente 6%, ocupa grandes extensiones relativamente planas o de poca inclinación. Por otra parte, si las pulpas así concentradas tienen un ángulo de reposo de 6%, su escurrimiento por tubería desde el concentrador hasta el vértice del cono, implica una pérdida de carga hidráulica superior a dicho 6% en forma que una conducción, por ejemplo, a 2 Km., significaría una pérdida de energía del orden de 150 m, lo que resultaría muy costoso si el relave debe ser bombeado. No siempre es posible la instalación del espesador junto al vértice del depósito.



**Figura N° 7.- Disposición de Relaves Espesados, Método Robinsky**

Fuente: Robinsky, 1999

### 1.2.5 Depósitos de Relaves Filtrados

Este tipo de depósitos de relaves es muy similar al de los relaves espesados, con la diferencia de que el material contiene menos agua debido al proceso de filtrado utilizando equipos similares a los que se emplean para filtrar concentrados, como son los filtros de prensa o de vacío.

El relave una vez filtrado se transporta al lugar de depósito mediante cintas transportadoras o bien mediante equipos de movimiento de tierra y/o camiones. En el primer caso, se logra un domo de material similar al método de Robinsky; mientras que en el segundo caso se utiliza el equipo de movimiento de tierras para ir construyendo módulos de material compactado, los cuales permiten conformar un depósito aterrazado de gran volumen. Es importante señalar que en este método, aunque el contenido de humedad que se logra (20% a 30%) permite su manejo con equipos de movimiento de tierra, es suficientemente alto como para tener un relleno prácticamente saturado, por lo que es posible que se produzcan infiltraciones importantes de las aguas contenidas en estos relaves si el suelo de fundación es relativamente permeable. También es necesario señalar que la presencia de algunas arcillas, yeso, etc. en los materiales de relaves pueden reducir significativamente la eficiencia de filtrado.



**Figura N° 8.- Depósito de Relaves Filtrado**

Fuente: Elaboración propia, Cerro Verde-Perú.

### 1.2.6 Depósitos de Relaves en Pasta

Los relaves en pasta corresponden a una mezcla de agua con sólido, que contiene abundantes partículas finas y un bajo contenido de agua, de modo que esta mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad.

Una buena pasta de relaves requiere tener al menos un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones. La mejor propiedad de las pastas de relaves es que pueden ser eficientemente transportadas en tuberías sin los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente en las pulpas de relaves y permiten una gran flexibilidad en la elección del emplazamiento; una vez depositados los relaves, se dejan secar, luego acopiar, permitiendo así minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves.

La consistencia alcanzada permite que una pasta permanezca estable aun cuando esté varias horas sin moverse. La pasta puede formarse a partir de una gran variabilidad de componentes como cuarzo, feldespato, arcillas, micas y sales.

Es posible producir materiales con la consistencia de pasta a partir de un amplio rango de concentración de sólidos en peso y sobre la base de la variación de la distribución de tamaño de las partículas. Es decir, la producción de pasta es específica para cada tipo de material.

Cuando se dispone pasta de relaves en superficie, una muy pequeña fracción de agua podrá drenar o infiltrarse, ya que la mayor parte de la humedad es retenida en la pasta debido a la tensión superficial de la matriz de suelo fino.

Para faenas de pequeña escala, la pasta puede ser transportada en camiones desde las instalaciones de operación y descargadas en el lugar de disposición final. Una vez depositada, se deja secar y se puede acopiar. Esta forma de acumular, permite minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves, realizar un cierre progresivo y al cese de operaciones, el depósito puede ser dejado sin requerir medidas adicionales de cierre.

Para faenas de mayor tamaño, por economía de escala para el manejo de materiales, el sistema considera el uso de bombas o cintas transportadoras hasta un repartidor que realiza la disposición final. Cabe destacar que debido a su alta densidad, las pastas son transportadas mediante el uso de bombas de desplazamiento positivo, ya que este tipo de bombas soportan presiones extremadamente altas.

- En los depósitos de relaves en pasta se reduce significativamente lo siguiente:
  - La necesidad de diseñar y construir grandes depósitos.
  - El volumen de materiales involucrados en la construcción de depósitos.
  - Los riesgos de falla geomecánica asociados a los tranques convencionales.
  - El manejo del volumen de agua clara.
  - Las pérdidas de agua por infiltración y evaporación.
  - La superficie de suelo para disponer los relaves, optimizando el uso del suelo.
  - La emisión de material particulado.
  
- En los depósitos de relaves en pasta se incrementa significativamente lo siguiente:
  - La recuperación de aguas desde los relaves
  - La aceptación ambiental de la comunidad.
  - La posibilidad de co-depositar junto a otros residuos mineros (estériles o lastre)
  - La flexibilidad operacional.

- Además:
  - Se pueden desarrollar actividades de vegetación o de remediación en forma paralela a la operación.
  - Permite la encapsulación de contaminantes en el depósito.

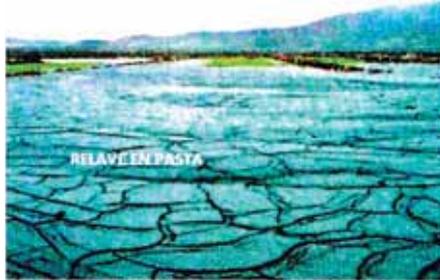


Figura N° 9.- Depósito de Relaves en Pasta - Collahuasi

Fuente: Disposición de relaves en pasta, Lavalin

## 1.2.7 Parámetros Adicionales de los Relaves

### 1.2.7.1 Efectos de la razón sólido/agua (S:A)

Una pulpa de relaves con suficiente agua se comportará como una suspensión acuosa, cuya viscosidad aumenta si disminuye el agua, hasta que, para contenidos de agua suficientemente bajos se comportará como un lodo espeso y eventualmente, como un suelo húmedo.

Experimentalmente podemos señalar que si la razón S:A es menor que 50%, la pulpa de relaves se comporta como suspensión acuosa, y escurrirá incluso con pendiente menores al 2% y se produce segregación de las partículas con la distancia al punto de descarga.

Si la razón S:A es mayor o igual que 55% la pulpa de relaves comienza a tener comportamiento de un lodo viscoso; disminuye fuertemente la segregación de partículas y se necesitará pendientes mayores al 2% para escurrir.

### 1.2.7.2 Densidad seca

La densidad seca es un parámetro de gran peso en la estimación de las pérdidas de agua por retención y en el cálculo de la tasa de crecimiento del depósito (raising rate). La densidad con la que se deposita el relave varía espacialmente en un depósito. Una de las variables de la que depende este parámetro es la granulometría del sólido depositado. Por ejemplo, el material depositado cerca de

un punto de descarga de relaves tiende a ser más grueso que el que se encuentra próximo a la laguna, debido a la segregación del material. Esta variación es más notoria cuando el material depositado es relave completo. Al segregarse el relave en el depósito, las densidades obtenidas son diferentes. Además, podemos esperar que con el aumento de espesor de relaves, las capas inferiores tiendan a consolidarse, aumentando su densidad. De esta manera podemos decir que la densidad seca del relave depositado es una función espacial de la forma:

$$\gamma_d = \gamma_d(x, y, z)$$

$\gamma_d$ = densidad seca

## CAPÍTULO II : CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño que se presentan han servido como base para el desarrollo de los dos casos aplicativos descritos en el Capítulo IV. Así mismo estos han servido para desarrollar el diseño de las estructuras contempladas en el plan de depositación.

Debido a la confidencialidad que supone los proyectos en desarrollo, se ha omitido la ubicación y los datos asociados a los dos casos presentados a continuación.

### 2.1 CASO I: DEPOSITACIÓN EN TAJO

Este caso corresponde a una opción de descarga del tipo A (descarga de relaves completo). El tajo para este ejemplo recibirá los relaves espesados provenientes de la planta de procesos. Los relaves serán depositados dentro del tajo después de finalizados los trabajos de explotación, para esto, las paredes del tajo serán acondicionadas formando una cobertura impermeable. Se ha planteado que la construcción del depósito de relaves se lleve a cabo progresivamente conforme a la demanda de capacidad durante los 5 años de operación estimados en función de la producción de relaves.

El Cuadro 1 nos muestra la fuente de los parámetros asumidos. El Cuadro 2 indica los parámetros considerados en el diseño del depósito, los cuales están asociados a la producción y características de los relaves, tipo de revestimiento, parámetros de depositación y parámetros para el balance de agua.

Cuadro N° 1.- Fuentes de criterios de Diseño – Caso 1

Origen	Denominación
Compañía Minera / Consultor	A
Cálculo	B
Literatura y/o Práctica estándar de la Industria	C

Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 2.- Criterios de Diseño Civil – Caso 1

Descripción	Unidad	Valor	Fuente
<b>Parámetros de Operación</b>			
<b><i>Producción Nominal de Mineral</i></b>			
- Diaria	t/día	18 000	A

Descripción	Unidad	Valor	Fuente
Disponibilidad mecánica para generación de relave	%	92	A
<b>Producción Nominal de Relaves</b>			
- Diaria	t/día	17 737	A
- Mensual	Mt/mes	0,53	A
- Anual	Mt/año	6,4	A
<b>Características del Relave</b>			
Densidad seca promedio del relave depositado	t/m <sup>3</sup>	1,35	A
Densidad húmeda promedio del relave depositado	t/m <sup>3</sup>	1,88	A
Densidad húmeda promedio de los relaves transportados al depósito de relaves	t/m <sup>3</sup>	1,56	A
Concentración en peso del relave en pulpa promedio	%	55	A
Gravedad específica de los relaves	adim.	2,88	A
Granulometría del relave (D <sub>50</sub> )	µm	43,4	A
Granulometría del relave (D <sub>85</sub> )	µm	75,2	A
<b>Parámetros de Diseño</b>			
<b>Depósito de Relaves Caso I: Tajo A</b>			
Área del depósito de relaves	ha	38,46	A y B
Capacidad máxima del depósito de relaves (Año 5)	Mm <sup>3</sup>	22,69	A y B
Altura típica de banco - tajo A	m	16	A
Ancho promedio de banquetas - tajo A	m	10	A
Pendiente de depositación del relave sobre el agua	%	0,5	A
Pendiente de depositación del relave bajo el agua	%	3	A
Relación promedio entre el área de la laguna y el área total de relaves durante la operación	adim.	0,4	A

Descripción	Unidad	Valor	Fuente
Número de puntos de descarga de relaves	adim.	3	A
Cota máxima de relaves (etapa de operación)	msnm	3 417	A
Cota máxima de relaves (etapa de cierre)	msnm	3 419	A
Cota de fondo	msnm	3 248	A
Cota de nivel freático estimado en el tajo	msnm	3 325	A
<b>Sistema de Revestimiento</b>			
Tipo de revestimiento en roca sedimentaria	material	Geotextil	A
Tipo de geotextil	tipo	No tejido	A
<b>Diseño Hidráulico</b>			
Periodo de retorno para diseño del sistema de aliviadero de emergencia	año	500	A
Tipo de revestimiento del sistema de aliviadero de emergencia	tipo	concreto	A
Pendiente mínima	%	1	A
Cota aliviadero de emergencia	msnm	3 416	A
<b>Balance de Aguas Global</b>			
<b>Depósito de Relaves Tajo A</b>			
Área total del tajo A	ha	64	A/B
Área inicial de simulación	ha	2,1	A
Coefficiente de escorrentía	%	70	A/B
Altura mínima del espejo de agua	m	4	B
Almacenamiento inicial de agua para operación	Mm <sup>3</sup>	400 000	A
Agua retenida en relave	%	38.5	B
Coefficiente de evaporación en relave no sumergido	adm	0,2	C

Descripción	Unidad	Valor	Fuente
<b>Agua de Procesos</b>			
Demanda de agua	m <sup>3</sup> /h	605	A

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.1 Descripción General del Caso I: Depositación en Tajo "A"

El diseño del depósito del Tajo A y componentes afines, ha sido desarrollado tomando como referencia los criterios de diseño anteriormente mencionados.

El diseño del depósito del Tajo A contempla actividades como movimiento de tierras, corte en roca para la conformación del canal para tuberías, aliviadero de emergencias, colocación de material de desmonte para fijación de geosintéticos. Del mismo modo, el diseño considera la instalación de un sistema de revestimiento en la mayor parte del área del Tajo A, la construcción de un canal para tuberías de descarga de relaves, cajas disipadoras de concreto y aliviadero de emergencia. A continuación se presenta un resumen de los principales aspectos desarrollados durante el diseño de los componentes antes mencionados.

### 2.1.2 Depósito de Relaves Tajo "A"

El depósito del Tajo A recibirá los relaves espesados provenientes de la planta de procesos. El depósito de relaves se emplazará sobre un área aproximada de 38,46 ha, que representa el área de los once primeros bancos inferiores de la configuración final del Tajo A. Se ha planteado que la construcción del depósito de relaves se lleve a cabo progresivamente conforme a los requerimientos de capacidad, estimados en función de la producción de relaves indicados en los criterios de diseño, de acuerdo a lo siguiente:

- En el año 1, se ha considerado que los relaves depositados llegarán hasta el nivel 3344 en el punto de descarga, que representa una capacidad acumulada de 4,78 Mm<sup>3</sup>.
- En el año 3, se ha considerado que los relaves depositados llegarán hasta el nivel 3392 en el punto de descarga, que representa una capacidad acumulada de 14,83 Mm<sup>3</sup>.

- En el año 5, se ha considerado que los relaves depositados llegarán hasta el nivel 3417 en el punto de descarga, que representa una capacidad acumulada de 22,69 Mm<sup>3</sup>.

Respecto a la disposición de relaves, se ha considerado la incorporación de un sistema tuberías de HDPE SDR 11 de 20" y cajas disipadoras de concreto que serán ubicadas dentro de un canal construido en la pared sur del tajo A, con la finalidad de disminuir la pendiente para asegurar una descarga controlada y continua de relaves en el tajo.

En base a las características del relave, se ha considerado que al ser descargados los relaves formarán una playa con una pendiente subaérea de 0,5 % y 3% de pendiente subacuática(debajo de la laguna).

El diseño del depósito de relaves considera revestir con geotextil de alto gramaje los taludes de la configuración final del tajo, los cuales tienen una inclinación que varía entre 0,25H:1V y 0,6H:1V, anchos de banqueteta promedio de 10 m y altura de bancos de 16 m, según se muestra en los anexos. Del mismo modo, se realizarán trabajos de movimiento de tierras principalmente para la construcción del canal para las tuberías de descarga de relaves y la colocación de desmonte en las banquetetas para la fijación del geotextil colocado en las paredes del tajo.

En la etapa de cierre se ha considerado la colocación de una capa de suelo de baja permeabilidad en la superficie de relaves y la construcción de un aliviadero de emergencia que se ubicará en zona norte del tajo a la cota 3 416 msnm.

### 2.1.3 Sistema de Revestimiento, Tajo "A"

Se está considerando que el tajo A se tienen diferenciados dos tipos de materiales en función a su litología y conductividad hidráulica: existen zonas de permeabilidad moderada y material de permeabilidad baja. En tal sentido, el sistema de revestimiento del depósito de relaves considera revestir solamente las áreas que presentan moderada permeabilidad.

Se identificó el contacto inferido zona permeable/zona no permeable y el modelo geológico de la zona del proyecto. En base a esta información se delimitaron las zonas que requieren revestimiento.

El sistema de revestimiento consistirá en la instalación de un geotextil de alto

gramaje y alta resistencia (PP-PET, 500 g/m<sup>2</sup>) en las paredes de la zona de baja permeabilidad. El geotextil será fijado en las banquetas del tajo mediante la colocación de una capa de desmonte de mina de al menos 0,50 m de espesor. Cabe mencionar que este tipo de geotextil además de tener alta resistencia a la elongación, presenta resistencia a la degradación por exposición a los rayos UV, resistiendo periodos mayores a 5 años.

Cabe mencionar que en la zona norte del tajo se tiene un talud de relleno correspondiente a un acceso perimetral perteneciente a otra estructura que se proyecta dentro del tajo. Por esta razón, es necesario revestir el mencionado talud con una lámina de geomembrana y GCL.

A continuación se presenta una breve descripción de los elementos propuestos para el sistema de revestimiento del depósito del Tajo A:

#### *2.1.3.1 Geotextil de alta resistencia PP-PET (500 g/m<sup>2</sup>), Tajo "A"*

En los taludes y banquetas del tajo, en las zonas de material de moderada permeabilidad se colocará el geotextil de alta resistencia PP-PET. Este material será fijado en las banquetas del tajo colocando material de desmonte sobre cada paño instalado.

La cantidad de geotextil que se requiere instalar en el sistema de revestimiento del depósito de relaves es de aproximadamente 302 500 m<sup>2</sup>.

#### *2.1.3.2 Revestimiento geosintético de arcilla (GCL)*

En el talud de relleno del acceso perimetral que se proyecta dentro del tajo A colocará revestimiento geosintético de arcilla (GCL). Este material se anclará en una trinchera de anclaje y se colocará desplegando el rollo a lo largo del talud.

#### *2.1.3.3 Geomembrana de LLDPE SST de 1,5 mm*

Sobre el GCL se colocará un revestimiento consistente en geomembrana de polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) texturada por un solo lado (SST) de 1,5 mm de espesor. La instalación de la geomembrana de LLDPE se efectuará manteniendo la cara texturada en contacto con el GCL, a fin de mejorar la resistencia al corte de esta interface.

Este tipo de geomembrana ha sido seleccionada para el depósito del Tajo A debido a que su flexibilidad mejora la resistencia cortante y al punzonamiento ante cargas impuestas por el peso del relave depositado y las condiciones del terreno existente.

Durante la etapa de construcción será necesario proporcionar anclajes temporales y permanentes a la geomembrana. El anclaje temporal consistirá en sacos de arena u otro material de lastre a fin de brindar sujeción a la geomembrana, evitándose de esta manera, desplazamientos significativos durante las operaciones de despliegue y soldadura propios de las actividades de construcción. Los anclajes permanentes estarán conformados por zanjas en la parte superior, en las cuales se colocará los extremos de la capa de geomembrana para fijarse al terreno, empleando rellenos compactados.

En la zona inferior y taludes del tajo se ha considerado que la geomembrana será fijada mediante soldadura por extrusión en insertos de HDPE fijados en trincheras rellenas de concreto.

#### 2.1.4 Diseño de Obras Hidráulicas a Gravedad

Dentro del desarrollo del estudio se contempla el diseño de obras hidráulicas que funcionan a gravedad dentro del depósito de relaves Tajo A. Para la disposición de relaves se diseñan las tuberías de descarga de relaves complementado con estructuras disipadoras y para medidas de contingencia ante grandes avenidas se configura un aliviadero de emergencia. A continuación se describe y resume el diseño de las obras hidráulicas proyectadas:

##### 2.1.4.1 Tubería para descarga de relaves

La disposición de relaves en el Tajo A contempla el transporte de los relaves mediante una línea de tubería de HDPE sólida SDR 11 de 20 pulgadas de diámetro, como un flujo a superficie libre; sin embargo, se instalará otra tubería de similares características como medida de contingencia.

En el Cuadro 3 se indica el resumen de los parámetros hidráulicos en las tuberías por cada tramo.

**Cuadro N° 3.- Parámetros Hidráulicos en las Tuberías por Cada Tramo**

Tramo	S(%)	H/D	y (m)	V (m/s)	Re	Q (m³/h)	Froude
1	10,0	0,4	0,18	6,27	81709	1389,0	5,4
2	88,0	0,2	0,09	15,19	444078	1282,3	19,2
3	28,0	0,3	0,14	10,00	202842	1495,9	10,1
4	40,0	0,25	0,11	11,12	247603	1289,5	12,5
5	7,0	0,45	0,21	5,31	59002	1375,4	4,3
6	12,0	0,35	0,16	6,56	89225	1214,4	6,1
7	8,0	0,4	0,18	5,47	62335	1211,3	4,7
8	38,0	0,25	0,11	10,80	234129	1252,8	12,1
9	32,0	0,25	0,11	9,80	193772	1136,7	11,0
10	14,0	0,35	0,16	7,20	107100	1332,2	6,7

Fuente: Elaboración propia

#### 2.1.4.2 Estructura disipadora

Como complemento a la extensión de las tuberías de descarga de relaves en el Tajo A, durante los primeros 5 años de operación se contempla la proyección de estructuras disipadoras que garanticen la disipación de la energía, debido a las grandes pendientes, con el objetivo de garantizar su fluidez hacia aguas abajo. Esta estructura hidráulica está configurada por dos líneas de ingreso y salida de tuberías sólidas de HDPE de 20 pulgadas de diámetro, como parte de la operación trabajaría una tubería y la otra sería para contingencia, cuenta además con dos compuertas metálicas frente a cada tubería con el fin de derivar los flujos de manera independiente a cada línea de tubería. En caso alguna tubería tenga dificultades en evacuar los relaves existe un rebose entre ambos compartimentos o naves para darle continuidad al fluido.

En el Cuadro 4 se indica el resumen el dimensionamiento de las longitudes para cada caja disipadora.

**Cuadro N° 4.- Determinación de las Longitudes para cada Caja Disipadora**

<b>Estructura Disipadora</b>	<b>Tirante Entrada (m)</b>	<b>Velocidad Entrada (m/s)</b>	<b>Longitud Chorro Calculado (m)</b>	<b>Longitud Chorro Diseño (m)</b>
E1	0,16	5,93	3,8	4,0
E2	0,09	14,64	1,8	2,0
E3	0,12	9,25	3,8	4,0
E4	0,11	10,71	3,3	3,5
E5	0,18	5,04	3,4	3,5
E6	0,15	6,43	4,0	4,0
E7	0,18	5,36	3,6	4,0
E8	0,11	10,49	3,4	3,5
E9	0,11	9,77	3,6	4,0

#### 2.1.4.3 Aliviadero de emergencia

La configuración del sistema de drenaje contemplada para la etapa de cierre de depósito de relaves Tajo A incluye principalmente el diseño del aliviadero de emergencia y el canal de derivación que captará los flujos provenientes del aliviadero y los derivará hacia las estructuras hidráulicas existentes. Las estructuras hidráulicas proyectadas han sido dimensionadas utilizando las ecuaciones de flujo uniforme con el flujo pico que ocurra en el extremo del aliviadero y hacia aguas abajo del canal de derivación. El borde libre en el aliviadero fue especificado en 0,5 m o el 20% de la energía específica del flujo superficial.

El canal de derivación proyectado estará ubicado aguas abajo del aliviadero de emergencia y evacuará los flujos superficiales provenientes del depósito de relaves Tajo A ante un evento hidrológico extraordinario en la etapa de cierre, a través de un enrocado de protección. El valor del caudal proveniente del aliviadero asciende a 5,6 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 500 años. La sección típica del aliviadero será de sección trapezoidal con revestimiento de concreto armado ( $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ ) de 200 mm de espesor, con taludes laterales de 1H:1V, base de 3,0 m y altura de 1,0 m. en la Cuadro 5 se muestra el resumen del dimensionamiento del aliviadero de emergencia.

Cuadro N° 5.- Dimensionamiento de Aliviadero de Emergencia

Tipo de Sección	Caudal de Diseño (m <sup>3</sup> /s)	Taludes Laterales (H:1V)	Base (m)	Altura (m)	Tipo de Revestimiento	Espesor (mm)
Trapezoidal	5,6	1,0	3,0	1,0	Concreto Armado	200

El esquema general que representa la ubicación y dimensiones del aliviadero de emergencia y canal de derivación se muestran en los anexos del presente informe.

#### 2.1.5 Consideraciones de Cierre

Para el cierre del depósito de relaves Tajo A se indican las siguientes consideraciones:

- Contribuir a la adecuada protección ambiental mediante la ejecución y aplicación de técnicas y tecnologías orientadas al control de riesgos, estabilización del terreno y contención de descargas físicas y químicas, priorizando el criterio de prevención de la contaminación.
- Incorporar coberturas adecuadas la estabilización química del material del relave.
- Implementar controles o medidas que minimicen los riesgos a la salud, seguridad pública y al ambiente derivados de las actividades mineras luego del cierre.
- Permitir que el terreno cerrado y rehabilitado tenga un uso y condición compatible con el entorno cercano.
- Revegetar las áreas afectadas, donde sea posible, hasta alcanzar una condición autosostenida, utilizando especies apropiadas de plantas.

A continuación se presentan algunos criterios para el cierre a nivel conceptual concordantes con los requerimientos legales y técnicos en el marco legal aplicable.

#### 2.1.6 Criterios para la Estabilidad Física

- Se utilizarán factores de seguridad en el largo plazo para evaluar la estabilidad física del depósito de relaves en el momento del cierre; esto se realizará según lo establecido en la Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina del Ministerio de

Energía y Minas del Perú (1997), y la *Canadian Dam Association* (CDA 2007).

- En caso se detecte algún sector inestable, este deberá ser monitoreado con controles pasivos durante el cierre, como: inspecciones anuales y mantenimiento de la cobertura o vegetación (si es el caso) pero sin requerir personal permanente en el sitio.
- Las medidas potenciales de mitigación para mejorar el margen de seguridad serán específicas para el sitio y podrían incluir bermas de pie u otros elementos de control para lograr la estabilización.

### 2.1.7 Criterios para la Estabilidad Química

- La configuración final del depósito de relaves considera que el agua producto de las precipitaciones se evacuará por el aliviadero de emergencia, por lo que el volumen de agua acumulada será casi nulo.
- Se ha considerado colocar relave desulfurizado en toda la superficie de relaves con un espesor mínimo de 2 m.
- Encima del relave desulfurizado, se colocarán coberturas de baja permeabilidad para minimizar la tasa de infiltración.
- Si es necesario se interceptarán y tratarán las aguas impactadas para que la calidad de agua descargada se mantenga dentro de los límites máximos permisibles o de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua para la Categoría III, "Riego de Vegetales y Bebidas de Animales" (según el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM). Para parámetros no regulados se recurrirá a estándares internacionales de manera referencial.

### 2.1.8 Criterios para la Estabilidad Hidrológica

- Para lograr la estabilidad hidrológica del depósito de relaves, la construcción de infraestructura de manejo de aguas superficiales deberá considerar como criterio de diseño el máximo evento de 24 horas con un periodo de retorno de 500 años como mínimo.
- Para evitar la sobrecarga o saturación del suelo con agua (por las condiciones hídricas de la zona), se recomienda perfilar el material de recubrimiento del depósito con una pendiente de 0,5% a favor y en dirección a una zona de descarga.

### 2.1.9 Criterios para la Instalación de Coberturas

- El depósito de relaves deberá ser cubierto por cobertura de baja permeabilidad para restringir el flujo de percolación neta al interior del depósito y permitir el movimiento horizontal del agua.
- La cobertura colocada también deberá favorecer al incremento de la escorrentía de agua superficial y reducir la cantidad de precipitación que puede infiltrarse en las instalaciones, a través de un manejo de pendientes.
- El tipo de cobertura que se recomienda para el cierre, presenta la siguiente configuración:
  - Una capa inferior conformada por relave inerte (no sulfurado). Se podría considerar un espesor de 2 m.
  - Una capa intermedia de material de baja permeabilidad (grava arcillosa), de un espesor entre 20 a 30 cm.
  - Una capa superior de suelo orgánico o topsoil, de un espesor entre 20 a 30 cm.
- Las áreas donde sea factible, podrán ser revegetadas con especies nativas de la zona para promover el establecimiento final de la vegetación y reducir la erosión; se recomienda la revegetación con especies de bajo porte (pastos).

## 2.2 CASO II: DEPOSITACIÓN EN VALLE

Este caso corresponde a una opción de descarga del tipo B (Construcción de muro resistente con parte de relaves). El presente modelo muestra el diseño de un crecimiento de depósito de relaves (cota de dique: 4092 msnm) y su respectivo recrecimiento del depósito de relaves (cota de dique: 4102 msnm), con la finalidad de ampliar la capacidad de almacenamiento de relaves a largo plazo, del depósito de relaves existente.

El Cuadro 6 nos muestra la fuente de los parámetros asumidos. El Cuadro 7 indica los parámetros considerados en el diseño del depósito, los cuales están asociados a la producción y características de los relaves, tipo de revestimiento, parámetros de depositación y parámetros para el balance de agua.

Cuadro N° 6.- Fuentes de criterios de Diseño Civil – Caso II

Origen	Denominación
Compañía Minera / Consultor	A
Literatura y/o Práctica estándar de la Industria	B
Cálculo	C

Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 7.- Criterios de Diseño Civil – Caso 2

Descripción	Unidad	Criterio de Diseño	Fuente
<b>Parámetros de Operación</b>			
Tiempo de operación	Años	28	B
Producción de relaves año 2014	t	383 542	A
Producción de relaves año 2015 en adelante	t	500 000	A
Porcentaje de relave grueso	%	54	B
Porcentaje de relave fino	%	46	B
<b>Depósito de Relaves</b>			
<b>Características del Relave</b>			
Densidad seca relave fino	t/m <sup>3</sup>	1,20	B
Densidad seca relave grueso	t/m <sup>3</sup>	1,95	B
Densidad seca relave de colas de flotación	t/m <sup>3</sup>	1,50	B
<b>Sistema de Transporte</b>			
Método de transporte	Bombas de pistón		A
<b>Parámetros de Diseño</b>			
Volumen del depósito de relaves	Mm <sup>3</sup>	8,28	C
% de área del espejo de agua	%	30	A
Pendiente de depositación de relave fino	%	0,75 / 3,0	A
<b>Dique</b>			
Capacidad del dique	Mt	1,42	C
Volumen del dique	Mm <sup>3</sup>	0,73	C
Altura del dique	m	18	C
Ancho de cresta	m	15	B
Talud aguas arriba	H:V	1,8:1	B
Talud aguas abajo	H:V	3,5:1	B
Cota de cresta del dique	msnm	4092	A
Cota máxima de llenado de relaves	msnm	4090	B
Nivel máximo de espejo de agua	msnm	4078	B

Descripción	Unidad	Criterio de Diseño	Fuente
<b>Sistema de subdrenaje</b>			
Sistema de subdrenaje	si/no	si	B
<b>Poza de monitoreo de subdrenaje</b>			
Material de revestimiento	HDPE / LLDPE	HDPE	B
Tratamiento superficial del revestimiento	liso/SST	SST	B
Espesor de revestimiento	mm	1,5	B
Volumen de almacenamiento	m <sup>3</sup>	4500	B
Tiempo de residencia	horas	12	B

**Nota:**

<sup>1</sup> Los criterios de diseño para el balance de aguas se presentan en los cuadros 10 y 11.

Para la configuración final del crecimiento del dique a la cota 4092 msnm, la disposición de nuevos volúmenes de relaves en el depósito y el diseño de las estructuras e instalaciones que aseguren la funcionalidad, accesibilidad y manejo de aguas superficiales en todo el sistema, se ha tomado en consideración los criterios de diseño mencionados anteriormente en el Cuadro 7.

En ese contexto, la tabla de criterios de diseño mostrada refleja en síntesis, los criterios de diseño en los que se ha basado el diseño de las estructuras e instalaciones presentadas.

A continuación se presenta un resumen de los principales aspectos desarrollados durante el diseño del crecimiento del Depósito de Relaves.

### 2.2.1 Sistema de Subdrenaje

Una vez concluida la etapa de movimiento de tierras, se procederá con la construcción del sistema de subdrenaje. Este sistema de subdrenaje, será una ampliación del sistema de subdrenaje existente en el dique actual y tendrá por finalidad captar los flujos provenientes de las aguas subterráneas originadas por debajo de las áreas involucradas en el crecimiento del dique del depósito de relaves y de las aguas colectadas en el sistema de subdrenaje actual del dique existente.

Asimismo, el sistema de subdrenaje, captará las aguas provenientes de las precipitaciones y de las infiltraciones producidas en el relave fino depositado en el

vaso del depósito, drenándolo hacia la poza de subdrenaje y facilitando la consolidación de los materiales.

### 2.2.2 Poza de Monitoreo

La poza de monitoreo de subdrenaje será construida aguas abajo del depósito de relaves y su finalidad será de almacenar y monitorear los flujos provenientes de la captación del sistema de subdrenaje existente y de la ampliación del subdrenaje para el nuevo crecimiento del dique.

La capacidad de almacenamiento máximo de la poza será de 4500 m<sup>3</sup>. La poza de subdrenaje deberá ser impermeabilizada en todo su interior por GCL y revestida por una geomembrana SST de HDPE de 1,5 mm de espesor.

Debido a que no existe revestimiento del depósito de relaves existente, las aguas de infiltración colectadas en el sistema de subdrenaje tendrán un importante grado de contaminación; por tanto, luego que estas aguas son almacenadas en la poza de subdrenaje, deberán ser conducidas nuevamente hacia el depósito de relaves a través de un sistema de bombeo, consistente en una bomba instalada en una plataforma de bombeo y una línea de impulsión.

El sistema de bombeo recomendado tiene como objetivo evacuar las aguas de la poza de subdrenaje a razón de 30 l/s, además el equipo de bombeo será instalado en un cuarto de máquinas que se ubicará a un lado de la poza proyectada, donde la tubería de impulsión tendrá una longitud de 420 m y una carga estática de 62,3 m.

### 2.2.3 Crecimiento del Dique hasta la Cota 4092 msnm

El crecimiento del dique se conformará con relave grueso proporcionado por la producción de relaves y su disposición a través del cicloneado en el hidrociclón ubicado en la parte superior margen derecha del depósito de relaves.

La configuración geométrica del presente crecimiento deberá realizarse conservando el talud interno (aguas arriba) del dique existente (1,8H: 1V), un ancho de corona de 15 m y un talud externo (aguas abajo del dique) de 3,5H:1V. Este dique asegurará que durante toda la operación se conserve un borde libre de 2,0 m como mínimo evitando de esta manera un posible desborde. En el Cuadro 8 se muestra las características del presente crecimiento del dique.

**Cuadro N° 8.- Características del Crecimiento del Dique**

Descripción	Valor
Elevación de cresta	4092 msnm
Ancho de cresta	15 m
Talud aguas arriba	1,8H:1V
Talud aguas abajo	3,5H:1V
Volumen de relleno (relave grueso)	730 000 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

#### 2.2.4 Método de Disposición de Relaves

En un primer período, los relaves serán dispuestos por el método de cicloneo, de tal manera que el relave grueso producto de dicho proceso (producción = 54%) será acumulado para la conformación del presente crecimiento de dique, mientras que el relave fino (producción = 46%), será descargado en el mismo depósito de relaves. Esto funcionará así hasta el crecimiento de 1 m de dique por lo que se ha previsto que el funcionamiento del ciclón no sea constante y dependerá de las necesidades de producción de relaves gruesos para la conformación del dique.

Posteriormente, en un segundo período, todos los relaves (grueso y fino) se descargarán en el depósito de relaves hasta llegar al respectivo nivel, respetando el borde libre de 2 m, por cada metro de crecimiento del dique. Asimismo, se generará el espejo de agua aguas arriba del depósito.

Las operaciones de crecimiento del dique y almacenamiento de relaves en el depósito, considerando estos dos períodos de tiempo, se realizarán de forma secuencial, para cada metro de crecimiento del dique, y los respectivos niveles de descarga son mostrados en el anexo 2.

La disposición y conformación del relave fino permitirá formar una superficie uniforme con pendiente de caída de 0,75% hacia aguas arriba, hasta la línea de contacto con el espejo de agua, a partir del cual la superficie de relaves sumergida se deprime, conservando una pendiente de 3%, hasta apoyarse con el terreno existente (terreno natural o relave existente).

La línea de contacto entre los relaves y el espejo de agua será definida de tal manera que el depósito de agua conserve una profundidad máxima de 4 m en su

sector más profundo, requerida para el óptimo funcionamiento de las bombas instaladas en las balsas de madera sobre el espejo.

En el Cuadro 9 se establece la secuencia de llenado, indicando volúmenes, períodos y tiempos de operación.

**Cuadro N° 9.- Volúmenes de Relaves y Agua de Decantación**

Cota de crecimiento de dique	Períodos	Volumen para Crecimiento de Dique (m <sup>3</sup> )	Deposición de relaves (m <sup>3</sup> )	Agua de Decantación (m <sup>3</sup> )	Tiempo de operación (años)
4083	I	103 400	147 024	618000	1
	II	0	1 370 626		4,1
4084	I	61 200	95 833	102850	0,5
	II	0	603 767		1,9
4085	I	63 250	95 833	223550	0,5
	II	0	519 167		1,6
4086	I	65 200	95 833	442600	0,5
	II	0	680 317		2,1
4087	I	67 300	95 833	501550	0,5
	II	0	568 117		1,8
4088	I	69 450	115 000	645200	0,6
	II	0	621 000		1,7
4089	I	71 700	115 000	592750	0,6
	II	0	753 350		2,3
4090	I	73 750	115 000	813700	0,6
	II	0	621 000		1,9
4091	I	75 900	115 000	940150	0,6
	II	0	638 150		2
4092	I	77 900	115 000	641600	0,6
	II	0	856 250		2,6

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.5 Cierre de Galerías de Túnel Existente

A raíz de la presente ampliación del depósito de relaves, será necesario clausurar dos tramos del túnel existente, ubicados en el inicio del túnel y al final del mismo, con tapones constituidos de concreto armado.

### 2.2.6 Diseño Hidráulico

Con el objetivo de permitir la continuidad de los flujos provenientes de la escorrentía superficial en la cuenca principal de la quebrada en la cual se ubica el depósito de relaves y con la finalidad de evitar que estos flujos entren en contacto con el depósito de relaves, se ha determinado el diseño de un sistema de estructuras hidráulicas, ubicadas convenientemente en las inmediaciones del depósito de relaves, los cuales derivarán los flujos hacia la cuenca baja de la quebrada y así asegurar el comportamiento natural de la quebrada hacia aguas abajo de la cuenca principal.

Las estructuras hidráulicas se dividen en tres componentes principales: captación, contempladas en las quebradas naturales activas; derivación, los cuales evacuarán los flujos provenientes de las estructuras de captación y de las laderas de aporte ubicadas perimetralmente al depósito de relaves con la finalidad de conducirlos hacia el curso natural de la quebrada ubicado aguas abajo del depósito; y emergencia, contemplado para derivar los flujos superficiales como respuesta ante situaciones de eventos hidrológicos extraordinarios.

El presente documento tiene por objetivo mostrar de manera básica la metodología, los datos y los resultados del diseño hidráulico de las principales estructuras de cada componente basados en los resultados de las evaluaciones hidrológicas, geológicas y geotécnicas, descritos previamente.

### 2.2.7 Diseño de Obras Hidráulicas

Las estructuras hidráulicas diseñadas han sido determinadas en base a la capacidad de derivar los flujos provenientes de la escorrentía superficial de las quebradas y laderas naturales de la cuenca principal de la quebrada, con la finalidad de no alterar el funcionamiento natural de la quebrada hacia aguas abajo. El sistema de drenaje superficial está compuesto por obras de drenaje adyacentes al depósito de relaves. A continuación se describe cada una de las componentes hidráulicas proyectadas.

#### 2.2.7.1 Estructuras de Captación

Las estructuras de captación tienen la función de coleccionar los flujos provenientes de las quebradas naturales activas y derivarlos, mediante rebose, a través de un vertedero lateral hacia los canales perimetrales. Estas estructuras han sido

diseñadas con la finalidad de garantizar la derivación de estos flujos hacia las estructuras de derivación correspondientes.

#### *2.2.7.2 Estructuras de Derivación*

Las estructuras de derivación evacuarán los flujos provenientes de la escorrentía superficial de las laderas, quebradas de aporte y de las cuencas altas adyacentes al depósito de relaves, entregando los flujos superficiales hacia los cursos naturales a través de estructuras hidráulicas los cuales distribuyen los flujos superficiales de manera laminar, disminuyendo la erosión hacia la entrega final, quebrada natural de descarga.

#### *2.2.7.3 Estructuras de Emergencia*

Las estructuras de emergencia han sido contempladas como respuesta ante eventos hidrológicos extremos o en situaciones donde el sistema de drenaje superficial colapse. Los flujos superficiales excedentes provenientes del depósito de relaves serán captados por un vertedero lateral y se empalmará con la rápida proyectada en la margen izquierda a través de un canal de derivación. Estará ubicada adyacente a la corona del dique y el acceso perimetral de la margen izquierda.

En el espejo de agua proyectado (elevación 4078 msnm) se contempla el diseño de un sistema decantador tipo quena, lo cual derivará los flujos excedentes del espejo de agua durante la operación y el crecimiento del depósito de relaves. Tendrá la función de derivar los flujos excedentes hacia el canal cerrado el cual se conectará con el túnel existente, este túnel será sellado durante el crecimiento del dique hacia la cota 4092 msnm.

##### *2.2.7.3.1 Descripción de las estructuras de emergencia*

El plan de manejo de escorrentía superficial en las instalaciones del depósito de relaves Caso II, contempla el diseño de un vertedero de emergencia como respuesta inmediata a sucesos con eventos hidrológicos extremos. A continuación se realiza una descripción de cada una de las estructuras de emergencia.

##### Vertedero de Emergencia

El vertedero de emergencia se ubica lateralmente a una caja con revestimiento de concreto armado ( $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ ) con varillas de acero de 1/2" de diámetro distribuidos cada 0,25 m de 200 mm de espesor, de área efectiva en la base de 10

x 3,5 m y altura efectiva de 1,5 m. La sección hidráulica del vertedero lateral será de sección trapezoidal, base de 6 m y altura de 0,8 m, con taludes laterales de 2H:1V. Esta sección ha sido dimensionada para un caudal máximo de diseño de 8,0 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 200 años.

#### Canal de Derivación

El canal de derivación captará los flujos provenientes del vertedero de emergencia, y los derivará convenientemente hacia aguas debajo del cauce principal de la quebrada, se conectará con la rápida ubicada en la margen izquierda para finalmente ser dirigida hacia el cauce principal.

#### Decantador Tipo Quena

El decantador tipo quena consiste de un sistema de estructuras de rebose, separadas convenientemente y un canal cerrado el cual se conectará con el túnel existente.

Las estructuras de rebose estarán distribuidas cada 10 m de longitud y presentarán revestimiento de concreto armado ( $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ ) con varillas de acero de 1/2" de diámetro distribuidos cada 0,30 m, serán de sección rectangular y presentarán área externa en la base de 1,2x1,3 m, altura efectiva de 1,5 m, espesor de 0,15 m en los muros. El lado que estará en contacto con el agua, estará conformada por ataguías, lugar en donde se empalmarán unas tablas que se colocarán a una altura máxima de 1 m las cuales funcionarán como un sistema de vertederos que permitirá el ingreso del agua hacia el interior del canal cerrado. El ingreso hacia el canal cerrado será mediante un orificio de sección trapezoidal con base de 0,4 m, altura de 0,25 m y taludes laterales de 0,6H:1,0V, este orificio será sellado, cuando el nivel de relave haya alcanzado el nivel máximo de la estructura de rebose, por un bloque de concreto.

#### 2.2.8 Balance de Aguas

El propósito del balance de aguas es verificar el manejo de agua sobre-nadante sobre los relaves y evaluar los niveles de agua para un óptimo funcionamiento. El balance toma en cuenta a nivel mensual; la producción de relaves y su transporte en forma de pulpa, el volumen de agua sobre-nadante, la recirculación mediante bombeo, el efecto de la precipitación mensual sobre el embalse y una tormenta extrema (precipitación máxima probable extraída de un análisis hidrológico

regional), el efecto de la evaporación en las áreas del relave y la cantidad de agua retenida en el material de relave.

#### *2.2.8.1 Descripción del modelo de balance de aguas*

El modelo de balance de aguas se desarrolló utilizando una hoja de cálculo basada en la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen entrante} - \text{Volumen Saliente} = \text{Volumen de Recirculación Disponible}$$

Los volúmenes entrantes corresponden al volumen por la precipitación sobre el depósito de relaves, el volumen de escorrentía sobre la cuenca de aporte y el volumen de agua en pulpa.

Los volúmenes salientes lo componen el volumen de agua retenida en los relaves, el volumen por evaporación en relaves sumergidos, el volumen por evaporación en relaves no sumergidos y el volumen de incremento por retención en laguna de aguas claras. Cabe mencionar, que solo para el cálculo del balance de aguas las pérdidas por infiltración son despreciables debido a que la playa permanece saturada la mayor parte del tiempo (producto de la saturación por partículas finas) y porque el volumen por infiltración es pequeño comparado con los volúmenes de entrada y salida por lluvias y evaporación, respectivamente.

El modelo considera que la presa de relaves es independiente de los flujos subterráneos de la cuenca de aporte y de los niveles freáticos cuyos volúmenes no ingresan al cálculo del balance de aguas, estos flujos son derivados por el sistema de subdrenaje.

#### *2.2.8.2 Parámetros y criterios de simulación*

El modelo de balance de aguas depende de los planes de producción previstos, de las propiedades del relave (densidad seca, porcentaje de sólidos y retención de agua), de las precipitaciones, evaporaciones, de los coeficientes de evaporación en relaves sumergidos y no sumergidos dimensiones y el almacenamiento de los relaves. Las Tablas 3.10 y 3.11 muestran las fuentes y los parámetros empleados para los criterios de diseño, respectivamente.

Cuadro N° 10.- Fuentes de criterios de Diseño – Balance de Aguas Caso 2

Origen	Denominación
Compañía Minera / Consultor	A/B
Criterio obtenido a partir de cálculos	C
Literatura y/o Práctica de la Industria	D

Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 11.- Criterios de Diseño– Balance de Aguas Caso 2

Descripción	Unidad	Criterio Usado	Fuente
Capacidad total de relaves	m <sup>3</sup>	8 767 150	A/B
Área total del depósito de relaves	m <sup>2</sup>	1 419 100	A/B
Área de relaves	m <sup>2</sup>	953 675	A/B
Tasa de producción (Año 1)	t/año	383 542	A/B
Tasa de producción (Año 2 a Año 27)	t/año	500 000	A/B
Periodo de operación	meses	319	A/B
Densidad seca de relaves	t/m <sup>3</sup>	1,5	A/B
Densidad de aguas claras	t/m <sup>3</sup>	1,0	D
Coefficiente de evaporación en relaves sumergidos	adim	1,0	A/B
Coefficiente de evaporación en relaves no sumergidos	adim	0,2	A/B
Porcentaje de sólidos en pulpa	%	29,51	A/B
Porcentaje de agua retenida en relaves	%	37,4	C
Pendiente de depositación promedio de relave fino	%	0,75/ 3,0	D
Porcentaje de área de relaves sumergidos	%	30	D
Cota máxima de llenado de relaves	msnm	4090	A/B
Cota de cresta del dique	msnm	4092	A/B
Borde libre	m	2	A/B
Precipitación Máxima en 24 horas (Tr = 1000 años)	mm	90,6	C

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.8.3 Periodo de simulación

La simulación para la ingeniería de detalle - cota 4092 msnm tiene un periodo de operación de 319 meses (26,6 años de operación), que corresponde desde enero del año 1 hasta julio del año 27.

#### 2.2.8.4 Plan de construcción del depósito de relaves

Dado que la superficie expuesta a las lluvias está directamente relacionada con la extensión del depósito de relaves, se ha considerado que la etapa - Cota 4092 msnm tiene una capacidad total de relaves de  $8,8 \text{ Mm}^3$  ( $8\ 767\ 150 \text{ m}^3$ ) que equivale a 13,15 Mt. De igual manera se ha considerado el área de relaves (área sumergida y no sumergida) igual a  $953\ 675 \text{ m}^2$  98,4 hectáreas y un área total del depósito de relaves delimitado por el acceso perimetral que es igual a  $1\ 419\ 100 \text{ m}^2$  (141,9 hectáreas).

#### 2.2.8.5 Características de los Relaves

La compañía proporcionó la densidad seca de relaves, el porcentaje de sólidos en pulpa y el porcentaje de agua retenida en relaves para las etapas mencionadas. La densidad seca de relaves asciende a  $1,5 \text{ t/m}^3$ , cuyo valor es característico para este tipo de relaves. El porcentaje de sólidos en pulpa condiciona el almacenamiento de agua en pulpa al ingresar al depósito de relaves y el porcentaje de agua retenida en relaves representa la absorción de agua en relaves sumergidos y saturados.

#### 2.2.8.6 Plan de Producción de Relaves

Del plan de producción de relaves dependen las estimaciones de la extensión del área de relaves a lo largo de la vida de la presa de relaves. Según los datos considerados, la producción de relaves para el año 1 es  $383\ 542 \text{ t/año}$  ( $31\ 961,8 \text{ t/mes}$ ) y para el año 2 hasta el final de la operación es  $500\ 000 \text{ t/año}$  ( $41\ 667 \text{ t/mes}$ ).

#### 2.2.8.7 Configuración del Depósito de Relaves

Los relaves serán depositados y tendrán una pendiente de 0,75% en la zona de relaves no sumergidos y una pendiente de 3% en la zona de relaves sumergidos. En la etapa estimada, el nivel máximo de relaves asciende a 4090 msnm., con borde libre de 2 m y con un nivel de dique de 4092 msnm. Se contempla en la configuración del depósito de relaves una zona inundable o sumergida cuya área es 30% del área de relaves para ambas etapas, que varían de manera mensual (análisis de balance de aguas mensual), generándose una laguna de aguas claras y por ende relaves sumergidos y relaves no sumergidos en toda la extensión del depósito de relaves.

### 2.2.8.8 Resultados del Balance de Aguas

Las evaluaciones de los resultados son:

- Los flujos máximos de bombeo disponible para mantener un volumen de operación normal en combinación con los planes de desarrollo de la disposición de los relaves.
- Los niveles de agua en la laguna de aguas claras que se incrementan a medida que los relaves alcanzan sus niveles máximos mensuales hasta culminar la etapa de operación.

Debido a que el desarrollo del almacenamiento de relaves se realizará de manera gradual, puede notarse que los resultados varían en la medida que la extensión del depósito de relaves se incrementa hasta su desarrollo final. la elevación del nivel de agua para eventos extraordinarios, respectivamente.

### 2.2.8.9 Flujos de Bombeo Disponible

Por lo general, los resultados del balance de aguas indican que los flujos de bombeo disponible se incrementan cada año conforme aumenta el desarrollo del depósito de relaves. Los mayores flujos de bombeo disponible se dan en épocas de lluvias, esto explica porque en años con precipitaciones extremas la cantidad de agua recuperada se incrementa considerando eventos hidrológicos extremos como condición crítica (precipitación extrema de 90,6 mm para periodo de retorno de 1000 años).

En el cuadro 12 se muestra los valores máximos, promedios y mínimos de los flujos de bombeo disponible para la etapa de operación en la ingeniería detalle - cota 4092 msnm.

Cuadro N° 12.- Flujos de Bombeo Disponible – Balance de Aguas Caso 2

Condición	Etapa de Estudio - Cota 4092 msnm		
	Máximo	Promedio	Mínimo
Año Húmedo	230,9	140,8	88,6
Año Promedio	116,4	77,5	48,5
Año Seco	40,8	31,3	27,3

Actualmente el sistema de control del nivel del agua en la laguna de aguas claras del depósito de relaves está representado por un sistema de estructuras de rebose (decantador tipo quena), el cual evacua los flujos por medio de una línea principal (tubería existente de 8 pulgadas de diámetro) que se extiende a lo largo del túnel

proyectado. De otro lado, debido al incremento constante de la longitud de esta tubería y al aumento de los flujos en temporada de lluvias, el sistema de quenas presenta un riesgo de colapsar, por lo tanto se recomienda implementar un sistema de bombeo tipo balsa.

Debido a que el sistema de bombeo será implementado para la contingencia de las quenas y que a futuro funcione independientemente. Se recomienda que el sistema de bombeo sea elegido tomando en cuenta los flujos máximos de bombeo para un año promedio (116,4 l/s) cuyo caudal de diseño será de 120 l/s.

El sistema de bombeo debe estar compuesto por dos bombas (una operando y otra por contingencia) y podría funcionar normalmente para eventos meteorológicos promedios, en caso se presente un evento extraordinario las dos bombas operarían para evacuar los flujos de la laguna de aguas claras excedentes.

En el Cuadro 13 se resumen los cálculos para determinar la potencia de la bomba requerida para evacuar las aguas de la laguna de aguas claras.

Cuadro N° 13.- Cálculo del Sistema de Bombeo de la Laguna

Longitud (m)	Diámetro (pulg)	Carga Estática (m)	Caudal de diseño (l/s)	ADT (m)	Potencia Requerida (HP)
374,90	10	24,0	120	30,1	52,3

\*ADT: Altura Dinámica Total.  
 Fuente: Elaboración propia

#### 2.2.8.10 Niveles de Agua de Operación

La tendencia de los niveles de agua en la laguna de aguas claras del depósito de relaves se incrementa a medida que el área de relaves aumenta progresivamente. La disposición de relaves cuenta con un nivel máximo de 4090,6 msnm para la etapa considerada - cota 4092 mnsn.

Según los resultados del balance de aguas, el nivel de agua máximo durante toda la etapa de operación se da cuando el nivel de relaves alcanza su máxima cota, que conlleva a tener un almacenamiento máximo en la laguna de aguas claras (43,5% en área de relaves) y al almacenamiento producto del evento hidrológico extremo como condición crítica.

Para la ingeniería detalle a la cota 4092 msnm, el nivel de agua máximo asciende a 4080,6 msnm (para el año 1) y para el fin de la operación este nivel de aguas máximo asciende a 4090,6 msnm (para el mes de julio del año 27).

## CAPÍTULO III : PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Tal como se mencionó anteriormente cada depósito de relave es un escenario particular por lo que se ha considera práctico, mostrar diferentes casos de depositación con la finalidad de ilustrar como la ubicación de la laguna asume un papel importante y proponer una estrategia de llenado en función a esta.

En el presente capitulo se presentarán dos casos de depositación de relaves, los cuales mostrarán distintos escenarios lo que permitirá mostrar diferentes planes (estrategias) de depositación.

### 3.2 PROCEDIMIENTO BÁSICO EN EL SOFTWARE TMS

A continuación se describe los procedimientos dentro del programa TMS para realizar el modelamiento de la disposición de los relaves y determinar consecuentemente la geometría y ubicación de la laguna:

Definir la topografía del área de influencia del depósito, según el nivel del estudio. Esto lo haremos dentro del programa de la siguiente manera:

#### 1) Importar Topografía - LwPoly to XYZ

En este paso importaremos la topografía mediante el formulario que se muestra en la Figura 10, es seleccionar un archivo a curvas de nivel en formato DXF, asignándole los rangos para los valores x,y,z. Lo que permitirá al programa generar los puntos en formato XYZ.

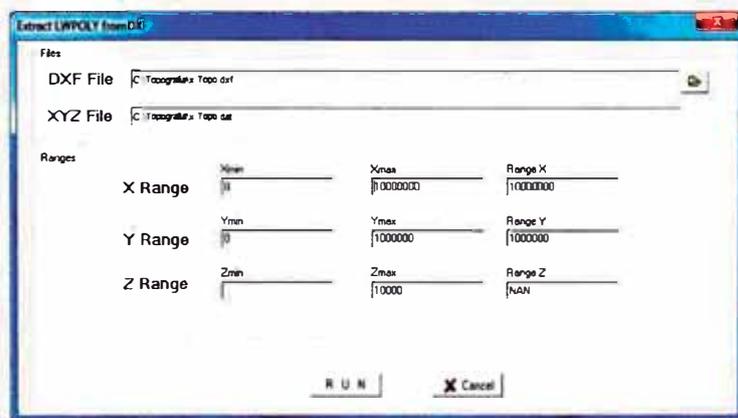


Figura N° 10.- Creación del archivo DAT

Se generará el archivo DAT necesario para generar la grilla.

## 2) Densidad de Puntos Topográficos, Grilla GRID

En este punto generaremos la densidad de puntos topográficos con el cual el programa realizará los cálculos, es necesario acotar que mientras generemos una topografía con mayor nivel de detalle, se ralentizará todo los cálculos. La malla (GRID) se genera a partir del archivo dat, se genera una malla con espaciamiento de 5m. Esto está definido según la precisión con la que se requiera trabajar (notar que todo los valores son múltiplo de 5, y este es el rango donde se encuentra la superficie a trabajar).

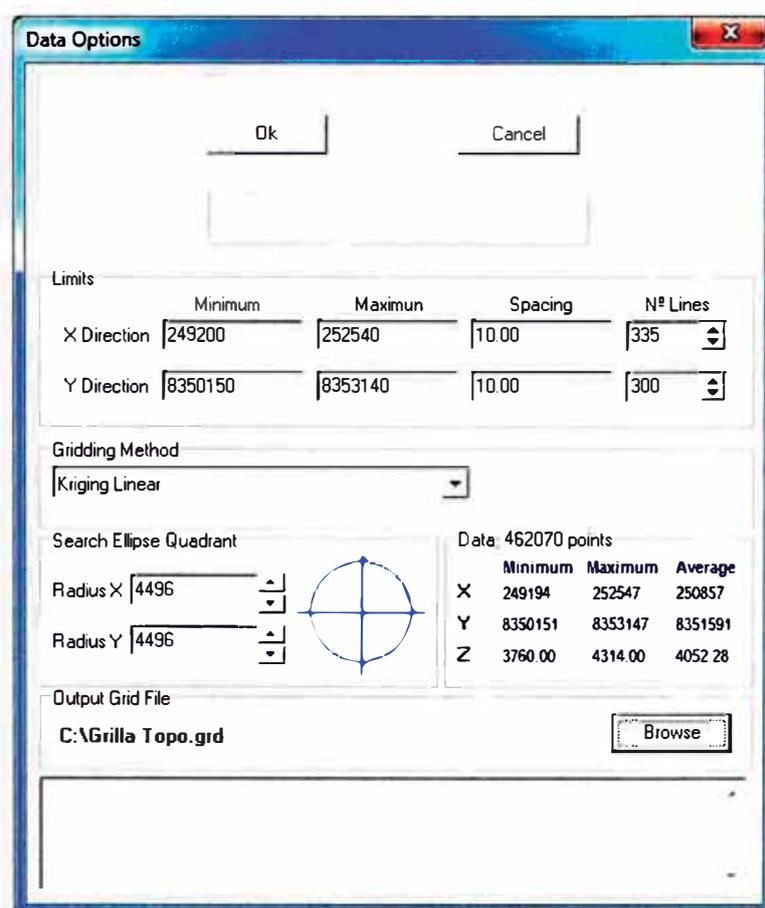


Figura N° 11.- Creación de la malla GRID

Posteriormente podremos cargar el grid y visualizar la topografía en curvas de nivel tal como se muestra en la Figura 11.

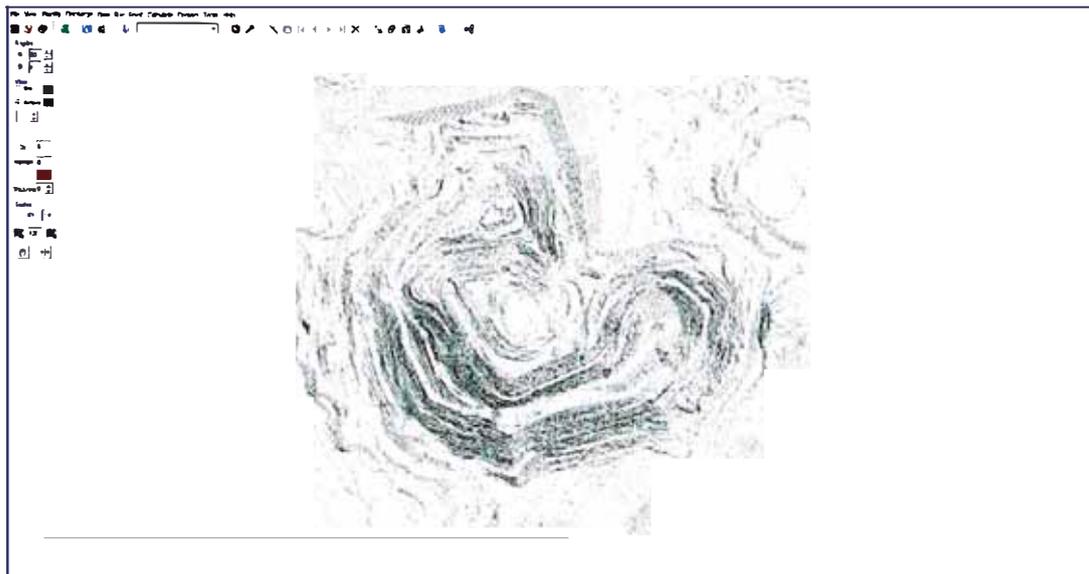


Figura N° 12.- Topografía en Curvas de Nivel

### 3) Definir los puntos de Recuperación de Aguas

Estos puntos deben estar ubicados lógicamente en la laguna del depósito donde se ubicarán las torretas o barcazas que son estructuras que permiten la recuperación del agua de la laguna. Por lo tanto indicamos los puntos probables de la ubicación de la torreta o barcaza de bombeo desde la cota más baja hacia la cota más elevada (respetar esa secuencia). Ref. Point >> Stream Points.

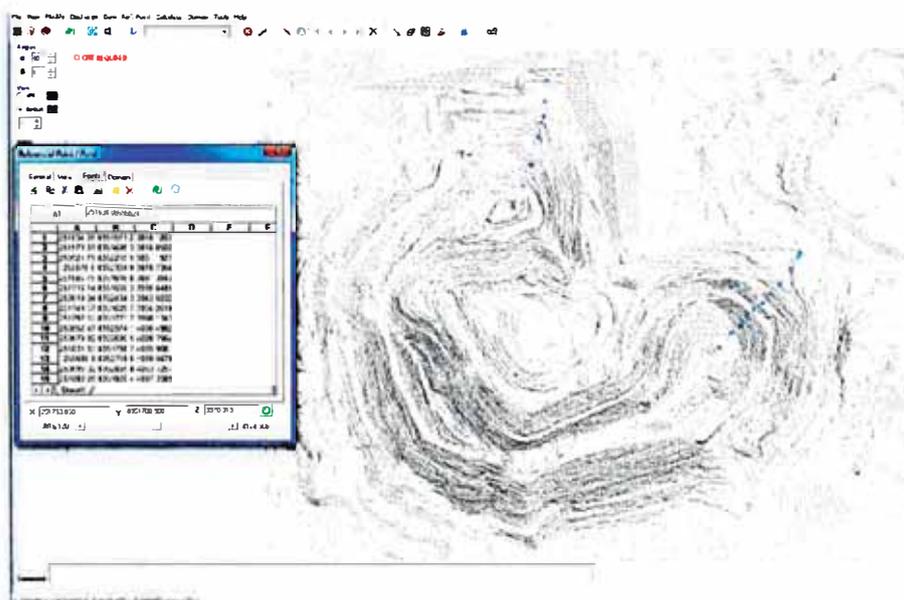


Figura N° 13.- Puntos Probables de la ubicación de las barcazas o torretas

#### 4) Definir los puntos de descarga (spigots)

Estos puntos hacen referencia a los puntos sobre los cuales se realiza la depositación de los relaves.

Por lo tanto indicamos los puntos probables de los puntos de descarga desde la cota más baja hacia una cota más elevada o final (respetar esa secuencia), tal como se muestra en la figura 14 y figura 15 Discharge>> New



Figura N° 14.- Creación de un punto de descarga (spigot)

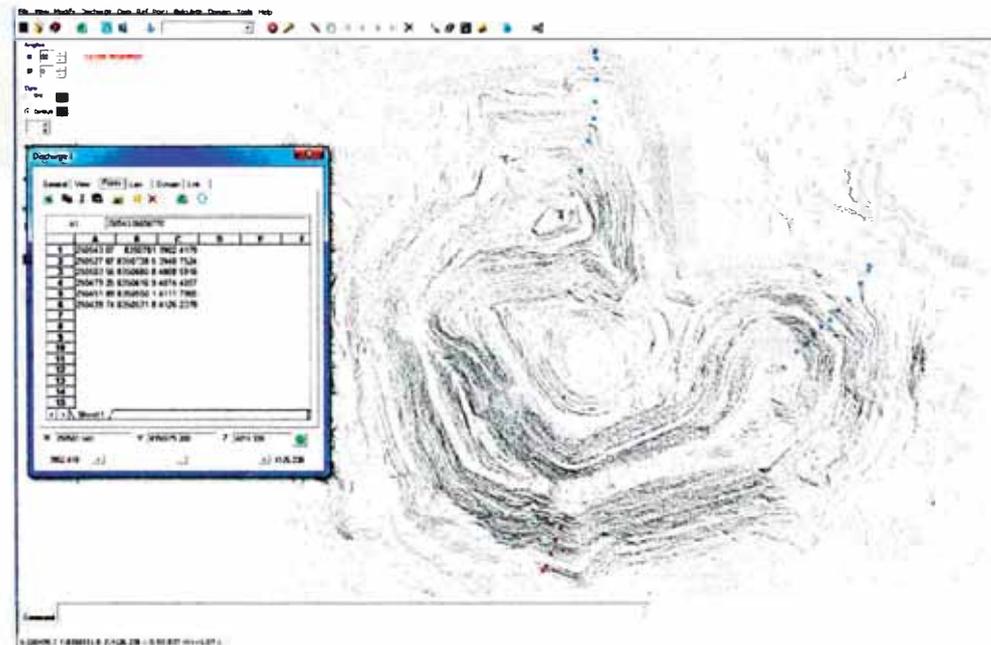


Figura N° 15.- Se define un punto de descarga (Zona Sur)

Evidentemente en la depositación de relaves es común considerar más de un punto de descarga, la secuencia para definir un nuevo punto es similar a los pasos anteriormente mencionados. Ver figura 16.

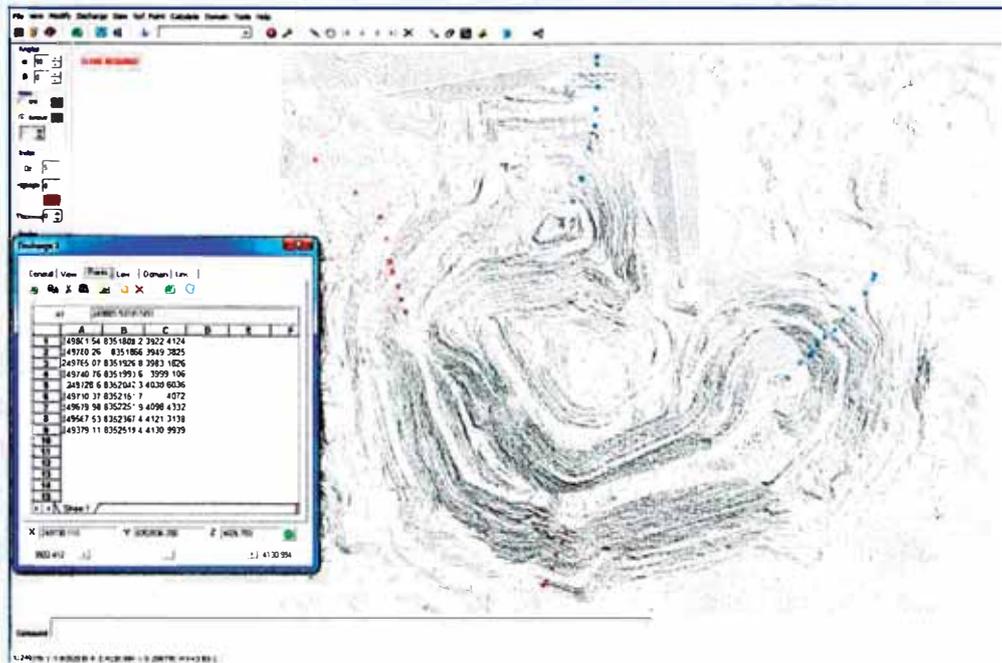


Figura N° 16.- Se define un nuevo punto de descarga

- 5) Definir el "Dominio" para poder modelar la depositación de los relaves es importante, ya que este definirá los límites dentro del cual el programa realizará las simulaciones. Ver Figura 17 y Figura 18.

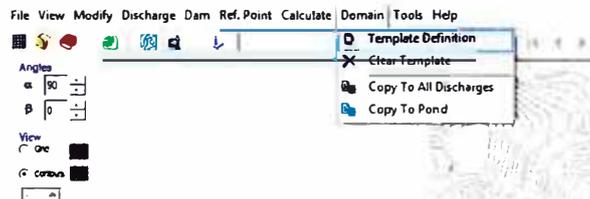


Figura N° 17.- Se define el dominio, límites de la simulación

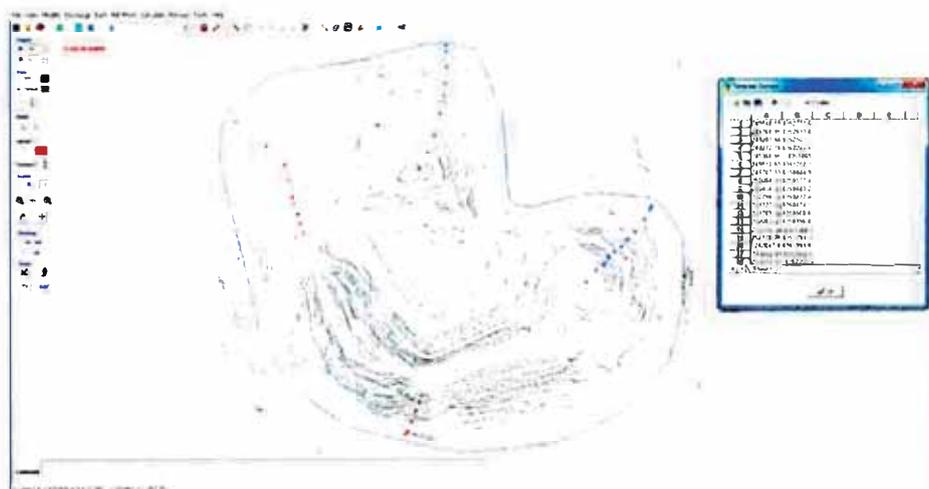


Figura N° 18.- Se define el contorno del dominio

Una vez definido los límites del dominio debe extenderse tanto para las descargas de relaves como para la ubicación de la laguna tal como se muestra en la Figura 19.

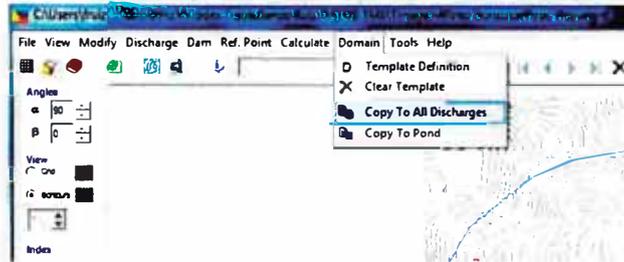


Figura N° 19.- Se establece el dominio

6) Adicionalmente debe definirse los parámetros de la depositación de relaves, en nuestro caso se define dos pendiente ya que esta situación es la que más se adapta a la mayoría de situaciones, tal como se muestra en la Figura 19. Cabe mencionar que en este punto podemos evaluar cómo afectaría una pendiente distinta a la asumida, obteniendo de esta manera diversos escenarios.

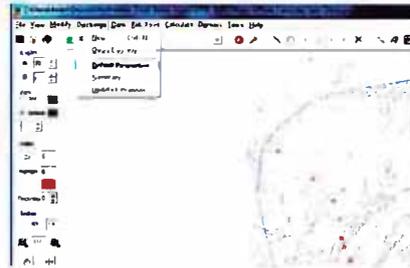


Figura N° 20.- Definición de los parámetros del relave

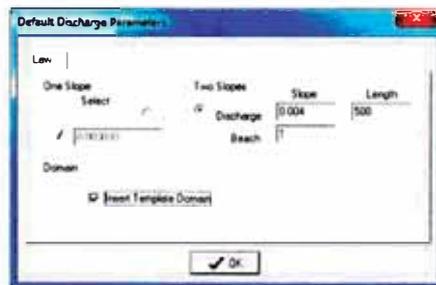


Figura N° 21.- Definición de los parámetros del relave

7) Una de las bondades de este programa, es que nos proporciona rápidamente los datos necesarios para armar una curva de llenado, es decir lo que nos permitirá generar una gráfica elevación vs capacidad de almacenamiento del depósito. Ver Figura 22.

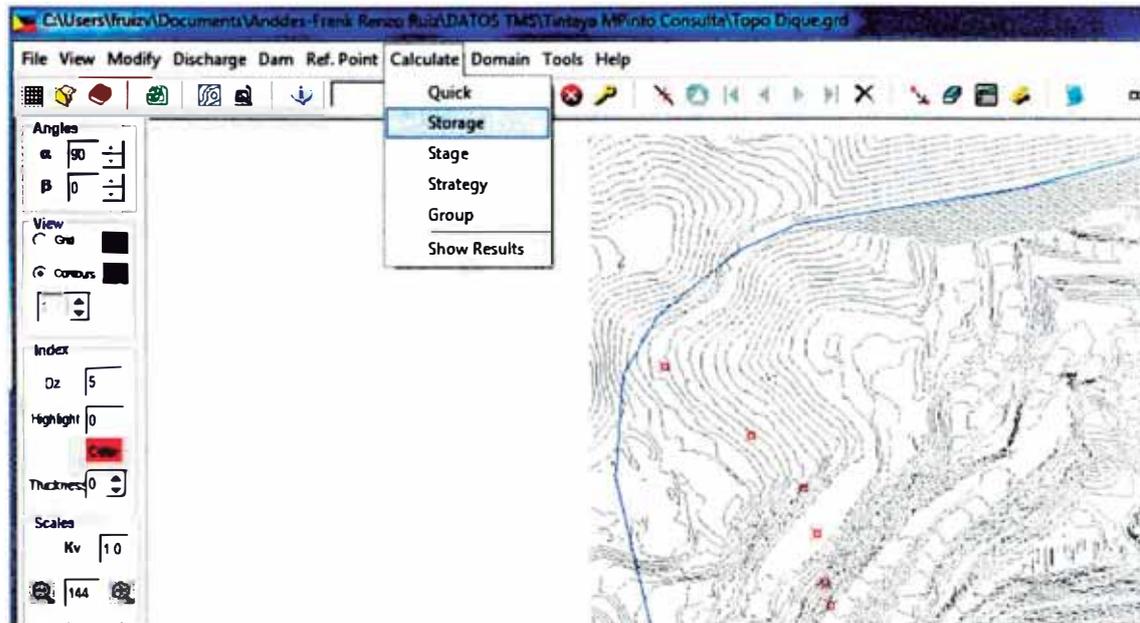


Figura N° 22.- Cálculo de la Curva de Llenado

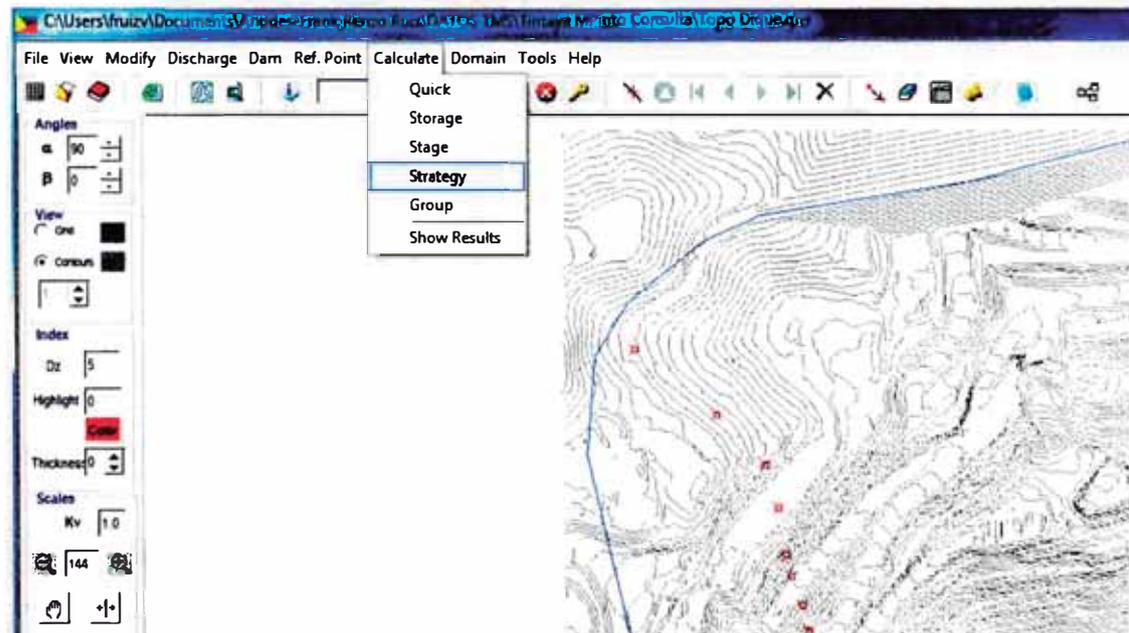


Figura N° 23.- Modelamiento de la estrategia (plan) de llenado del depósito

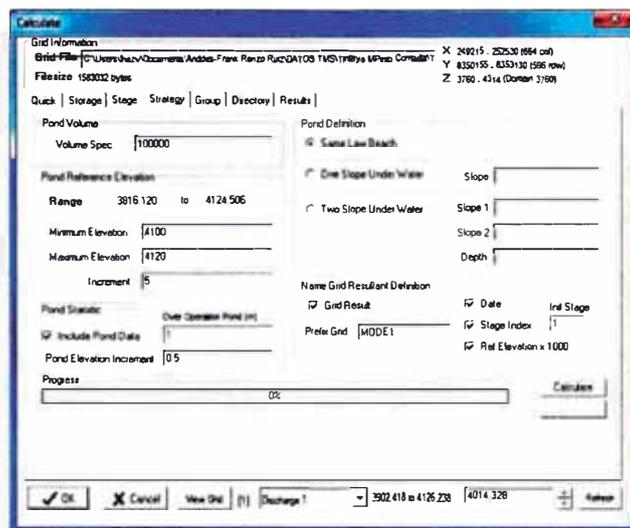


Figura N° 24.- Modelamiento de la estrategia, parámetros

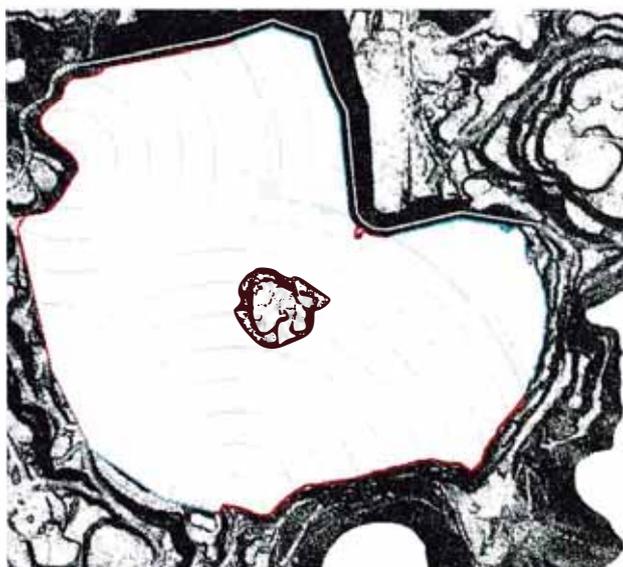


Figura N° 25.- Simulación según los parámetros planteados

### 3.3 CASO 1: DISPOSICIÓN DE RELAVES EN TAJO

El ejemplo mostrado en este caso está diseñado en base a los criterios anteriormente mencionados, con el cual se pretende mostrar un criterio para la estrategia de llenado en tajos.

A continuación se describirá la secuencia de llenado de relaves en el tajo, donde se aprecia la ubicación dinámica de la laguna.





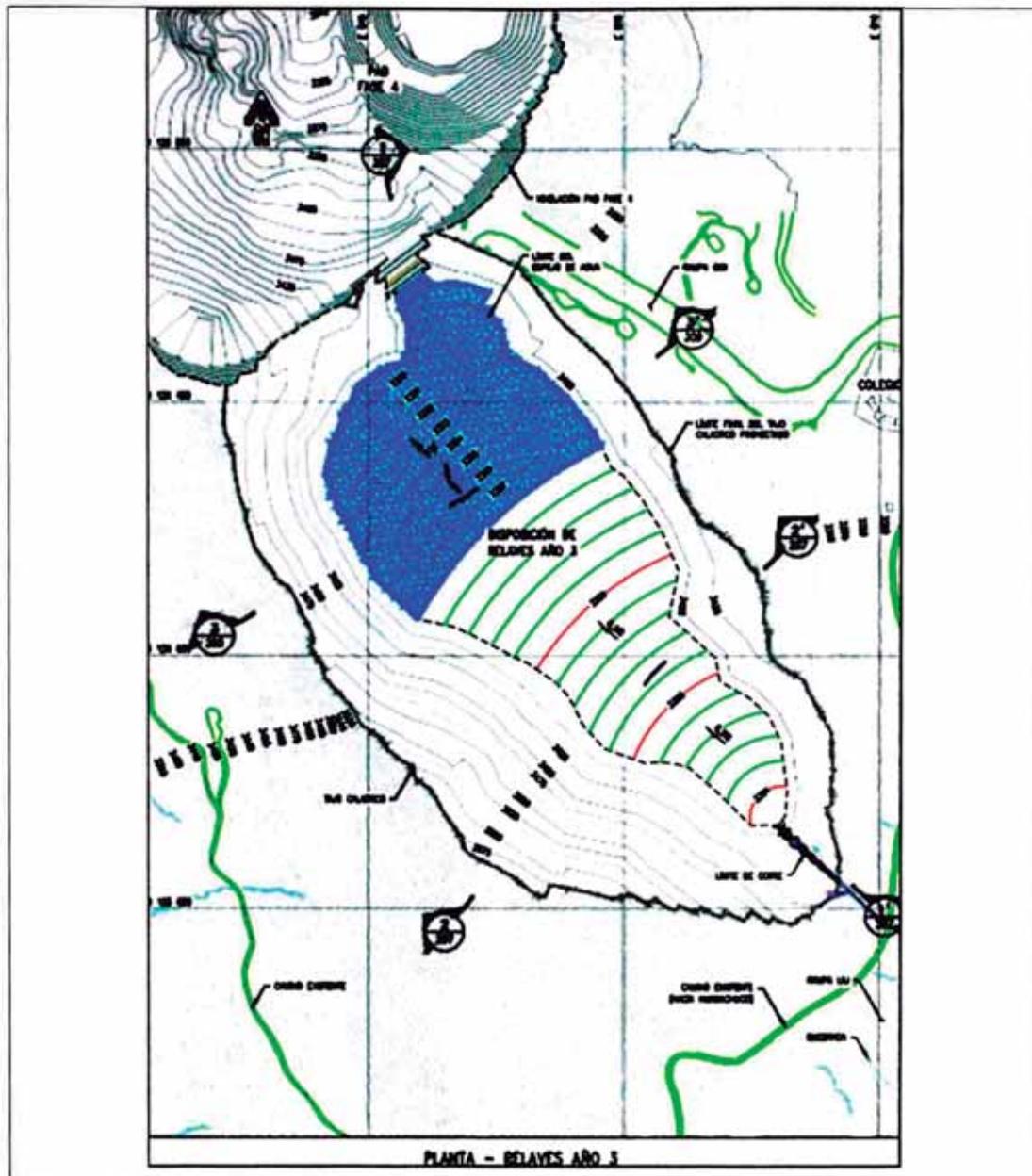


Figura N° 28.- Depositación Año 3, Tajo A

La descarga de relaves se realiza desde la zona sur del Tajo A, se mantiene 1 solo punto descarga. La laguna se ubica al nor-oeste del tajo, durante este lapso de tiempo la ubicación de la laguna se mantiene invariable.

- $V_{laguna} = 531\,000\text{m}^3$
- Capacidad de Relaves = 18,10 Mt

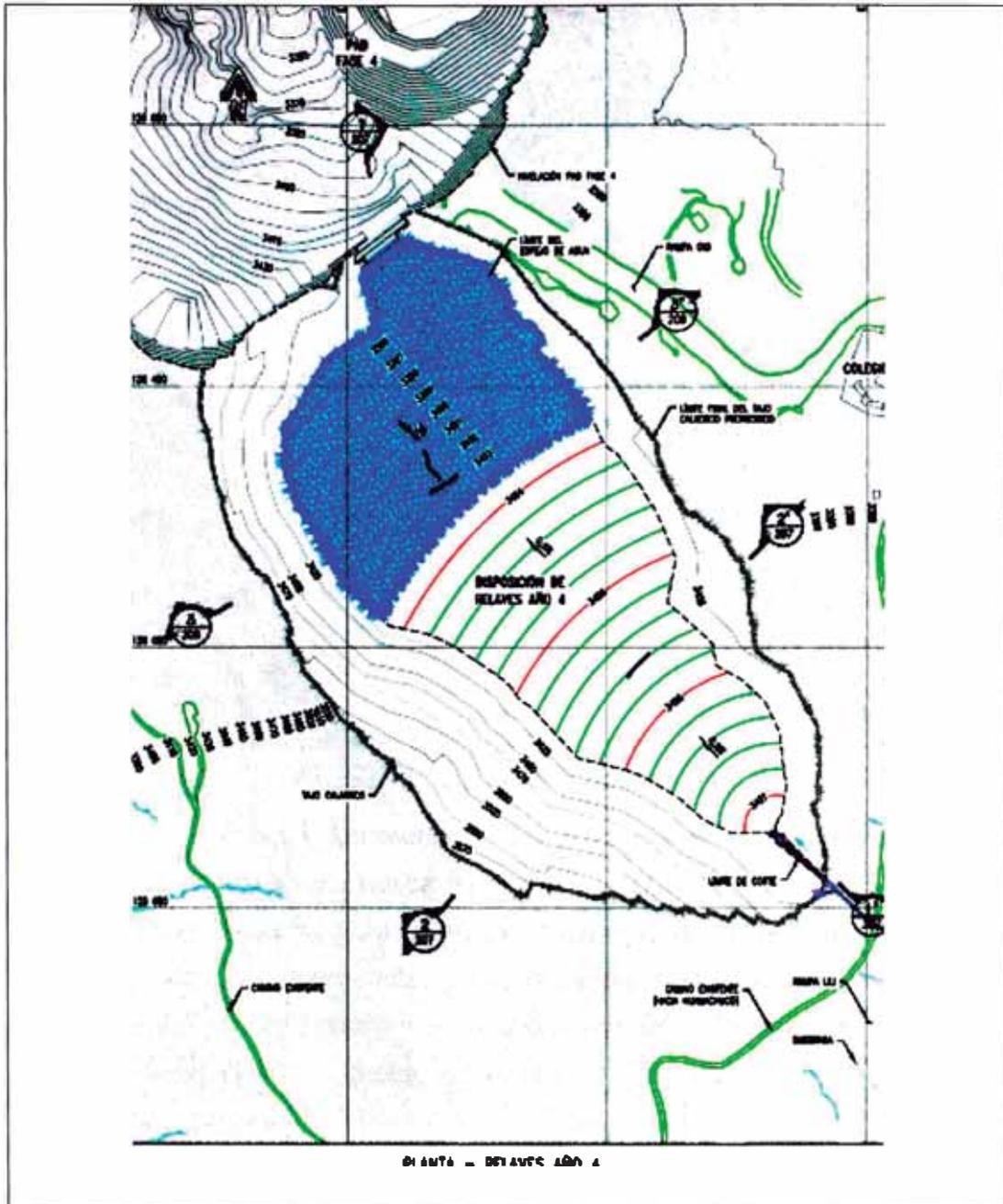


Figura N° 29.- Depositación Año 4, Tajo A

La descarga de relaves se realiza desde la zona sur del Tajo A, se mantiene 1 solo punto descarga. La laguna se ubica al nor-oeste del tajo, durante este lapso de tiempo la ubicación de la laguna se mantiene invariable.

○  $V_{laguna} = 750\,000\text{m}^3$

Capacidad de Relaves= 24,60 Mt

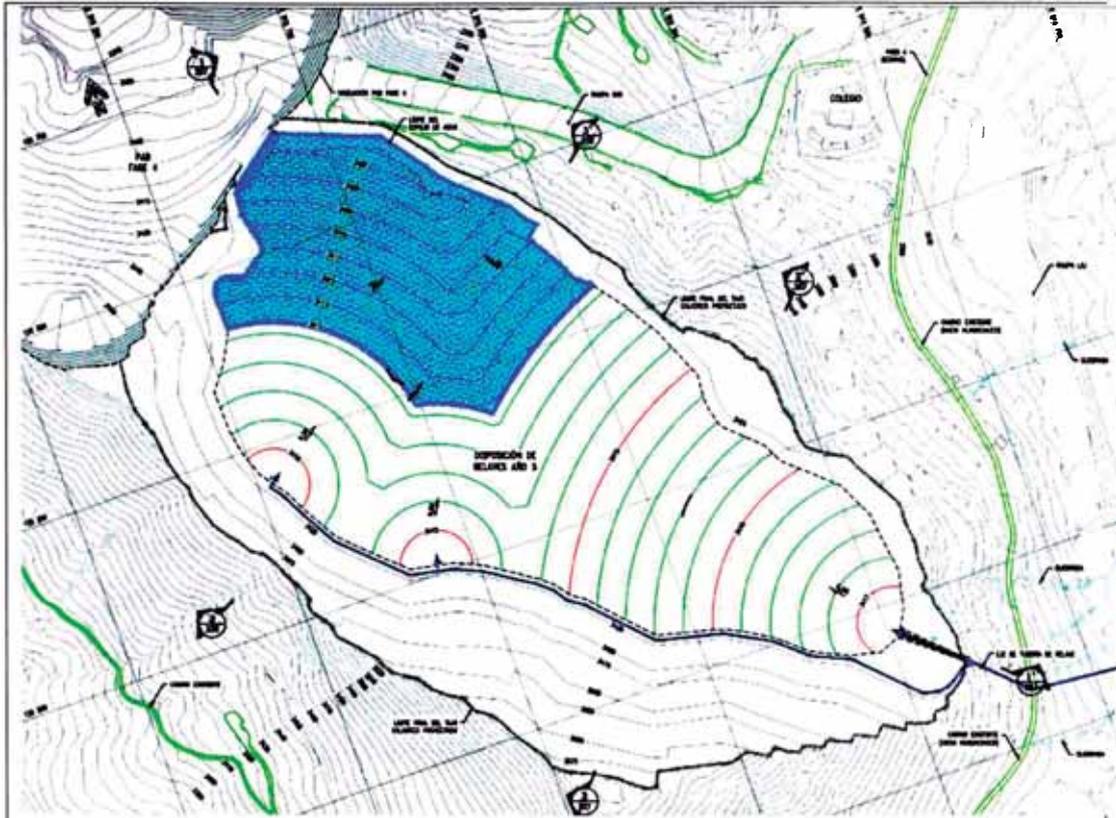


Figura N° 30.- Depositación Año 5, Tajo A

La descarga de relaves se realiza desde 3 puntos de descarga con distintas elevaciones, la estrategia busca formar la laguna en la zona norte del Tajo, debido a que ante un evento extremo el rebose de la laguna pueda ser evacuado por el vertedero de emergencias y conducido por medio de canales hacia una quebrada natural, adicionalmente esta configuración permitirá conformar una superficie adecuada para la etapa de cierre.

○  $V_{laguna} = 531\ 000\text{m}^3$

Capacidad de Relaves= 39,36 Mt

Durante la etapa de cierre se colocará un revestimiento de suelo de baja permeabilidad de espesor de 0,5m, material drenante de 0,3m y finalmente una cobertura orgánica de 0,2m que permitirá reducir el impacto visual del depósito y encapsular los relaves.

### 3.4 CASO 2: DISPOSICIÓN DE RELAVES EN VALLE

El ejemplo mostrado en este caso está diseñado en base a los criterios anteriormente mencionados, con el cual se pretende mostrar un criterio para la disposición de relaves en valle.

La disposición de relaves en valle tiene algunas variables básicas a tener en cuenta:

- Laguna de decantación, se recomienda que la laguna se encuentre distanciada de los dique de retención con la finalidad de no comprometer la estabilidad de toda la estructura.
- Pendientes de depositación, las pendientes asumidas durante el estudio, podrían ser distintas a las reales, por lo que podrían alterarse la concepción de las fases
- Producción de relaves, si a lo largo de la operación se altera la producción de relaves de manera significativa, el estudio deberá actualizarse.
- Fases, tal como se mencionó anteriormente las fases podrían ser actualizadas con la finalidad de

A continuación se describirá la secuencia de llenado de relaves en el tajo, donde se aprecia la ubicación dinámica de la laguna de decantación.



Figura N° 31.- Depositación Etapa 1

La descarga de relaves se realiza desde la zona este buscando formar la laguna en la zona contraria (oeste) del depósito

Capacidad de Relaves= 1,51 Mm<sup>3</sup>

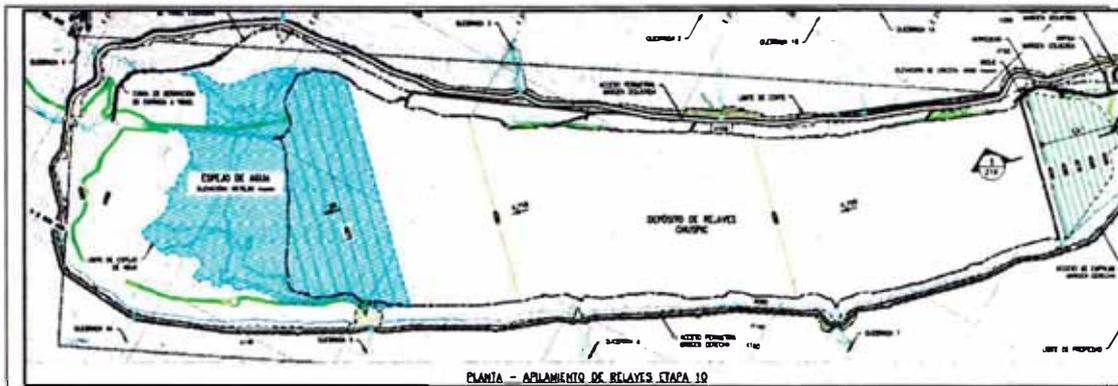


Figura N° 32.- Deposición Etapa 10

La descarga de relaves se ha mantenido invariable con respecto a la estrategia de llenado, debido a que la topografía permite el crecimiento del depósito sin necesitar la construcción de otro dique

Capacidad de Relaves= 8,28 Mm<sup>3</sup>

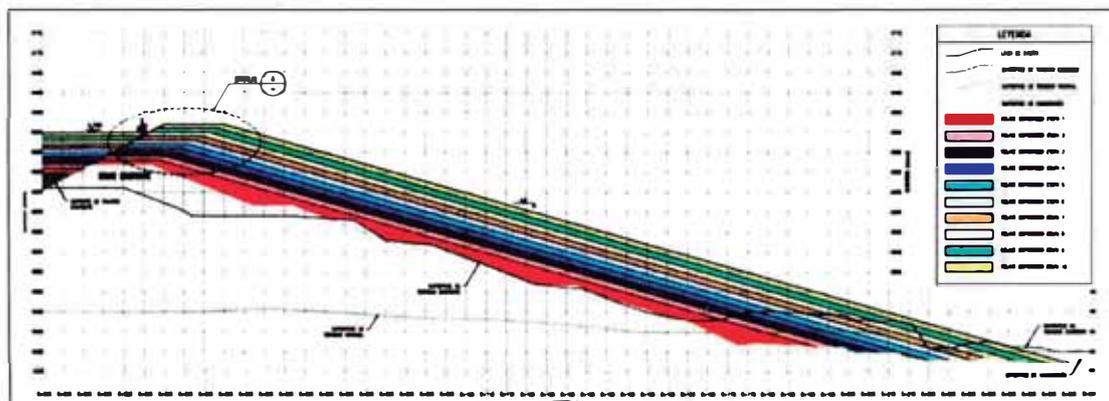


Figura N° 33.- Etapas del dique

En la sección mostrada se observa el crecimiento del depósito a lo largo de las 10 etapas planteadas para el recrecimiento, así se puede apreciar claramente que el depósito crece mediante el método aguas abajo.

## CAPÍTULO IV : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- La estrategia para la disposición de relaves es fundamental para el planeamiento y operación de todo depósito de relaves y debe ser llevada a cabo con rigurosidad a fin de lograr los objetivos planteados en la etapa de estudio.
- Según la experiencia en ciertas minas del Perú se hace evidente que algunas no han realizado la disposición de relaves según la estrategia de llenado planteada en su respectivo estudio, tal omisión puede conllevar a posibles problemas que ponen en peligro la operación y estabilidad del depósito.
- Ante una eventual falla de un depósito de relaves, devendrían inmensurables problemas económicos, ambientales, sociales y posibles pérdidas humanas, el principal problema ante un eventual incidente de esta naturaleza pondría en peligro posibles explotaciones mineras ante la pérdida de apoyo social.
- El manual de operación es el documento que permite definir/determinar las funciones de cada trabajador/operador de un depósito de relaves por lo tanto dicho documento representa una guía y debe ser estrictamente difundido entre el personal operativo.
- Siempre se requerirá un estudio de balance de aguas el cual permitirá determinar el volumen de agua que podría recuperarse desde la laguna del depósito.
- La finalidad de recuperar el agua desde la laguna es la de recircular este recurso y disminuir la demanda dentro del sistema.
- El programa TMS permite modificar algunas variables para la disposición de relaves tales como: ubicación de los puntos de descarga, pendiente subaérea y subacuática. Esto permitirá predecir distintas ubicaciones para la laguna del depósito y por lo tanto proponer distintas estrategias de llenado.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que la disposición de relaves ubique a la laguna del depósito lo más lejos posible de los diques de retención, sobre todo si alguno de los diques está conformado con relave grueso, de esta manera podría evitarse posibles fallas.
- Los diques conformados con relleno estructural, que debido a ciertas condiciones se proyectasen para estar en contacto con la laguna, deberán estar debidamente revestidos e impermeabilizados hacia la cara interior (aguas arriba)
- La pendiente subaérea y subacuática son criterios sensibles que podría modificar las fases y disposición de los relaves (estrategia de llenado), por lo cual se recomienda realizar un levantamiento topográfico y una batimetría con la finalidad de determinar las pendientes durante la operación, y verificar si estos valores son aproximadamente similares a los considerados en la etapa de estudio.
- Se recomienda que ante la posibilidad de que las pendientes subaéreas y subacuáticas difieran en valor de manera significativa respecto a las consideradas en el estudio, se realice una actualización de la disposición de relaves (estrategia de llenado), esto a fin rediseñar las fases de operación.
- Cuando los relaves sean dispuestos en tajos, se recomienda revestir la superficie con el fin de evitar contaminar los flujos provenientes de los acuíferos.
- Se recomienda no recrecer los depósitos de relaves por medio del método aguas arriba, por ser este tipo de recrecimiento vulnerable ante algún evento sísmico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Fourie, A. B. y Gawu, S.K.Y., "The validity of laboratory flume data for predicting beach slopes of thickened tailings deposits" Paste 2010.
- Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros, Dirección General de Asuntos Ambientales, Ministerio de Energía y Minas del Perú, 1995.
- Henriquez J., Vandervoort A. y Simms P. "Imaging and Modelling of Flows of Gold Paste Tailings During Deposition – Laboratory Study and Field Scale Predictions". Paste 2009.
- Lara J.L., Pornillos E. y Loayza C. "The application of highly dewatered tailings in the design of tailings storage facilities – Experience in mining projects in Peru" Proceedings Tailings and Mine Waste, Colorado, Estados Unidos, 2012.
- Li, Allen "Prediction of tailings beach slopes and tailings flow profiles", Paste 2011, proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Perth, Australia, 2011.