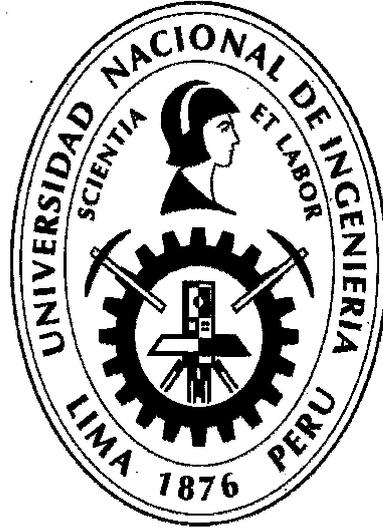


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**“ANÁLISIS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y LA
ESTABILIDAD DEL BOTADERO DE TUCUSH”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

WYLAR MANUEL MOYONERO JORDAN

ASESOR

Dra. DIANA LUCIA CALDERON CAHUANA

LIMA - PERÚ

2021

CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
PRÓLOGO	5
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS	8
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.2 PROBLEMÁTICA	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.4 HIPÓTESIS	12
CAPITULO II: ASPECTOS GENERALES DEL EMPLAZAMIENTO	13
2.1 UBICACIÓN.....	13
2.2 FISIOGRAFÍA DEL EMPLAZAMIENTO.....	13
2.3 CLIMA E HIDROLOGÍA.....	17
2.4 SISMICIDAD.....	19
2.5 GEOLOGÍA SUPERFICIAL	19
2.6 GEOLOGÍA DEL LECHO ROCOSO DEL VALLE DE TUCUSH.....	23
CAPITULO III: ASPECTOS GEOTÉCNICOS	25
3.1 EXPLORACIÓN DE CAMPO.....	25
3.2 ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO	27
3.2.1 Ensayos de Campo.....	27
3.2.2 Ensayos de Laboratorio	27
3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
CAPITULO IV: CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL BOTADERO DE TUCUSH	29
4.1 DEFINICIÓN DE BOTADERO DE DESMONTE	29
4.1.1 Características Del Desmonte Para El Botadero Tucush	29
4.2 CLASIFICACION DE BOTADEROS	30
4.2.1 Tipos de Botaderos de Desmonte	30
4.3 FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE UN BOTADERO DE GRAN ALTURA.....	34
4.3.1 Configuración Del Botadero	34
4.4 PLAN DE DESCARGA EN EL BOTADERO	38
CAPITULO V: EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL BOTADERO	39
5.1 EVALUACIONES DE ESTABILIDAD.....	39
5.2 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD	44
5.3 RESULTADOS DE ANÁLISIS BIDIMENSIONALES	45
5.4 ANÁLISIS DE DERRAME DE MATERIAL DE DESLIZAMIENTO	46
5.5 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD DE DERRAME.....	47
5.6 RESULTADOS	48
5.7 LIMITACIONES DEL DISEÑO	49
5.8 CONCLUSIÓN.....	49
CAPITULO VI: CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL BOTADERO DE TUCUSH	50
6.1 CONSTRUCCIÓN DEL BOTADERO DE TUCUSH	50
6.1.1 Secuencia Constructiva del Botadero Tucush.	50
6.1.2 Distribución del Material y Avance de la Cresta.....	51
6.1.3 Factores Topográficos a Considerar Durante la Construcción del Botadero Tucush.....	52

6.1.4	Terrazas y Estructuras Complementarias para Mejorar la Fundación	53
6.1.5	Consideraciones para diseñar Bermas de Impacto Botadero Tucush	54
6.2	INSPECCION GEOTECNICA DE BOTADEROS	55
6.3	CARACTERIZACIÓN DE BOTADEROS FRENTE DE DESCARGAS ACTIVOS	56
6.3.1	Valoración del Riesgo Durante la Caracterización	57
6.3.2	Sistema de Clasificación Geotécnica Aplicada a la Construcción de Botaderos de Gran Altura	57
6.3.3	Objetivo de la Calificación de Botaderos de gran altura	57
6.3.4	Calificación de Botaderos	62
6.3.5	Control de la Calidad del Material	63
6.3.6	Ajuste de Descargas en el Botadero	64
6.3.7	Resumen y Consideraciones Principales del Sistema de Clasificación	65
6.4	CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCION DEL BOTADERO TUCUSH	66
6.4.1	Remoción de Suelos Orgánicos y Otros Suelos Débiles	66
6.4.2	Vertido o Descarga Direccional	67
6.4.3	Colocación Selectiva del Material	67
6.4.4	Drenaje y Escorrentía Superficial	68
6.4.5	Monitoreo e Instrumentación Geotécnica	68
6.4.6	Extensómetros Digitales	69
6.4.7	Extensómetros Manuales	71
6.4.8	Programa del Extensómetro Digital OREAD de SlideMinder	73
6.4.9	Niveles de Alarma y Criterios de Cierre del Botadero Tucush	76
6.5	VALIDACIÓN DE LA GEOLOGÍA DEL LECHO ROCOSO	78
6.6	MEJORA DE LA FUNDACIÓN Y MANEJO DE ESCOMBROS	78
6.7	MANEJO DE AGUAS SUPERFICIALES	80
6.7.1	Hidrología	80
6.7.2	Control de Sedimentos	81
6.7.3	Estructuras de Manejo de Aguas	81
6.7.4	Poza de Decantación	82
6.7.5	Producción de Sedimentos	83
6.7.6	Zanja de Captación, Canales de Afluentes y Estructuras de Descarga	83
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	88
	BIBLIOGRAFÍA	90
	Anexo A: Secuencia constructiva del Botadero de Tucush	91
	Anexo I: Planos de Geología, Línea Sísmica y Secciones para Análisis de Estabilidad	96
	Anexo II: Resultados del Análisis de Estabilidad	98

RESUMEN

Para la construcción de estructuras como botaderos de gran altura, muchas veces este tipo de infraestructura es necesaria para determinar la viabilidad de un proyecto minero, esto debido a los altos costos operativos que implica el incremento de las distancias de acarreo cuando se plantean botaderos del tipo ascendentes que se encuentran a mayor distancia. Este trabajo tiene por finalidad describir las buenas prácticas operativas realizadas para el botadero, difundir el uso de tecnología para su correcta aplicación e interpretación durante la construcción de botaderos de una altura mayor a los 200 m.

El desarrollo tecnológico en la Ingeniería Geotécnica ha sido importante para diseño y construcción de Grandes Botaderos de Escombros, logrando mejorar el manejo de los materiales estériles producidos por la minería superficial durante la extracción de los minerales, permitiendo depositar grandes volúmenes de material estéril con altos estándares de seguridad.

Los botaderos de Gran altura deben ser desarrollados bajo condiciones de seguridad aceptables, desde el punto de vista geotécnico se debe garantizar la estabilidad de los Grandes Botaderos de Escombros a corto, mediano y largo plazo generando procesos de vertido de materiales, mediante la metodología de descargas al vacío o realizando corte y relleno una plataforma tal que no se afecte a los procesos medioambientales para evitar posteriores agentes de contaminación.

El presente trabajo para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil trata temas relacionados con las definiciones generales, la elección y preparación del emplazamiento, los análisis de estabilidad y los resultados, así como el proceso constructivo del botadero de Tucush en base a los resultados de la investigación del emplazamiento y los análisis de estabilidad.

ABSTRACT

Many times, the construction of structures such as high-rise dumps is necessary to achieve the viability of a mining project, this due to the high operating costs that the increase in haulage distances implies when raising dumps of the ascending type that are located at a greater distance are considered. The purpose of this work is to describe the good operating practices carried out for the dump, to disseminate the use of technology for its correct application and interpretation during the construction of dumps higher than 200 m.

Technological development in Geotechnical Engineering has been important for the design and construction of Large Rubble Dumps, managing to improve the handling of sterile materials produced by surface mining during mineral extraction, allowing to deposit large volumes of sterile material with high safety standards.

High-rise dumps must be developed under acceptable safety conditions, from the geotechnical point of view the stability of the Large Rubble Dumps must be guaranteed in the short, medium and long term, generating material dumping processes, through the discharge methodology vacuum or cutting and filling a platform such that environmental processes are not affected to avoid subsequent contamination agents.

The present work to apply for the Professional Title of Civil Engineer deals with topics related to the general definitions, the choice and preparation of the site, the stability analysis and the results, as well as the construction process of the Tucush landfill based on the results of the site investigation and stability analysis.

PRÓLOGO

La mayoría de los yacimientos que se encuentran morfológicamente en el Perú, se observan en once zonas dentro de las cuales se encuentran las cordilleras, los valles, las sierritas y llanuras. Los yacimientos mineros cuentan con una mineralización metálica particular en cada una de ellas, por efecto del Tectonismo de Placas de convergencia conocido como Placa de Nazca y Placa de América que dio lugar a la formación de la Cordillera de los Andes, a su magmatismo y a su mineralización.

Este informe resume los resultados de las evaluaciones realizadas para analizar las características geotécnicas, para el Botadero de Desmonte Tucush Ampliado y brinda criterios de diseño geotécnico

Cuando un yacimiento minero se ubica en zonas con morfología accidentada, como es el caso del yacimiento que dio lugar al estudio del botadero de Tucush, En este trabajo se ha estudiado el proceso constructivo de un botadero de 560 m de altura, detallando en 4 capítulos los trabajos, las medidas de control ante la activación de fallas.

En el capítulo I se muestra el resumen del trabajo presentado en que indica la problemática y limitaciones necesarias para el desarrollo de la construcción del botadero de Tucush, los objetivos generales y específicos, y la implementación de un sistema de clasificación geotécnica de botaderos, la hipótesis utilizada para realizar la sectorización haciendo el uso de factores de seguridad como resultado del análisis de estabilidad.

En el capítulo II se presenta el marco teórico usado como base para la elaboración del presente informe de suficiencia, en este capítulo se realizó el estudio del empujamiento del botadero, los materiales encontrados en la fundación así como las investigaciones realizadas en el campo junto con el detalle de las pruebas realizadas a los materiales, definición y clasificación de botaderos de desmonte, también describe los factores que afectan a la estabilidad del mismo.

El capítulo III presenta los análisis de estabilidad realizados a 4 secciones evaluadas, supuestos de resistencia al corte y sobre aguas subterráneas utilizados para el análisis, así como los criterios de aceptabilidad y los resultados del análisis bidimensional, de igual forma el capítulo contempla el análisis del derrame del material.

El capítulo IV se detalla los criterios para la construcción del botadero de Tucush, la secuencia constructiva, la importancia de la distribución del material y del avance de cresta y de cómo influyen los factores topográficos a este tipo de botaderos, la importancia de estructuras como terrazas y bermas de impacto para mejorar las condiciones de la fundación e incrementar los parámetros y los FS, en este capítulo se desarrolló la importancia de implementar un sistema de caracterización de botaderos en frentes de descargas activos, como se realiza la valoración, el objetivo y la aplicación del sistema durante la construcción del botadero, las consideraciones necesarias para el desarrollo de botadero de Tucush.

La importancia de la remoción del material lacustre, la importancia del vertido direccional, la colocación selectiva del material, la instrumentación geotécnica y el drenaje.

LISTA DE TABLAS

Cuadro 2.1 Cantidades de Precipitación Anual, (Golder, 2007).....	18
Cuadro 2.2 Precipitación Máxima Diaria (Golder, 2007).....	18
Cuadro 2.3 Precipitación Mensual 2001 – 2014 (data obtenida con estaciones meteorológicas in situ).....	18
Cuadro 5.1 Resumen de resultados del Analisis de Estabilidad diseño final del botadero de tucush.....	45
Cuadro 6.1 Muestra los Ajuste Realizados Debido a la Caracterización del Botadero.....	64
Cuadro 6.2 Muestra niveles de alarma iniciales del Botadero de Tucush.....	76
Cuadro 6.3 Niveles de Alarma en el Botadero Tucush en su segunda etapa.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Muestra la forma del Valle de Tucush tipo “U”.....	14
Figura 2.2 – Vista panorámica del Botadero Tucush (2010).....	16
Figura 2.3 – Vista panorámica del talud Nor-Este del valle muy escarpado.....	17
Figura 4.1 Foto Satelital del Botadero Tucush año 2010 (fuente Google earth)..	30
Fig. 4.2 Relleno de Valle (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58).....	31
Fig. 4.3 Relleno de Valle Transversal (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58).....	32
Fig. 4.4 Relleno a Media Ladera (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P.58)	33
Fig. 4.5 Relleno de Cresta (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58)....	33
Fig. 4.6 Relleno Apilados (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58).....	34
Figura 5.1 Secciones de análisis de estabilidad TSE 1, TSE 5, TSE 6 y 6A.....	41
Figura 6.1 inicio de los trabajos del Botadero Tucush. (relleno a media ladera, año 2006).....	51
Figura 6.2 Secuencia para el Avance de Botaderos en Terrenos Empinados....	53
Figura 6.3 Muestra un ejemplo de una Bermas de Impacto.....	55
Figura 6.4 Muestra las grietas de Tracción (asentamientos) presentadas en las plataformas.....	59
Figura 6.5 Muestra la sectorización del botadero y la instrumentación geotécnica.....	60
Figura 6.6 Muestra la formación de los ángulos de taludes y taludes combados.....	62
Figura 6.7 Muestra las descargas acumuladas por turno durante el año 2010...65	
Figura 6.8 muestra los sectores con mayores potencias para ser removidas en la base del botadero.....	67
Figura 6.9 muestra los sectores donde se instalaron los piezómetros en la base del botadero.....	69
Figura 6.10 Instalación de un extensómetro digital en el botadero (Fuente SlideMinder).....	70
Figura 6.11 Extensómetro digital. Fuente (Manual Slideminder).....	71
Figura 6.12 Extensómetro manual. Fuente (Cia. Minera Antamina CMA).....	72

Figura 6.13 Extensómetro manual forma de lectura de desplazamientos. Fuente (CMA).....	73
Figura 6.14 muestra la gráfica de desplazamiento de un extensómetro digital.....	74
Figura 6.15 Red de extensómetros digitales (Fuente Slideminder).....	76
Figura 1.-Diseño final de la berma de impacto.....	93
Figura 2.- Conformación de capas para consolidar material lacustre.....	93
Figura 3.-La figura muestra la secuencia de consolidación del material Lacustre.....	94
Figura 4.- Confinamiento del material lacustre en la capa de 10 m.....	94
Figura 5.- La figura muestra el diseño final del botadero de Tucush.....	95
Figura 6.-La figura muestra la propuesta del avance del botadero.....	95
Figura 7.-La dirección de avance del botadero.....	96
Figura 8.-Avance de botadero y conformación de nuevas plataformas.....	96
Figura 9.-: Vista en planta de las secciones analizadas (TSE 1, TSE 5 y TSE 6).....	100
Figura 10.- Resumen de FS estático de la sección TSE 1.....	100
Figura 11.- Resumen de FS pseudo-estatico de la sección TSE 1.....	101
Figura 12.- Resultados del análisis Circular para un avance de cresta de 35 m de la sección TSE 5.....	101
Figura 13.- Resultados del análisis No Circular para un avance de cresta de 35 m de la sección TSE 5.....	102
Figura 14.- Muestra los resultados del análisis Circular para diferentes avances de cresta de la sección TSE 5.....	102
Figura 15.- Configuración de botadero presenta el peor de los casos entre las secciones analizadas por estabilidad (TSE 6 y TSE 6ª).....	103
Figura 16.- Muestra el resumen de FS para condiciones estáticas y pseudo-estático.....	103
Figura 17.- Análisis del flujo del material para las diferentes secciones.....	104
Figura 18.- Muestra el resumen de la sección TSE 6A.....	104
Figura 19.-: TSE 6A Se aprecian FS mayores a 1.4 bajo condiciones estáticas y FS mayores a 1.0 pseudoestáticas.....	105
Figura 20: Perfiles TSE 1, 5, 6 Y 6A, se realizó la simulación del flujo.....	105

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La explotación de materiales rocosos es habitual en las actividades de extracción en minera superficial. Para explotar los yacimientos minerales a cielo abierto es necesario mover grandes volúmenes de material estéril (roca de menor calidad a la requerida o sin ley) para luego ser vertido y almacenado en botaderos de escombros.

En los últimos años se han dado importantes avances en la ingeniería geotécnica para el diseño y construcción de grandes botaderos de escombros, mejorando el manejo de los materiales estériles producidos por la minería superficial. Sin embargo, es necesario depositar grandes volúmenes en condiciones de seguridad aceptables, desde el punto de vista geotécnico, garantizando la estabilidad a corto, mediano y largo plazo mediante procesos de vertido de materiales por descargas al vacío o corte y relleno que no afecte al medioambiente evitando posteriores agentes de contaminación.

Este informe resume los resultados de las evaluaciones realizadas para analizar las características geotécnicas, para el Botadero de Desmonte Tucush Ampliado y brinda criterios de diseño geotécnico.

En febrero de 2004, se llevó a cabo un programa complementario de calicatas en el Valle Tucush, con el fin de definir mejor las condiciones de las fundaciones dentro del contorno del Botadero propuesto. Un buen número de calicatas, hallaron un extenso depósito de limo arcilloso firme- duro a arcilla limosa en las inmediaciones del pie del Botadero final propuesto. Se interpretó que dicho depósito tenía un espesor de 10m aproximadamente. Previamente, aguas abajo del pie del Botadero propuesto, se había identificado un extenso depósito de capas de arcilla blanda a firme y turba intercaladas entre si y cuyo espesor aproximado se interpretó en 20m, el botadero Tucush se configuro específicamente para evitar dicho depósito. Esta información se utilizó luego para re-evaluar el diseño del Botadero Tucush y afinar aún más los criterios de diseño desarrollados con anterioridad.

1.2 PROBLEMÁTICA

Durante el proceso de construcción de Grandes Botaderos de Escombros, empleando metodología de descargas al vacío hacia un valle, las plataformas de descargas experimentan deformaciones y fallas durante las primeras etapas de la conformación del botadero, debido a factores como el relieve de los taludes naturales, tipo de material, altura de botadero, fundación, entre otros.

Los botaderos como apilamientos sobre terrenos planos, pendientes muy suaves, simplemente apoyados sobre taludes naturales, a lo largo de quebradas e inclusive a lo largo de crestas, están sujetos a distintos grados de deformación y distintas formas de ruptura.

La consolidación y compactación del material granular, depositado en los botaderos, generan grietas de tracción cuyas magnitudes y velocidad de deformaciones requieren ser monitoreadas con extensómetros digitales durante la construcción del botadero.

Pregunta General:

¿Cómo delimitar los sectores seguros en el proceso constructivo del botadero en estudio, evitando exponer la integridad de los operadores de equipos auxiliares y operadores de camiones CAT 793?

Preguntas Específicas:

¿Existen y son confiables los datos de desplazamiento acumulado obtenidos de los extensómetros digitales para ser usado en el análisis de esta investigación?

¿Las propiedades del material granular haciendo uso de las curvas homotéticas en la representación de ensayos monotónicos y cíclicos en suelos granulares, realizados por la Universidad de Chile para suelos granulares, pueden tomarse como referencia confiable para esta investigación?

¿Qué métodos de cálculo existen para usar y obtener los resultados buscados en la investigación?

1.3 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Realizar el análisis de estabilidad y la evaluación del proceso constructivo del Botadero de Tucush, para lograr descargar al vacío desde un botadero de más de 350 metros de altura, para lograr la viabilidad del proyecto minero, en condiciones de seguridad aceptables y respetando el medio ambiente.

1.1.2 Objetivos Específicos

Implementar un Sistema de Clasificación Geotécnico para valorar las distintas condiciones de un botadero en el cual se considere controlar la calidad de los materiales y la distribución de los mismos.

Demostrar la confiabilidad de los datos de los extensómetros digitales y los extensómetros manuales, comparando los resultados desplazamiento y velocidad incremental de extensómetros manuales y digitales.

1.4 HIPÓTESIS

De acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad del Botadero de Tucush, para el proceso constructivo del botadero de Tucush se plantea realizar una sectorización, delimitando las zonas con (Factores de Seguridad) $FoS > 1$, $FoS < 1$ y sectores con $FoS < 1.3$, para la identificación de las zonas seguras para los equipos de acarreo y empuje, de acuerdo a las etapas constructivas del botadero.

CAPITULO II: ASPECTOS GENERALES DEL EMPLAZAMIENTO

2.1 UBICACIÓN

El Botadero de Desmonte en estudio se ubica en la Cordillera Occidental de los Andes, en la parte Nor-Central del Perú, ubicado en el departamento de Ancash, provincia de Huarí y distrito de San Marcos, a 270 Km. en línea recta al norte de Lima. Huaraz es la ciudad más cercana a la mina y se puede llegar por vuelo directo desde Lima o por carretera en 10 horas. El acceso a la mina de la ciudad de Huaraz es por una vía asfaltada a 3.5 horas de manejo (200km). Sus coordenadas UTM y Geodésicas son:

Este	4, 000 m.
Norte	5, 500 m.
Nivel	4,200 a 4,700 m.
Latitud	9° 32' 11" S
Longitud	77° 03" W

2.2 FISIOGRAFÍA DEL EMPLAZAMIENTO

El Botadero de Tucush, se encuentra dentro de un valle de forma de "U" con orientación noroeste-sureste, al norte y al este del tajo, tal como se muestra en la figura 2.1, El botadero se está construyendo como un terraplén del tipo relleno de valle, enterrándose un tramo considerable del Valle de Tucuch, el alivio vertical en las inmediaciones del botadero propuesto mide 565 m. El área se caracteriza por poseer una topografía muy abrupta con grandes desniveles.

El talud en el lado suroeste del valle es muy escarpado (taludes totales naturales típicamente de 35 a 40°) y relativamente uniforme, con una sección general de forma cóncava. El tramo noroeste de este talud, donde se concentra actualmente vertido el Botadero Tucush, esta típicamente sustentada por una capa fina de suelo de cobertura orgánico subyacente, que recubre a una capa de coluvios y/o suelos residuales. La capa superficial del suelo, típicamente se adelgaza a medida que aumenta la altitud, generando exposiciones discontinuas del manto rocoso meteorizado subyacente de la Formación Celendín, en la parte superior del talud. Estas rocas están compuestas de rocas duras de arcilla, limolitas y margas calcáreas interestratificadas, moderadamente recesivas. Mayormente el rumbo de la estratificación es paralelo al eje del valle y en la mayoría de los afloramientos buza moderadamente hacia el talud. Tanto los coluvios como los

suelos residuales derivan del manto rocoso de la Formación Celendín y tienden a ser de grano relativamente fino. Los suelos coluviales típicamente gradan en forma descendente hacia los suelos residuales, por lo que a menudo es difícil distinguir entre dichos depósitos.

En la parte central del talud suroeste del Valle, el actual Botadero Tucush en el nivel 4463 cubre un abanico coluvial prominente, que se desarrolló como resultado de la inestabilidad del manto rocoso en la parte superior del talud. El pie de este abanico coluvial, que se extiende hasta el fondo del Valle y está compuesto por material predominantemente granular (esto es, arena, grava del tamaño de un guijarro), quedó enterrado por el Botadero Tucush Figura 2.2.

Hacia el sureste, depósitos morrénicos gruesos subyacen a la capa coluvial/orgánica en las partes inferiores del talud suroeste del Valle. Al parecer, estos depósitos morrénicos provienen predominantemente del manto rocoso de la Formación Celendín y se distinguen de los suelos coluviales y residuales, que también provienen del manto rocoso de dicha Formación, por su naturaleza generalmente más densa y clastos más redondeados.

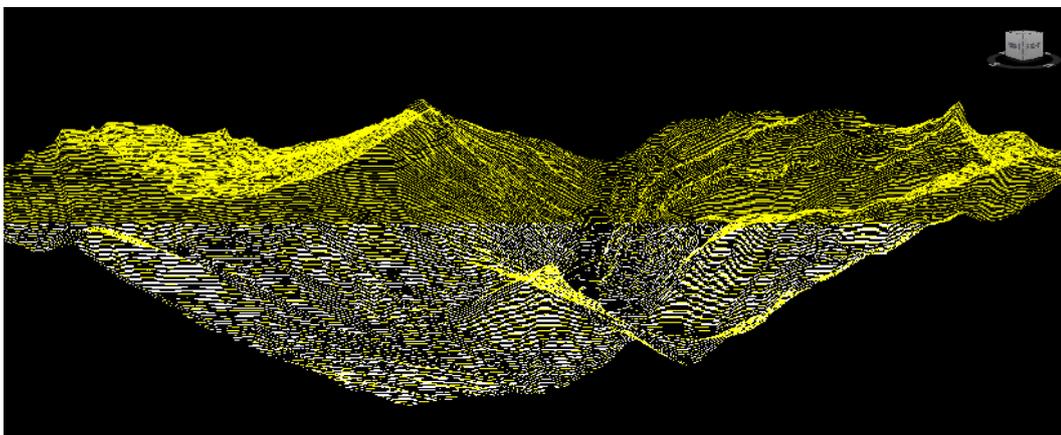


Figura 2.1 – Muestra la forma del Valle de Tucush tipo “U”

El talud del Valle noreste es más irregular que el talud del valle suroeste, está compuesto por bancos de baja pendiente mezclados con segmentos de talud moderadamente empinados a empinados. Los depósitos superficiales tienden a estar compuestos por una capa muy fina de suelo de cobertura orgánico, suelos coluviales y/o residuales. En el tramo medio y superior del talud, el manto rocoso consiste en caliza cárstica de la Formación Jumasha Medio. La parte inferior del talud noreste del Valle tiene rocas calizas subyacentes del Jumasha Superior, que son mucho menos susceptibles al proceso carstico que las del Jumasha

Medio. El contacto entre las unidades del Jumasha Medio y Superior se ilustra en el Anexo 1 (DWG-A1-101 muestra el plano de la geología aplicada a la ingeniería). Entendemos que la ubicación de la roca estéril en el Jumasha Medio cársico, está restringida en el valle de Tucush, debido a la incertidumbre potencial con respecto al caudal de descarga de la lluvia proveniente de la base del Botadero de Desmonte hacia los acuíferos regionales de agua subterránea. La estratificación en el Jumasha buza moderadamente hacia el suroeste (es decir, en dirección al valle). Las exposiciones del manto rocoso son frecuentes y se caracterizan por taludes inclinados y crestas alineadas subparalelamente al eje del valle (Figura 2.3).

El fondo del valle en las inmediaciones del Botadero Tucush final propuesto, tiene alrededor de 150m de ancho y oscila entre altitudes que van desde los 4250 msnm en la divisoria de aguas al noroeste hasta alrededor los 4050 msnm en las inmediaciones del pie del Botadero en el sureste. El gradiente a lo largo del eje del valle en la parte superior del valle (noroeste) es relativamente empinado: aproximadamente 11,0% (6.3°). Una fina capa de suelo de cobertura, suelos coluviales y residuales suprayacen a un manto rocoso poco profundo, meteorizado de la Formación Celendín en esta parte del fondo del valle (ver Figura 2.2).

Los gradientes a lo largo del eje del Valle en la zona norte central del Valle son menores alrededor del 3,5% (2.0°). Los suelos superficiales que subyacen a esta zona del fondo del Valle están compuestos por suelo de cobertura orgánico, turba y depósitos menores recientes del tipo aluvial y lacustre. Estos a su vez suprayacen a depósitos de suelo coluvial/residual de espesor variable, que reducen su pendiente a medida que avanzan en profundidad dentro del manto rocoso meteorizado de la Formación Celendín.

Localmente en esta área también pueden verse depósitos de derrubios y deslizamientos asociados con el abanico coluvial prominente descrito más arriba. Los gradientes a lo largo del eje del valle en la zona sur central del Valle, en las inmediaciones de la ampliación propuesta del Botadero, son casi planos, de aproximadamente 2,0% (1.2°). Esta zona del fondo del valle tiene depósitos gruesos subyacentes de suelo de cobertura orgánico, turba y sedimentos lacustres blandos. Se cree que la extensión noroeste del depósito glaciolacustrino principal contiguo, está controlado por la altitud, por lo que no se espera encontrar depósitos lacustres significativos que superen una altitud

aproximada de 4090 msnm, como se ilustra en el Anexo 1 (DWG-A1-101 Plano de la geología aplicada a la ingeniería).



Figura 2.2 – Vista panorámica del Botadero Tucush (2010)

En la zona sureste del valle, pendiente abajo del pie del Botadero final propuesto, el gradiente a lo largo del eje del valle se empina más hasta alcanzar aproximadamente el 16% (es decir, 9.2°). En esta área, una fina capa discontinua de suelo de cobertura suprayace en el fondo del Valle a depósitos morrénicos densos y/o coluvios de grano relativamente grueso. Nuevamente, dichos depósitos morrénicos, parecen provenir predominantemente del manto rocoso de la Formación Celendín, pero son mayormente más gruesos y contienen clastos más redondeados que los suelos coluviales de esta área, que se caracterizan típicamente por sus clastos abundantes, gruesos y angulares. El fondo del valle del botadero de tucush tiene alrededor de 150m de ancho y una altitud que varía desde los 4250 hasta 4050 msnm en las inmediaciones del pie del Botadero, la gradiente a lo largo del eje del valle es aproximadamente de 11%.

Localmente en el área se puede apreciar depósitos de suelos producto de deslizamientos asociados con el abanico coluvial, los gradientes a lo largo del eje del valle al sur central son casi planos de aproximadamente 2%, esta zona

del valle tiene depósitos gruesos de suelos con cobertura orgánico, turba y sedimentos LACUSTRES blandos, que se caracterizan típicamente por sus clastos abundantes ver Anexo 1 (DWG-A1-101 muestra el plano de la geología aplicada a la ingeniería).



Figura 2.3 – Vista panorámica del talud Nor-Este del valle muy escarpado

2.3 CLIMA E HIDROLOGÍA

El clima en el área del valle de Tucush es típico de los Andes centrales del Perú, en el que se diferencian claramente dos estaciones climáticas: una estación seca entre los meses de mayo a septiembre, caracterizada por temperaturas bajas (1.5 a 14.5°C) con presencia de heladas que ocurren por debajo de los 4500 msnm, y la segunda estación húmeda o lluviosa entre los meses de octubre a abril, periodo en el que se registran precipitaciones, nevadas y tormentas eléctricas, siendo la precipitación promedio anual 1350mm.

La información hidrológica de línea base para valle de Tucush fue desarrollada por Golder (1999). Los siguientes cuadros resumen 2.1 y 2.2, muestran los diferentes periodos de retorno de precipitación anual y diaria en año húmedo y año seco, en el área del yacimiento minero (Golder, 2007).

La precipitación en las inmediaciones del valle de Tucush se distribuye de modo irregular a lo largo del año, con excepción de un periodo lluvioso de octubre a abril como se muestra en el cuadro 2.3 la fluctuación estacional de la temperatura del aire es relativamente pequeña, con temperaturas mensuales promedio máximas diarias que oscilan entre los 9.7°C en febrero y 11.3°C en marzo, la temperatura mensual mínima diaria oscila entre 2.0°C en diciembre.

Periodo de Retorno (años)	Precipitación (mm)
100 - Año Húmedo	2304
10 - Año Húmedo	1970
10 - Año Seco	754
100 - Año Seco	622

Cuadro 2.1 Cantidades de Precipitación Anual, (Golder, 2007)

Periodo de Retorno (años)	Precipitación Diaría (mm)
2	36
10	53.9
50	70.7
100	78.3
1000	101.0

Cuadro 2.2 Precipitación Máxima Diaria (Golder, 2007)

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
2001	168	138.3	206.5	59.2	86	16.5	15.7	7.5	33.5	122.9	127.3	194.5
2002	71.9	146.8	178.1	113.8	38.7	2.5	45.6	15.5	43.7	121.6	159.1	136
2003	98.6	116.1	124.5	80.3	67.8	17.8	8.3	31.5	55.7	65.0	121.4	213.2
2004	65.4	136.7	111.9	56.5	65.5	22	48.5	29.7	85.6	128.6	119.9	198
2005	167.5	111.8	191.8	78.4	10.7	0.9	1.7	0	0.8	136.1	74.8	118.5
2006	75.7				20.2	36.4	9.6	20				
2007	125.3	59.4	235.4	115	39.2	7.2	37.9					
2008				70.2	39	15.6	6.4	18.8	93.9	117.9	120.1	166.7
2009	185.2	181.6	215.7	138	76.2	35.1	44.5	46.3	39.3	145.9	127.1	170.4
2010	144.6	173.2	169.3	59.9	39.6	8.4	13.7	8.4	32.4	103.7	131.5	133.4
2011	190.8	134.7	217.5	90.5	19.8	0.5	24.6	4.5	45	107.6	115.9	171.8
2012	191.1	169.1	110	141.9	31	26.5	7.6	12.7	19.8	100.1	139.6	224.9
2013	173.2	187.9	186.8	59.4	54	20.2	33.7	65.2	31.3	115.9	109.8	158.7
2014	160.3											

Cuadro 2.3 Precipitación Mensual 2001 – 2014 (data obtenida con estaciones meteorológicas in situ).

2.4 SISMICIDAD

El Perú se ubica cerca de un borde convergente entre la placa Sudamericana al Este y la placa de Nazca al Oeste. El borde entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana en esta región está marcada por la fosa Perú - Chile ubicada entre los 140 a 180 km al Oeste de la costa peruana, caracterizada por presentar una actividad tectónica provocada por la subducción de Placas esta interacción origina a lo largo del tiempo, eventos sísmicos.

La continua subducción de la placa de Nazca debajo del Oeste peruano, es la principal fuente de generación de grandes sismos ($M > 6.0$) y el fuerte movimiento sísmico experimentado usualmente en la costa peruana. La geometría de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana fue modelada por Cahill e Isacks (1992).

Se realizó un estudio de peligro sísmico, mediante métodos determinísticos y probabilísticos, en el emplazamiento ubicado a 2.8km del área de estudio, en el estudio fueron seleccionados dos escenarios de diseño sísmico máximo creíble (MCE) en función de la evaluación determinística, para un evento de magnitud 7.0 (Mw) en la placa sudamericana superior con una aceleración máxima en el sitio de 0.4g, y un evento de subducción de magnitud 8.5 (Mw) en la interfaz de la placa Sudamericana y la Placa de Nazca, con una aceleración máxima de sitio de 0.20g, los valores serían producidos por un sismo de subducción intraplaca, lo cual es consistente con la tectónica regional ya que dicha actividad es la fuente de subducción más cercana a la zona del proyecto, y ha generado sismos del orden de magnitud 8.0 (Mw).

Para el estudio sobre la base del estudio de peligro sísmico, se determina que la aceleración máxima del terreno en la zona de estudio es de 0,28g para un periodo de retorno de 475 años.

2.5 GEOLOGÍA SUPERFICIAL

Para lograr la descripción de la geología superficial se utilizaron mapas topográficos, para realizar el reconocimiento en el campo, inspección de exposiciones de suelos superficiales y manto rocoso en los cortes de terrazas, perforaciones y calicatas para evaluar el carácter y la distribución de los suelos superficiales y de las unidades de terreno en las inmediaciones generales de la ampliación sureste del Botadero Tucush. Dentro del Valle Tucush se excavaron, registraron y se tomaron muestras de 118 calicatas cuya profundidad osciló entre 0,8m y 6m. De éstas, 39 se ubicaban dentro del contorno de la ampliación

sureste propuesta. Adicionalmente se excavaron, registraron y se tomaron muestras de cinco calicatas en el Valle Yanacancha, al sur de la divisoria de aguas entre el Valle Ayash y el Valle Tucush. Asimismo, en el área del fondo del valle se excavaron, registraron y tomaron muestras de 10 perforaciones cuya profundidad osciló entre 10 y 74,2m. Nueve de ellas se ubicaban dentro del contorno de la ampliación sureste propuesta. En cada calicata y perforación, se realizó descripciones de los tipos de suelo, estimaron la consistencia y donde fue posible el contenido de humedad cualitativamente. La distribución interpretada de las diversas unidades de terreno, ubicaciones de todas las calicatas y perforaciones pertinentes, se muestran en el plano de geología aplicada a la ingeniería en el plano DWG-A1-101 del Anexo I.

Sobre la base del reconocimiento de terreno, las observaciones de las calicatas, las exposiciones del suelo y los resultados de los ensayos de laboratorio de los distintos programas, se identificaron cinco tipos de suelos naturales en las inmediaciones de la ampliación sureste propuesta para el Botadero Tucush: orgánico, coluvial, morrénico, fluvial y lacustre. Se encontró lecho rocoso en la mayoría de las calicatas y perforaciones, también se observaron afloramientos en varias ubicaciones del área de la ampliación propuesta del Botadero, sobre todo a alturas más elevadas, donde las pendientes del valle por lo general están compuestas por masa rocosa al descubierto o masa rocosa y coluvio discontinuo. En las inmediaciones del pie del Botadero final ampliado, puede observarse masa rocosa expuesta en los taludes laterales del valle, apenas por sobre el fondo del valle. La distribución interpretada de los diversos tipos de suelo y las unidades de terreno se ilustran en el plano DWG-A1-101 del Anexo I.

Orgánico (O) – Los suelos orgánicos encontrados en las inmediaciones del Botadero Tucush final propuesto consisten en dos tipos: A y B. Los suelos orgánicos Tipo A por lo general están compuestos de musgo/césped sobre una capa de limo arcilloso orgánico firme a duro (es decir suelo de cobertura). Este material generalmente forma una capa (normalmente <1m) que se afina a medida que aumenta la altitud. Los suelos orgánicos Tipo B se encuentran en el área del fondo del valle, al sureste de la actual berma-pie de impacto, y consiste en una capa más gruesa (es decir normalmente >1m) de turba fibrosa altamente comprimible. Entendemos que la mayoría de los suelos orgánicos Tipo B se removieron del área de la ampliación propuesta para facilitar la construcción del humedal artificial que se realizó en el 2005 (ver plano DWG-A1-101 del Anexo I).

Dentro del contorno de la ampliación propuesta se observó la presencia de un acopio de lo que parece ser suelo orgánico Tipo A (es decir suelo de cobertura). Dicho acopio está ubicado inmediatamente al sureste del humedal construido y se identifica en el plano DWG-A1-101 del Anexo I, este debe ser trasladado y acopiado en una ubicación adecuada fuera del contorno de la ampliación propuesta.

Se prevé que los bloques gruesos de desmonte que rueden por la cara del botadero, erosionarán o atravesarán los depósitos orgánicos Tipo A más finos en las laderas del Valle, amalgamándose con los suelos subyacentes. Sin embargo, los suelos Tipo B normalmente se encuentran por encima a limo y arcilla lacustres blandos a firmes. Las capas orgánicas de esta índole podrían tener un impacto negativo en la estabilidad del Botadero.

Asimismo, estos suelos podrían penetrar en la base del Botadero o del drenaje rocoso subyacente, comprometiendo la eficiencia de drenado, lo que podría hacer que el agua se empoce y se desarrolle una napa freática dentro de la base del Botadero. Los suelos orgánicos Tipo B presentes en el contorno del botadero deben ser removidos. Los suelos orgánicos denudados deben almacenarse en acopios para el uso de remediación o ubicarse en zonas no críticas del Botadero. Si se siguen estas recomendaciones, es dable esperar que los suelos orgánicos Tipo B no tengan impacto alguno en la estabilidad general del Botadero. También es importante mencionar que entendemos que la mayoría de los suelos orgánicos Tipo B fueron probablemente removidos para facilitar la construcción del humedal artificial que ocupa el fondo del valle, en las inmediaciones de la ampliación propuesta del Botadero.

Coluvial (C) – Los suelos coluviales observados en las inmediaciones del Botadero Tucush final (ampliado) propuesto, consisten en dos tipos de clasificaciones, a los que se hacen referencia como Coluvios Tipo A y Tipo B. En el área más al sur del Valle Tucush, se han acumulado depósitos de materiales angulares y gruesos de laderas, ubicados en la base de los taludes del Valle, como consecuencia de la inestabilidad de la masa rocosa en la parte superior de la ladera (ver plano DWG-A1-101 del Anexo I). Dicho material, coluvio Tipo A, es predominantemente grueso, granular (es decir, grava, guijarro y bolones) e incluye grandes bloques que llegan a tener algunos metros de diámetro que cubren el fondo del Valle de esta área. La mayor parte de la pendiente del Valle suroeste, así como también las áreas del fondo del valle por encima de los

4150m de altitud, tienen coluvio Tipo B subyacente, el cual forma una falda de grava limosa y arcillosa de color marrón claro a medio con vestigios de arena. Este depósito, localmente pedregoso y con guijarros, se ha desarrollado en la base de las laderas del Valle. La consistencia de dicho coluvio es normalmente firme a dura. Este material se caracteriza por ser de grano fino, lo cual probablemente se deba a la degradación y a la meteorización de componentes menos resistentes de las rocas madre de la Formación Celendín

Lacustre (L) – Los suelos lacustres se hallaron en numerosas calicatas y perforaciones realizadas en el Valle por debajo de una altitud aproximada de 4150 msnm. Estos también se dividieron en dos tipos: A y B. Entre las altitudes aproximadas de 4078 y 4150 msnm, en la parte inferior del contorno actual del Botadero. Los suelos lacustres Tipo A son por lo general ligeramente húmedos a húmedos, de color gris a ladrillo, moteados, compuestos por limo arcilloso a arcilla limosa, con algunos vestigios de arena fina y algunos vestigios de grava. Parecen haberse extendido en un entorno de aguas calmas, pero normalmente tienen grava fluvial de mayor energía entre sus capas, como se señala líneas arriba pueden ser gravosos por sí mismos. Dependiendo del entorno deposicional y el drenaje local, estos suelos tienen una consistencia que oscila entre firme y dura. En función de los resultados de los programas de calicatas y perforaciones, se interpretó que estos suelos tienen un espesor de hasta 10m aproximadamente. Dado su espesor y consistencia, se espera que influyan significativamente la estabilidad de la berma-pie de impacto y/o en las últimas etapas del desarrollo general del actual Botadero Tucush.

Por debajo de la altitud aproximada de 4078 msnm y aguas abajo del pie actual del Botadero, se encontró un depósito de arcilla blanda a firme, de color gris claro a verde griseado, intercalado con capas de turba. Este depósito lacustre Tipo B se observó en perforaciones y en tres calicatas (a saber, Calicatas TP04-53, 54 y 55) en el 2004, Las perforaciones WL-01 y WL-02 realizadas en marzo del 2012 se enfocaron específicamente en el suelo lacustre Tipo B. Se interpretó que dicho depósito, que subyace al Botadero Tucush ampliado propuesto, tiene hasta 20m de espesor aproximadamente y que no es apto como fundación para un Botadero de Desmonte principal. En el plano DWG-A3-103 incluye detalle del plano del espesor del depósito de suelo lacustre Tipo B ver Anexo I, interpretado en función de la información de la investigación del subsuelo resumida en el presente informe. Cabe destacar que el humedal artificial al pie del valle tucush

en el 2005, el cual ocupa la mayor parte del fondo del Valle, inmediatamente aguas abajo del pie del actual Botadero Tucush, está casi enteramente emplazado sobre esta unidad. Entendemos que este depósito no presentó un problema significativo durante la construcción del humedal.

Fluvial (F) – Los suelos fluviales se hallaron en varias calicatas a profundidades diversas. En general son de grava saturada suelta a compacta, localmente arcillosa. Probablemente estos depósitos se formaron por la acción de una corriente meandriforme de un canal que corre en el fondo del Valle.

Morrénico (M) – Los depósitos de suelos morrénicos son típicamente de color gris a marrón claro y están compuestos por grava arenosa con algunos vestigios de arcilla, guijarros y bolones. Comúnmente forman una capa fina a manta sobre la masa rocosa en el fondo de la zona noroeste del Valle. En la zona sureste del Valle forman una capa a manta sobre gran parte del fondo del Valle y de las pendientes inferiores a intermedias del Valle. Si bien la distribución granulométrica de estos materiales puede ser similar a la del Coluvio, tienden a ser ligeramente más gruesos que el Coluvio, especialmente en la zona sureste del Valle. La consistencia es típicamente densa a muy densa, pero ciertamente varía, dependiendo del drenaje y de la distribución granulométrica. Las investigaciones geotécnicas realizadas mediante la exploración de calicatas determinaron la existencia de depósitos morrénicos, clasificados en su mayoría, según el sistema SUCS como grava arcillosa con arena (GC) con presencia de bolonería, de plasticidad media y medianamente densa, la distribución granulométrica de este material presenta grava, arena y finos. También se presentan arcillas de baja plasticidad con grava (CL), con características granulométricas con presencia de grava, arena y finos. De acuerdo a los resultados del ensayo triaxial CU, se adoptaron valores conservadores en términos de esfuerzos efectivos de 32° de ángulo de fricción interna, cohesión nula y peso específico de 19 kN/m^3 .

2.6 GEOLOGÍA DEL LECHO ROCOSO DEL VALLE DE TUCUSH

Como se indica, el talud en el lado suroeste del Valle Tucush, en las inmediaciones de la ampliación propuesta del Botadero de Desmonte, es muy empinado (taludes naturales generales de 35° a 40° o más empinados) y relativamente uniforme. Este talud subyace a un manto rocoso de la Formación Celendín, compuesto por rocas duras de arcilla, limolitas y margas calcáreas interestratificadas y moderadamente recesivas. El rumbo de la estratificación es

mayormente paralelo al eje del Valle y en la mayoría de los afloramientos buza moderadamente hacia el talud.

El talud del Valle noreste es más irregular que el talud del Valle suroeste; está compuesto por bancos de bajo buzamiento entremezclados con segmentos de talud moderadamente empinados a empinados. Litológicamente está compuesto de calizas resistentes de la Formación Jumasha. La estratificación en el Jumasha buza moderadamente hacia el suroeste (es decir hacia el Valle). Las exposiciones de masa rocosa son frecuentes y se caracterizan por taludes inclinados y crestas alineadas subparalelos al eje del Valle.

CAPITULO III: ASPECTOS GEOTÉCNICOS

3.1 EXPLORACIÓN DE CAMPO

En 1997 se inició con el programa para el estudio de fundación en el valle de Tucush, se excavó y registró numerosas calicatas en las proximidades del Botadero de Desmonte Tucush propuesto. En el año 2000 se concluyó un programa de investigación del subsuelo y ensayos en las proximidades del Botadero propuesto. El programa comprendió varias calicatas (T01 a T17) y tres taladros rotativos (DDH-01, DDH-02 y DDH-03). De éstos, cinco calicatas (T07, T08, T14, T15 y T16) y dos taladros (DDH-02 y DDH-03) se ubicaron dentro del contorno de la ampliación propuesta del Botadero ver Anexo 1 (DWG-A1-101 muestra el plano de la geología aplicada a la ingeniería).

En el 2003, se llevó a cabo mapeos geológicos superficiales y preparó un programa de descubrimiento de la fundación para el Botadero de Desmonte Tucush propuesto en ese entonces. En febrero del 2004, se amplió el programa geotécnico de calicatas y toma de muestras en el Valle Tucush. El programa del 2004 consistió en nueve calicatas excavadas manualmente (llamadas calicatas manuales para distinguirlas de las excavadas con una máquina excavadora) y 55 calicatas excavadas por una excavadora sobre ruedas. De éstas, nueve (TP04-10 a TP04-14, TP04-26, y TP04-53 a TP04-55) se ubican en las proximidades de la ampliación propuesta. Las ubicaciones de dichas calicatas se indican en el DWG-A1-101 Plano de la geología aplicada a la ingeniería y los registros de las calicatas se incluyen en Anexo I. Se recuperaron muestras representativas con fines de identificación y ensayos de índice de laboratorio a realizar con posterioridad.

El programa del 2004, consistió en tres perforaciones y 21 calicatas. Las ubicaciones de dichas perforaciones y calicatas también se indican en Anexo 1 (DWG-A1-101 plano de la geología aplicada a la ingeniería) y los registros de las perforaciones y de las calicatas se indican en el Anexo 1 (cuadro de descripción de calicatas y perforaciones).

En agosto del 2010, se realizó un reconocimiento complementario de terreno en el área de la ampliación sureste propuesta del Botadero de Desmonte Tucush.

En marzo del 2012, se realizó dos perforaciones en el sector sur central del Valle Tucush, dentro del contorno de la ampliación sureste propuesta del Botadero de Desmonte Tucush. Dichas perforaciones, nombradas como WL-01 y WL-02 o DD-05 y DD-06, hallaron 14,6 y 8,0m de limo arcilloso suave a firme y materia

orgánica respectivamente. Las ubicaciones de dichos pozos aparecen en el Anexo 1 en el plano DWG-A1-101 y los registros de las perforaciones se incluyen en el Anexo 1 (cuadro de descripción de calicatas y perforaciones).

Durante el proceso de perforación se recuperaron las muestras de los tubos Shelby obteniendo muestras de suelo limo arcilloso para someter posteriormente a ensayos de laboratorio.

En junio del 2012, se realizó las ubicaciones de nuevas las calicatas y se completó el mapeo complementario del terreno en las inmediaciones de las obras de manejo de aguas superficiales propuestas.

En agosto del 2012, se realizó un trabajo de perforaciones complementarias, con el fin de evaluar las condiciones de las fundaciones en las inmediaciones del área de ampliación noreste propuesta del Botadero Tucush y de evaluar posteriormente las condiciones de las fundaciones en las inmediaciones de las zanjas de captación y el canal de afluentes, se realizó una en las La ubicación de dicha calicata, TP-PT12-01 como se muestra en el Anexo 1 en el plano DWG-A1-101 y el registro de la calicata se incluye en el inmediaciones de la ampliación sureste propuesta. De esta calicata se recuperaron muestras representativas con fines de identificación y ensayos de índice de laboratorio a realizar con posterioridad.

En noviembre del 2012, se llevó a cabo un estudio por imágenes utilizando refracción sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW por su sigla en inglés) a fin de delinear el espesor y las extensiones laterales del depósito de arcilla blanda en el Valle Tucush inferior. Del 27 al 29 de noviembre, llevó a cabo estudios de refracción sísmica y MASW en ocho líneas de la sección en las inmediaciones del humedal artificial del Valle Tucush inferior. Los resultados del estudio se resumen en un informe de diciembre del 2012. Las ubicaciones de las líneas sísmicas se ilustran en los perfiles interpretados, que ilustran los materiales y la estratigrafía interpretada de la fundación.

La geología aplicada del Valle Tucush, las ubicaciones de las calicatas y de las perforaciones realizadas previamente en las inmediaciones del área de ampliación sureste propuesta del Botadero de Desmonte Tucush se ilustran en el Anexo 1 en el plano DWG-A3-102 perfiles de líneas sísmicas.

3.2 ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO

3.2.1 Ensayos de Campo

En 1997 se excavó y registró numerosas calicatas en las inmediaciones del valle de tucush en los sectores propuestos para la construcción del botadero. No obstante, se evidencio la falta de pruebas in situ o de campo de los suelos durante el programa. El programa de estudio de fundación del año 2000 en el valle de tucush incluyó pruebas de penetración estándar, pruebas in situ de corte mediante aspa, así como también toma de muestras de suelos perturbados y no perturbados.

Se llevaron a cabo pruebas Torvane (veleta manual) y/o con penetrómetro de cámara, como parte de los programas de calicatas y toma de muestras del 2004 y del 2012, para estimar la resistencia a la compresión no confinada (UCS por su sigla en inglés) de estratos del suelo de grano fino que se hallaron al realizar las calicatas. Los resultados de dichas pruebas y las llevadas a cabo por se resumen en el cuadro de descripción de calicatas y perforaciones del Anexo I.

3.2.2 Ensayos de Laboratorio

Las pruebas de laboratorio de las muestras obtenidas por en la primera etapa de exploración en 1997, consistieron en distribución granulométrica, Límites de Atterberg, determinaciones de contenido de humedad y determinaciones gravimétricas específicas. También hizo realizar cuatro ensayos de Compresión Triaxial no consolidado no drenado (UU por su sigla en inglés) en muestras de Tubo Shelby recuperadas de tres taladros rotativos (DDH-01, DDH-02 y DDH-03). Los suelos se clasificaron utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS por su sigla en inglés). Los ensayos de las muestras recuperadas durante el programa de campo en la fundación del valle de Tucush se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos de la Pontificia Universidad del Perú (PUCP) de Lima.

Las pruebas de las muestras de suelos obtenidas de las calicatas del 2004, fueron realizados por el laboratorio de Golder Associates Ltd. Las pruebas de laboratorio incluyeron determinaciones del contenido de humedad natural, análisis granulométricos y determinaciones de los Límites de Atterberg. Las pruebas de las muestras de suelo obtenidas de las perforaciones del 2012 se llevaron a cabo en los laboratorios de la PUCP y Ausenco Vector. Dichas pruebas incluyeron determinaciones del contenido de humedad natural, análisis granulométricos (incluyendo hidrómetro donde correspondió), determinaciones

de los Límites de Atterberg y ensayos de compresión triaxial UU. Las pruebas de las muestras de suelo obtenidas de la calicata del 2012, se llevaron a cabo en la PUCP e incluyeron determinaciones del contenido de humedad natural y análisis granulométricos. Los resultados de las pruebas de laboratorio, figuran en el Anexo 1 y se resumen del cuadro de descripción de calicatas y perforaciones.

3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los estudios realizados en oficina consistieron en la revisión y compilación de los registros de las calicatas, las perforaciones y los resultados de pruebas de laboratorio. Se realizaron Análisis de Estabilidad Bidimensionales (2D) en cuatro secciones críticas. Dichas secciones, desarrolladas en la cara aguas abajo, de los dos diseños alternativos del Botadero de Desmonte, se eligieron para representar la combinación menos favorable de las condiciones de la fundación y la geometría del Botadero basada en las condiciones interpretadas de la fundación. Se evaluó la estabilidad de ambas configuraciones del Botadero: la intermedia y la final. Las ubicaciones de las secciones analizadas se muestran en los planos DWG-A1-104 perfiles de secciones analizadas para análisis de estabilidad. También se llevaron a cabo análisis 2D de las configuraciones finales del Botadero, allí donde la forma asimétrica del Botadero y la extensión lateral limitada de los suelos incompetentes de las fundaciones del fondo del Valle, sugerían un componente potencial 2D significativo para la estabilidad.

Los resultados de los análisis se evaluaron en función de los criterios de aceptabilidad, que se desarrollaron basados en evaluaciones recientes construcción de la primera etapa del botadero de Tucush, de acuerdo con los estándares de la industria, y la experiencia en diseño y operación de Botaderos de Desmonte en condiciones similares en el sector. Cuando los resultados de los análisis de estabilidad no cumplieron con los criterios de aceptabilidad, se evaluaron posibles modificaciones de las geometrías y/o de las secuencias de desarrollo propuestas del Botadero y se llevaron a cabo análisis iterativos hasta alcanzar configuraciones aceptables y prácticas del Botadero.

Sobre la base de los resultados de dichos análisis y evaluaciones, se prepararon los criterios de diseño a nivel de factibilidad y las pautas preliminares de desarrollo del Botadero.

CAPITULO IV: CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL BOTADERO DE TUCUSH

4.1 DEFINICIÓN DE BOTADERO DE DESMONTE

Existen varias definiciones, consideramos que la definición hecha por Robertson en 1982, es una de las que mejor describe a un botadero de desmonte “Se define a los botaderos de mina como algunas de las estructuras más grandes hechas por el hombre en una mina por su altura y volumen de material almacenado. Los Botaderos de mina están constituidos por materiales geológicos que son considerados como no metálicos de mina (Robertson, 1985). Otra definición es la realizada por R.W. McGinn “Los botaderos de desmonte de roca en las minas son estructuras masivas, por ejemplo, en la cima de las montañas de British Columbia se construyó la estructura más grande en la tierra” Una buena descripción de un botadero de mina debe proporcionar información de forma clara del tipo y configuración del botadero. Este tipo de información facilita la identificación para los diseñadores e ingenieros de campo. Las descripciones más simples proporcionan conocimiento sobre el tipo de fundación, altura del botadero, tipo de material vertido etc.

Los botaderos de desmonte están contruidos por material de variada granulometría (fragmentos de rocas producto de las voladuras con diámetros que varían de 0.1 a 2.0 m para el caso de estudio) estos materiales son removidos de su posición original para luego verterlos en nuevos emplazamientos sujetos a agentes externos como oxidación, filtración, disolución y erosión (British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee. Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P.III).

4.1.1.1 Características Del Desmonte Para El Botadero Tucush

El material de desmonte destinado al Botadero Tucush se ha compuesto de caliza de buena calidad (gruesa, angular, durable y no mineralizada). Los análisis de estabilidad se llevaron a cabo suponiendo que el desmonte que se depositará en el área del emplazamiento del botadero propuesto, será de calidad relativamente buena.

El material de desmonte de menor calidad deberá mezclarse con el desmonte de mayor calidad o bien deberá destinarse a áreas del Botadero que no sean susceptibles a inestabilidad general y que no afecten negativamente el drenaje interno o del subsuelo. el material se identificado en las visitas a campo se describe como grueso, durable, de drenaje libre y friccionante. Los parámetros

de resistencia empleados en su modelamiento estuvieron basados en una función de resistencia no lineal (Leps, 1970).

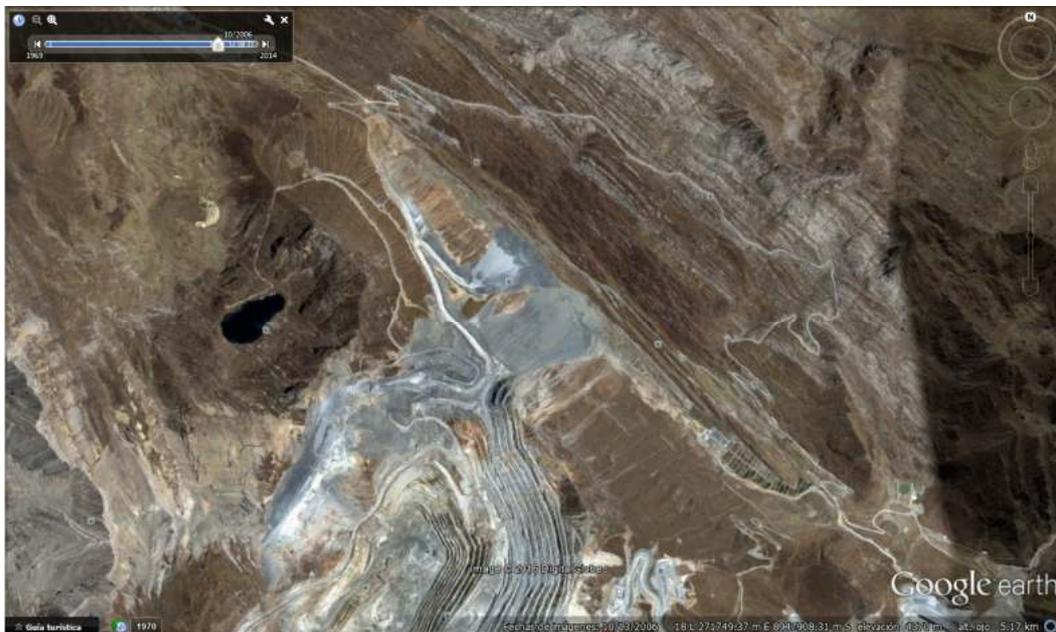


Figura 4.1 Foto Satelital del Botadero Tucush año 2010 (fuente Google earth).

4.2 CLASIFICACION DE BOTADEROS

4.2.1.1 Tipos de Botaderos de Desmonte

En el capítulo 04 describiremos los diferentes tipos de botaderos que se pueden presentar durante el desarrollo de las fases de la operación minera, estos botaderos se pueden clasificar de acuerdo a su secuencia constructiva pueden ser ascendentes o descendientes, de acuerdo al tipo de geomorfología y la geometría el emplazamiento del botadero pueden ser del tipo relleno de valle, relleno de cresta y otros tipos de relleno que se desarrollaran más adelante.

De acuerdo a la universidad de British Columbia, todavía no se ha hecho ninguna clasificación integral ni evaluación del peligro o riesgo utilizando este enfoque en el caso de botaderos de mina (OSM, 1989; Mesa, 1987; USBM, 1982; Taylor y Greenwood, 1981 y Walher, 1979).

4.2.1.2 Relleno de Valle

Estos botaderos se construyen relleno de valles de forma parcial o total, en dirección aguas abajo del eje de la quebrada, este tipo de construcción de botadero requieren de un diseño de drenaje, por lo general este tipo de construcción de botadero es escalonada para evitar el almacenamiento de agua,

En base a la experiencia de British Columbia, 11 de 83 (13%) botaderos reportados en el estudio fueron clasificados, en el Perú no se cuenta con una base de datos respecto a los tipos de botadero aplicados en la industria minera. En este tipo de relleno las paredes del valle se comportan de forma favorable aumentando la resistencia del botadero en los sectores de afloramiento rocoso aumentando la fricción y las propiedades resistentes, No genera acumulación de agua en la cabecera del valle, una de las limitaciones de este tipo de botadero es lo limitado de la capacidad para descargas poco volumen de descarga y los frentes limitados de descarga es otra de las limitaciones.

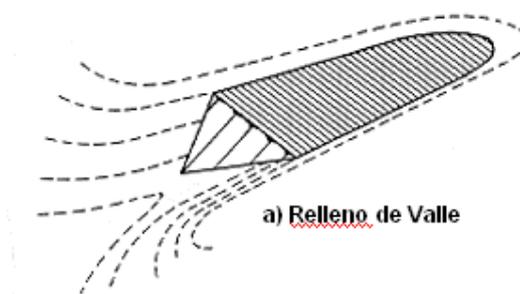


Fig. 4.2 Relleno de Valle (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58)

4.2.1.3 Relleno de Valle Transversal

Este tipo de relleno es una variación del método anterior se inicia de forma perpendicular desde un lado del valle cortando el fondo del valle, debido a esto el método constructivo requiere de un sistema de drenaje, el uso de este tipo de botaderos sirve como bermas de impacto aguas abajo para botadero de gran altura, para el desarrollo del proyecto se hizo uso de este tipo de botadero (berma de impacto y como contención ante un posible flujo generado durante la construcción del botadero de gran altura).

Para la construcción de este tipo de botaderos es importante considerar un buen sistema de drenaje en la fundación del botadero debido a que corta el drenaje natural del valle de tal forma que el flujo producido por las precipitaciones y de la elevación de los niveles freáticos en épocas de lluvia circulen por el sistema de drenaje generado antes de la construcción del botadero, el relleno de valle transversal, requiere canales de drenaje bien dimensionados. En base a la experiencia de British Columbia Sólo 2 de los 83 botaderos (2%).

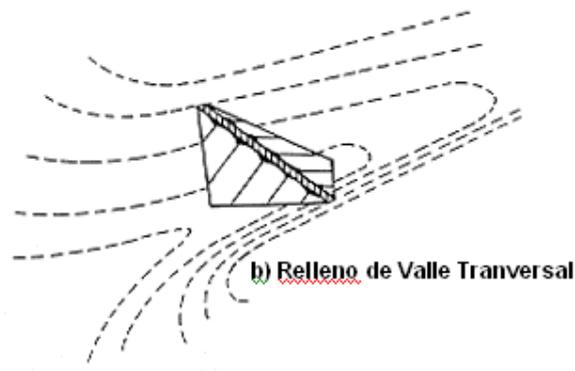


Fig. 4.3 Relleno de Valle Transversal (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58)

4.2.1.4 Rellenos a Media Ladera

Este tipo de botadero es construido en una ladera y no bloquean ningún curso de drenaje natural de la quebrada, por lo general este tipo de construcción dependiendo la altura del botadero requiere de construcciones complementarias (bermas de impacto) la importancia de un sistema de drenaje al fondo del valle determinara la estabilidad y el rendimiento del botadero. Las laderas de los botaderos, usualmente, se inclinan en la misma dirección de los ejes de quebradas y para nuestro emplazamiento resultan ser los sectores de mayor pendiente y mayor inestabilidad, en este tipo de botaderos puede descargar gran volumen de material una vez asegurada la estabilidad, en sus primeras etapas debido por lo general presentan la mayor probabilidad de inestabilidad por las condiciones mencionadas líneas arriba.

Los rellenos a media ladera representan la mayoría de los botaderos de British Columbia, 61 de 83 botaderos (73%), la primera etapa de la construcción del botadero de Tucush se desarrolló haciendo uso de este método constructivo, se requirió bermas de impacto y un sistema de drenaje, así como consideraciones del tipo de material, el avance en las primeras etapas es lenta.

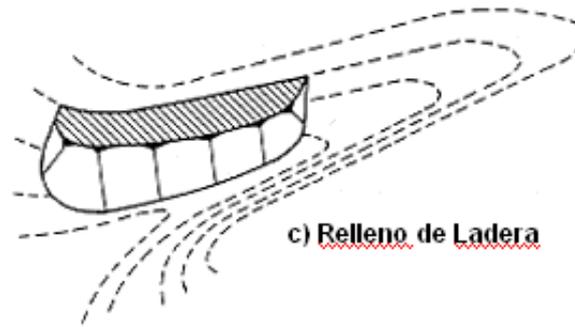


Fig. 4.4 Relleno a Media Ladera (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58)

4.2.1.5 Rellenos de Cresta

Los rellenos de Cresta es una variación del tipo rellenos a media ladera, donde los taludes de relleno están formados por parte de la cresta disponible. Ninguno de los botaderos, reportados en el estudio realizado por la British Columbia, los resultados del Estudio fueron categorizado como Relleno de Cresta de Loma.

Las ventajas y desventajas son parecidas a las del método anterior con la única diferencia de que este método no se realiza sobre valles.

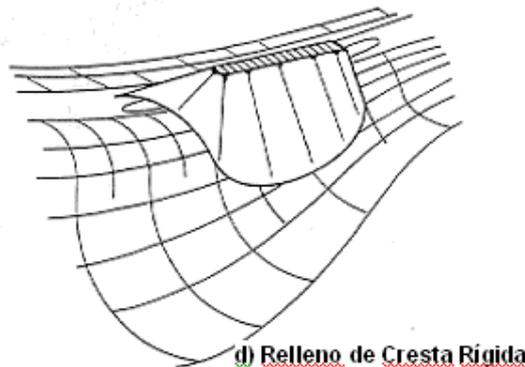


Fig. 4.5 Relleno de Cresta (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58)

4.2.1.6 Rellenos Apilados

Los rellenos apilados, se conforman en capas sobre superficies planas y amplias, están conformados por montículos de desechos conformados en capas, Los taludes de cimentación son generalmente planos o ligeramente inclinados. 7 de los 83 (8%) botaderos reportados en el Estudio realizado por la British

Columbia fueron rellenos apilados, este tipo de botadero son utilizados dentro de las operaciones mineras como Stock de Mineral no presentan gran altura.

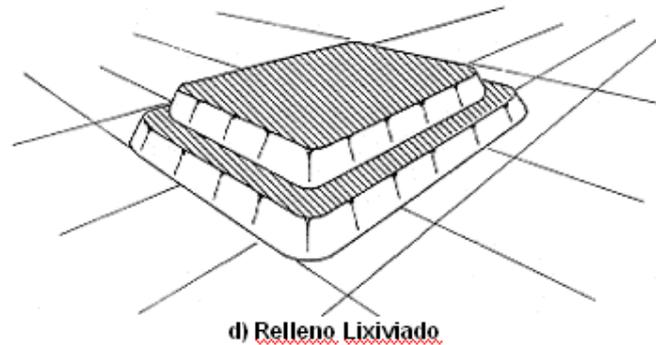


Fig. 4.6 Relleno Apilados (Mined Rock and Overburden Piles, 1991. P. 58)

4.3 FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE UN BOTADERO DE GRAN ALTURA.

Dentro de la construcción de botaderos de gran altura existen factores que son determinantes al momento de evaluar la estabilidad y durante el proceso constructivo de botaderos de gran altura, a continuación, se presentan los factores más importantes.

4.3.1 Configuración Del Botadero

La configuración y el tamaño del botadero de mina tiene una relación directa con su estabilidad y tamaño potencial de las fallas (British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee. Mined Rock and Overburden Piles, 1991. p. 61). Las variables geométricas son:

Altura: definida como la distancia vertical desde la cresta del botadero hasta el pie del talud en la base del botadero. Los tamaños de los botaderos generalmente varían de 20m hasta más de 400m (British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee), para el caso de estudio la altura es de más de 500 metros.

Volumen: generalmente expresado en términos m^3 . Se considera que un botadero es pequeño si contiene menos de 1 millón de m^3 aproximadamente, mientras que los grandes botaderos, contienen volúmenes > 50 millones de m^3 . Los de tamaño mediano, tienen volúmenes que varían entre 1 y 50 millones de m^3 , en base a esta clasificación el botadero Tucush se encontraría dentro del rango de Grandes Botaderos.

Ángulo del Talud: el ángulo total del botadero es medido desde la cresta de la plataforma más alta hasta el pie del talud. El rango normal de los taludes de botadero varía entre 26° y 37° . También pueden presentarse taludes con una inclinación mayor a 37° si el material del botadero contiene finos considerables o material poco cohesivos, o está compuesto de cantos rodados angulares y grandes. Inicialmente, los ángulos de los taludes empinados en materiales de grano fino o materiales que se desmoronan o se degradan, se reducirán con el tiempo. Para el caso analizado el material estéril es considerado friccionante sin cohesión y su ángulo de reposo es de 37° .

Fundación del talud y Grado de Confinamiento: este es uno de los parámetros que afectan la estabilidad del botadero, este punto está referido a la importancia de donde está apoyado la base de los botaderos (British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee. Mined Rock and Overburden Piles, 1991. p. 61). Los taludes de cimentación empinados y/o la falta de confinamiento de los mismos se consideran factores que contribuyen de forma directa a la estabilidad del botadero. La situación menos deseable es cuando el ángulo del talud aumenta hacia la base ángulos mayores 40° para el caso de estudio. Si se presentara un deslizamiento en esta situación, este incrementaría su velocidad y se convertiría en una gráfica de logarítmica, este caso es el que se encuentra en la construcción del botadero de Tucush. Las situaciones más favorables son un talud decreciente hacia la base talud cóncavo y un buen confinamiento del valle (berma de impacto). Cuando el valle es sinuoso, el material del botadero puede realmente ser contenido por la pared del valle en dirección del movimiento. Sin embargo, en el caso de que se presente un deslizamiento del flujo, el confinamiento en un valle puede incrementar la distancia del flujo con una berma de impacto.

Condiciones de Cimentación: Las condiciones de cimentación, por lo general, se reconocen como un factor clave en la estabilidad del botadero (British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee. Mined Rock and Overburden Piles, 1991). Una mala fundación o una fundación pobre son las causas más frecuentes de inestabilidad en los botaderos. Los tipos de cimentación se pueden presentar en tres categorías diferentes:

- 1. Competente:** Lecho de roca altamente competente o suelo de igual o mayor resistencia que los materiales del botadero, fundación compuesta por

materiales que no generen el incremento de la presión de poros, que afecten las fuerzas resistentes.

2. Intermedio: Material intermedio que se consolidará y ganará mayor resistencia con el tiempo, pero que puede estar sujeto a la generación de presión intersticial y pérdida de resistencia si se carga rápidamente.

3. Débil: Material débil con con baja resistencia al corte, y que no gana resistencia a una tasa significativa por consolidación. Este es el caso donde frecuentemente las capas de arcilla se presentan dentro de los suelos de cimentación. Las cimentaciones, sujetas a una potencial licuefacción o a una alta presión intersticial, también están incluidas en esta categoría, este tipo de fundación se presenta en parte de la fundación del botadero de tucush.

Propiedades de los Materiales de los Botaderos: Las propiedades de los materiales de los botaderos como gradación, resistencia al corte, durabilidad, las propiedades de los materiales son importantes para la evaluación de estabilidad de los botaderos de desmonte o Material Estéril, las mayores fallas que se presentan en la construcción de grandes botaderos se deben a la baja calidad del material del botadero como un factor directo que influye en la inestabilidad. Los materiales más favorables del botadero serán aquellos compuestos de roca dura, gruesa y durable, con pocos finos o ninguno. Los materiales del botadero de este tipo están asociados a las minas metálicas. Los materiales menos favorables serán rocas degradables, suaves o superficiales con finos significativos.

Método de Construcción: La estabilidad de botadero y el desarrollo de las condiciones que pueden ocasionar fallas en su etapa inicial dependiendo del tipo de botadero también se relacionan a la construcción del botadero. Los botaderos, por lo general, se construyen en una serie de elevaciones o plataformas ya sea en secuencia ascendente o descendente. La construcción ascendente es la más ventajosa, ya que la base de cada banco se apoya en el banco anterior. El método de construcción seleccionado se basa en una combinación de factores que incluyen: la minimización de la distancia de acarreo, accesibilidad, capacidad disponible y estabilidad del botadero. La estabilidad puede mejorarse con el uso de estructuras circundantes, terraza, alturas de banco restringidas para limitar las tensiones de corte en las cimentaciones y el tramo del potencial deslizamiento, vaciado generalmente en los alrededores de los valles, más que cuesta abajo, y otras técnicas (British

Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee. Mined Rock and Overburden Piles, 1991).

Condiciones Piezométricas y Climáticas: Las condiciones piezométricas en la cimentación del botadero y dentro del botadero pueden afectar la estabilidad del botadero de mina, estas condiciones pueden incrementar la presión de poros y disminuir las fuerzas resistentes del botadero, Las condiciones climáticas, principalmente la precipitación en forma de lluvias y nieve, pueden tener una influencia directa sobre las condiciones piezométricas. Se puede presentar una condición crítica si una napa freática se intersecta con un talud que se encuentra en o cerca del ángulo de reposo del material. El agua puede entrar en el botadero ya sea por infiltración directa, por flujo en la topografía superficial o filtración de agua subterránea (Zavodni (1981)). Debido a lo mencionado líneas arriba es importante tener un estudio detallado de la hidrología e hidrogeología del sector del emplazamiento del botadero.

Ratio de Descarga: Esta referido a la cantidad de material vertido sobre el botadero por unidad de tiempo, La influencia del ratio de descarga o avance de la cresta sobre la estabilidad ha sido reconocida por varios investigadores. Los índices más altos de vaciado han sido considerados como un factor que contribuye de forma desfavorable a los eventos de deslizamientos.

Los altos índices de vaciado pueden generar presión intersticial en exceso tal como se ha descrito anteriormente. En dichos casos, los índices de vaciado tienen que ser controlados y la presión intersticial monitoreada durante la construcción para garantizar que la presión intersticial en exceso se disipe efectivamente y la estabilidad de la cimentación se mantenga, para el caso de estudio el ratio de descarga está asociado a un rango de velocidades que disminuyen desde el 25% cuando al velocidades se incrementan por encima de 1.5 cm/hr y 50% por encima de los 2 cm/hr en la etapa inicial de la construcción del botadero.

Asimismo, la resistencia de corte de los materiales de los botaderos se ve influenciada por la densidad. Por lo tanto, cuando el llenado o avance del vaciado es rápido, el material del botadero no tiene la oportunidad de consolidar y desarrollar la resistencia de corte adecuada para garantizar la estabilidad (British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee. Mined Rock and Overburden Piles, 1991).

4.4 PLAN DE DESCARGA EN EL BOTADERO

En el Planeamiento a Largo Plazo del Programa de Minado de 5 años para la extracción del mineral, es necesario realizar el diseño de disponibilidad del material estéril, teniendo en cuenta el volumen de remoción, tiempo, parámetros físicos y químicos, los cuales son facilitados por los departamentos de Geología, Operaciones Mina, Metalurgia e Ingeniería y Proyectos. Este plan de expansión incluye también el aumento de la capacidad de mina, a través de la adición de los siguientes equipos principales: perforadoras Bucyrus, cargadores LeTorneau (53 yd³), palas P&H 4100XPC, camiones CAT 793F y KOMATSU.

CAPITULO V: EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL BOTADERO

5.1 EVALUACIONES DE ESTABILIDAD

Se llevaron a cabo análisis de estabilidad bidimensionales suponiendo un modelo de tensión efectiva equilibrio límite y utilizando el programa de computación SUDE® v. 6.020 (Rocscience, 2016. SUDE 6.0- 2D Slope Stability Analysis for Soil and Rock Slopes). Se realizaron análisis utilizando el método de dovelas de Equilibrio Límite General (GLE por su sigla en inglés). Se consideraron modos de fallas circulares y no circulares, se utilizaron rutinas de búsqueda para determinar las superficies de las fallas críticas (es decir, superficies de fallas con los valores de Factor de Seguridad (FS) computados más bajos). Se evaluó tanto la geometría intermedia del crecimiento del botadero, así como la geometría final del botadero de Tucush.

Los análisis de estabilidad de equilibrio límite 2D son analíticamente simples, se comprenden bien y su uso está muy generalizado en la ingeniería geotécnica. En el contexto del botadero Tucush, proporcionan una indicación relativa de la estabilidad de diversas geometrías alternativas del botadero y son útiles para evaluar la sensibilidad de los parámetros clave de los análisis.

Con el fin de evaluar la influencia de la geometría del Valle, la forma y la distribución espacial del depósito lacustre Tipo B en la estabilidad, se llevaron a cabo análisis 2D para la ampliación sureste propuesta de Tucush, utilizando el programa informático DAN-W (O. Hungr, 2010 O. Hungr Geotechnical Research Inc., 2010. DAN-W - Dynamic Analysis of Landslides). Se en superficies de fallas con el FS más bajo) suponiendo una superficie de falla elipsoidal idealizada y una superficie de falla elipsoidal combinada, con una superficie de falla plana en la fundación del Botadero. Para estos análisis se utilizó el método de dovelas de Equilibrio Límite General (GLE por su sigla en inglés). Se realizaron los análisis estáticos de estabilidad también se realizaron análisis pseudoestáticos de estabilidad para evaluar el impacto potencial de un sismo en la estabilidad. Al evaluar los resultados de los análisis pseudoestáticos, es importante considerar el comportamiento probable de un terraplén sujeto a carga sísmica. En el caso de un terraplén compuesto por estériles predominantemente duros, durables y bien drenados sobre una fundación competente. Como en el caso del diseño del actual Botadero Tucush, es improbable que un sismo inicie una licuefacción o

produzca una falla rápida ya sea rotacional o translatoria emplazada profundamente, en fundaciones mejoradas como es el caso de la ampliación del botadero. Es mucho más probable que el Botadero experimente un aumento a corto plazo de la velocidad de asentamiento por consolidación y posiblemente el desarrollo de algún agrietamiento o escarpe local. Por otra parte, es sabido que los análisis pseudoestáticos, que aplican una fuerza horizontal constante a la masa del Botadero, por lo general dan por resultado evaluaciones muy conservadoras del impacto de aceleraciones sísmicas en terraplenes de materiales sueltos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, U.S. Army Corp of Engineers, 1984. "Rationalizing the Seismic Coefficient Method". Department of the Army, Waterways Experimental Station, Miscellaneous Paper GL-84-13, preparado por Hynes, M.E. y Franklin, A.G).

Con el fin de justificar dicho conservacionismo, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos generalmente recomienda usar el 50% de la aceleración máxima del terreno de diseño. En consonancia con evaluaciones pasadas del Botadero realizadas, se utilizó una aceleración horizontal del terreno de 0.14 g para los análisis pseudoestáticos, lo que equivale a un evento sísmico de 0.28g con un periodo de retorno de 1:475 años para el sitio estos datos provienen del estudio vulnerabilidad sísmica del lugar, con el 50% de reducción. Dado la gran consecuencia que tendría una falla del Botadero pendiente abajo, se llevaron a cabo análisis pseudoestáticos utilizando un valor mucho más conservador de aceleración horizontal de 0.24 g, esto corresponde al 50% de la aceleración máxima de un MCE.

En las siguientes secciones se presentan comentarios específicos con respecto a los análisis, el diseño y los supuestos asociados. Sin embargo, En particular, el talud del valle de Tucush en las proximidades de las secciones de análisis se interpreta como subyacente por lecho rocoso, en las proximidades de las secciones de análisis. las condiciones de fundación modeladas a lo largo de las secciones se modificaron para coincidir con nuestra comprensión de los materiales de fundación presentes ver DWG-A1-101 Plano de la geología aplicada a la ingeniería. Comentarios específicos sobre los análisis y el diseño se presentan en las siguientes secciones.

5.1.1 Secciones Analizadas

Se proporcionaron cuatro secciones de análisis de estabilidad a través del botadero propuesto se profundizará en la Alternativa 2. Estas secciones, TSE 1, TSE 5, TSE 6 y TSE 6 A, ilustran el avance de la plataforma de botadero con el tiempo, con una berma de impacto y una rampa de acceso alternativa y una berma de impacto de 65 m. de altura, la ubicación de estas secciones se ilustra en la Figura 3.1 que se muestra a continuación, en el Anexo A se puede ver la secuencia constructiva de la berma de impacto, así como el avance de cresta de las secciones analizadas.

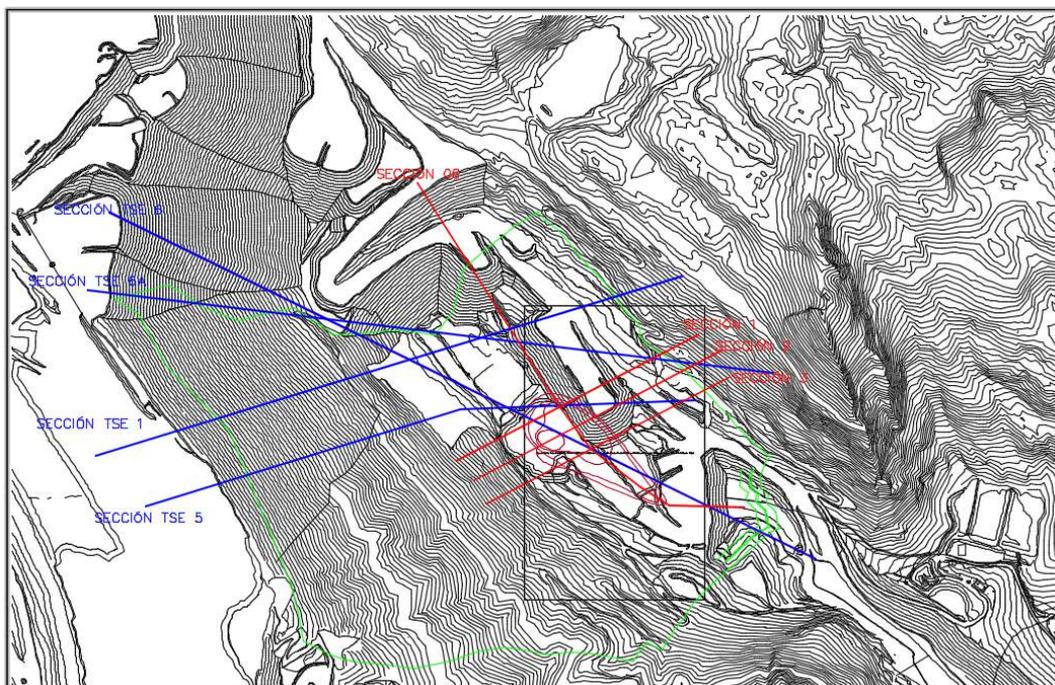


Figura 5.1 Secciones de análisis de estabilidad TSE 1, TSE 5, TSE 6 y 6A

5.1.2 Supuestos de Resistencia al Corte

Las características de resistencia al corte estimadas para los cinco tipos de suelos naturales, identificados en las inmediaciones de la ampliación sureste de Tucush, así como también el estéril que se destinará al Botadero y el lecho rocoso que está debajo del Botadero, se resumen a continuación:

Orgánico. - Los suelos orgánicos Tipo A ubicados dentro del contorno del Botadero habrán sido erosionados y que tendrán un impacto relativamente pequeño en la estabilidad total del Botadero. Los depósitos orgánicos Tipo B (esto es, turba) fueron removidos de las áreas del fondo del Valle, ubicados dentro del contorno del área de la ampliación propuesta del Botadero Tucush,

por lo tanto, no se incluyeron expresamente en los modelos de análisis de estabilidad.

Coluvio. - En función de su naturaleza mayormente granular, se espera que tanto los suelos coluviales Tipo A como los Tipo B se consoliden relativamente rápido bajo carga y que se comporten esencialmente como materiales friccionales. Para los propósitos del presente estudio, se ha asumido para estos suelos un ángulo de fricción efectivo de 32° . Esta hipótesis está respaldada por observaciones de taludes naturales relativamente empinados (es decir, $>35^\circ$), estables del Valle Tucush, así como también de otras áreas de la mina, donde se presentan materiales similares.

Lacustre. - Un depósito moderadamente extenso, firme a duro, de limo/arcilla lacustre (Tipo A) subyace a la berma-pie de impacto del Botadero Tucush actualmente. En función de los resultados de los ensayos de infiltración in situ y de los ensayos de índice de laboratorio, es posible que se desarrolle un exceso de presión intersticial en dichos suelos durante el desarrollo del Botadero. El desarrollo de dicha presión intersticial podría afectar negativamente la estabilidad en el corto plazo. Para evaluar el efecto que estos suelos pueden tener en la estabilidad del diseño del Botadero Tucush entonces propuesto, se llevaron a cabo análisis complementarios, se consideró probable que los depósitos de grava fluvial y las zonas limosas dentro del depósito lacustre actúen para acelerar la disipación de la presión intersticial. De conformidad con lo observado en las calicatas y perforaciones detalladas en el Cap. 2, en un esfuerzo por monitorear las presiones piezométricas reales en la fundación del Botadero, evaluar el potencial de generación de presión intersticial y el subsiguiente índice de disipación durante y después de la construcción de la berma-pie de impacto y del Botadero para esta evaluación se instaló una red de piezómetros de cuerda vibrante en la fundación por debajo de la berma-pie de impacto y el pie del Botadero final en septiembre del 2004. las curvas de respuesta de la presión intersticial para estos piezómetros indicaron una respuesta de presión intersticial insignificante, a la construcción de la pila de encapsulación y la berma de impacto, lo que sugiere que los suelos lacustres Tipo A estaban mucho mejor drenados que lo sugerido en los ensayos de conductividad hidráulica. No es inusual que los depósitos estratificados tengan una permeabilidad significativamente menor en dirección perpendicular que a la dirección paralela a la estratificación.

Morrénico. - Los suelos morrénicos son materiales típicamente muy consolidados, que pueden expandirse con el cizallamiento. En consecuencia, se espera que dichos materiales se comporten fundamentalmente como friccionales cuando se sometan a carga del botadero. Sobre la base de la gradación y de los taludes naturales observados, se asumió una fricción de 32° para los fines del presente estudio.

Fluvial/Aluvial. - En cuanto a los depósitos fluviales y aluviales, se espera que se comporten como materiales friccionales con una resistencia similar a la de los suelos coluviales. Sin embargo, allí donde están asociados a la unidad lacustre más grande, son lateralmente de espesor limitado y discontinuo, por lo cual han sido considerados parte de esa unidad. Aguas abajo de la unidad lacustre Tipo B, los materiales fluviales observados son en su mayoría de grano grueso y se espera que se comporten como materiales friccionales con una fricción mínima de 32° .

Desmote. - El desmote es un material grueso, angular, relativamente durable, de drenaje libre y friccional, este fue modelado utilizando una función de resistencia levemente no lineal. Esta función relaciona la resistencia al corte con la tensión normal y se basa en investigaciones llevadas a cabo por Leps (Leps, T.M., 1970. "Review of Shearing Strength of Rockfill" Sociedad Americana de Ingenieros civiles, Revista de la división de mecánica y fundaciones del suelo, V. 96, No. 4, julio/agosto 1970) en diversos materiales de relleno, modificadas de acuerdo con nuestra experiencia con desmote de buena calidad. La resistencia al corte con tensión efectiva equivalente (O') oscila entre 45° sin cohesión en tensiones normales muy bajas a 37° sin cohesión a tensión normal de 4 MPa. Nuestro conocimiento general sobre el desmote que se destina al Botadero Tucush existente (desmote de caliza gruesa, angular, relativamente durable, de "Clase C" (es decir, no mineralizada)) nos permite considerar que estos parámetros de resistencia al corte son razonables.

Masa rocosa. - De acuerdo con estudios previos, se modeló la masa rocosa intacta usando un ángulo de fricción de tensión efectiva, de 45° con una cohesión de 1000 kPa.

5.1.3 Supuestos Sobre el Agua Subterránea

Dada la característica de grano relativamente grueso de los materiales de desecho que actualmente se destinan al Botadero Tucush, se considera improbable la saturación de los desechos y el desarrollo de una napa freática

dentro del Botadero como resultado de la infiltración de la precipitación y la escorrentía. La segregación formará una capa efectiva de drenaje subterráneo en la base del Botadero si el desmonte se vierte desde una altura nominal de 25m o más. No obstante, donde se emplee la construcción ascendente, se reducirá la posibilidad de segregación del material de desecho en la zona de la plataforma del Botadero, donde la altura de la pila sea menor que 25m aproximadamente. Por consiguiente, Las zonas de la pila con una altura desde el pie hasta la cresta no inferior a 25m, este enfoque dejaría un área no rellena a lo largo del interior de la plataforma, la cual sería rellena posteriormente por la próxima pila. Para obtener los mejores resultados con capas de 6m y una capa de 10m, preferentemente deben usarse desechos limpios, duros, durables para la construcción, en las inmediaciones de los drenajes encajados. Se supone que este sistema de "drenaje subterráneo" se extenderá hasta el pie del Botadero propuesto, donde sería conducido hacia el Valle por el canal existente que drena el humedal, que a su vez descarga en la alcantarilla. Cuando la altura de la pila sea inferior a 25m, se realizó la pre construcción de drenajes rocosos en los canales naturales de drenaje. De modo similar, dado que la plataforma propuesta de la berma de impacto anterior está compuesta de un relleno cuyo espesor es inferior a 15m aproximadamente, se recomienda la pre construcción de un drenaje rocoso en el canal existente entre el pie del botadero.

Si se respetan las recomendaciones precedentes, la posibilidad de desarrollo de un nivel freático dentro del botadero será mínima. Consiguientemente, todos los análisis supusieron que la base del Botadero se saturaría solamente hasta el nivel del terreno original.

5.2 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD

Dado que el área de ampliación propuesta se ubica inmediatamente aguas arriba de una infraestructura minera y un camino rural con otros pueblos cercanos, la estabilidad tanto a corto como largo plazo del Botadero propuesto se considera crítica. Habiendo evaluado los resultados de los análisis, por ende la idoneidad del diseño propuesto y de la metodología de construcción, a continuación se detallan los criterios de aceptabilidad que se consideran apropiados: FS estático mínimo de diseño = 1.5 para geometrías del talud general y con pilas múltiples, para configuraciones intermedias y finales del Botadero.

- FS estático mínimo de diseño = 1.3 para geometrías con pilas individuales, donde se provea protección suficiente contra un derrame de material de deslizamiento.
- FS pseudo-estático mínimo a corto plazo (operativo) (1:475 año) de diseño = 1.1 para geometrías intermedia y final del Botadero. Para pilas individuales, se consideró que un FS pseudo-estático < 1.0 también era aceptable, condicionado a que se incorporen medidas de mitigación apropiadas en el diseño.
- FS pseudo-estático mínimo a largo plazo de diseño (MCE) = 1.0 para geometrías finales totales.

Los valores de FS mínimos, son para superficies de falla crítica donde el FS se calcula sobre la base de parámetros de resistencia al corte asumidos.

5.3 RESULTADOS DE ANÁLISIS BIDIMENSIONALES

Los modelos de análisis de estabilidad proporcionados fueron revisados y ajustados, para obtener valores mínimos de Factor de Seguridad (FS) para las geometrías analizadas según el avance del botadero en función al tiempo. Como los modos de falla circular no parecen representar modos de falla profundos, solo los resultados del análisis no circular se consideran aquí. Los resultados de los análisis de estabilidad se resumen en la Tabla I a continuación y los modelos de análisis que representan los modos críticos de falla se incluyen en el Anexo II Resultado del Análisis de Estabilidad

SECCIÓN DE ANÁLISIS	FACTOR DE SEGURIDAD	
	ESTÁTICO	SEUDOESTÁTICO (0.24 g)
TSE 1	1.61	1.28
TSE 5	1.67	1.32
TSE 6	1.53	1.17
TSE 6A	1.62	1.23

Cuadro 5.1 Resumen de resultados del Análisis de Estabilidad del diseño final del botadero de tucush.

Como se puede ver en esta tabla, los análisis de estabilidad indican que las fases propuestas para el botadero de desmonte en su etapa final, tienen valores

de FS estáticos > 1.5 y valores de FS pseudoestáticos > 1.0 (para el caso de sismo operacional de 0.29 g), los cuales son considerados aceptables.

A pesar de los resultados de estabilidad, se observó que la geometría ilustrada a lo largo de la Sección TSE 6 para las fases provisionales del desarrollo del botadero no reflejaba la geometría a lo largo de esta sección durante el desarrollo de la plataforma de botadero propuesto. A lo largo de esta sección, la última configuración de botadero parece representar el peor de los casos, y las fases intermedias, que aún serían reforzadas por la berma del impacto, representan geometrías menos críticas, Mientras la sección TSE 6A muestra los mejores resultados de FS, esto debido a que se encuentran apoyados sobre una plataforma anterior y sobre una berma de impacto ver Anexo II (Figura 110).

5.4 ANÁLISIS DE DERRAME DE MATERIAL DE DESLIZAMIENTO

El modelado numérico del derrame a partir de posibles fallas superficiales durante el desarrollo de la expansión propuesta al sureste del botadero Tucush se realizó utilizando el programa computacional DAN-W (O. Hungr, 2010 O. Hungr Geotechnical Research Inc., 2010 DAN-W - Dynamic Analysis of Landslides) utilizando un enfoque similar al adoptado para nuestro. DAN-W es un modelo basado en un algoritmo que resuelve de manera iterativa las ecuaciones de movimiento de Lagrange para una masa compuesta por una serie de bloques o elementos deformables. El programa calcula la posición, la forma y la velocidad de cada elemento en intervalos de tiempo discretos sucesivos. Los parámetros clave de entrada requeridos incluyen:

- La geometría de la pared, la superficie de falla y la zona de derrame;
- La reología general (características de deformación interna) de la masa de falla (por ejemplo, ¿se comporta más como un líquido viscoso o como un medio granular seco?);
- Las características del material general (por ejemplo, resistencia dinámica al corte, densidad, presión de poro) de la masa de falla que actúa a lo largo de la superficie de falla y la trayectoria de derrame;
- Las propiedades internas de resistencia al corte de la masa de falla y cualquier material de fundación que pueda quedar atrapado en la masa;
- El número de elementos utilizados para modelar la masa de falla y la orientación de los límites del elemento (ya sea vertical o normal a la superficie de falla)

- Un factor de forma para simular al confinamiento lateral de la masa de falla a lo largo de la trayectoria de derrame y la profundidad de la erosión a lo largo de la trayectoria de derrame.

Los parámetros de entrada de DAN-W utilizados para esta evaluación más reciente se basan en la calibración de los retro-análisis del derrame de las fallas superficiales que ocurrieron botadero Tucush. Los parámetros de entrada DAN-W utilizados para esta evaluación se resumen a continuación:

Parámetros de Control

Nº de elementos: 50 (esto se establece automáticamente por DAN-W)

Factor de Forma de Sección Transversal: 067

Parámetros de Material

Roca de Desmonte

Peso Unitario: 19.6 kN/m³

Ángulo de Fricción general: 30°

Ángulo de Fricción Interno: 37°

5.5 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD DE DERRAME

La probabilidad de que se produzca una falla en cualquier plataforma individual durante la construcción se reduce en gran medida cuando la pata del botadero se encuentra en la cara aguas arriba de la plataforma de berma de impacto. Como entendemos que la construcción de la berma de impacto será lenta y fue necesaria que este completa antes de que el botadero Tucush avance en su proceso constructivo, en las plataformas del botadero Tucush a lo largo de la Sección TSE-1 y TSE-5 se modeló utilizando DAN-W para evaluar el derrame y la posibilidad de que el material movilizado supere la plataforma de la berma de impacto. De acuerdo con las evaluaciones anteriores de derrame, se utilizaron superficies de falla con un máximo de FS de 1.3 para esta evaluación. Se razonó que las posibles fallas con valores de FS mayores a 1.3 tienen una probabilidad muy baja de ocurrir. Se asumió que la distancia a la que se encontraba la superficie de falla crítica detrás de la cresta era una función de la altura de la plataforma, y se estableció en el 10% de la altura de la plataforma para cada geometría, en base a las inestabilidades de botadero anteriores que se han observado en botaderos de gran altura. Dada la presencia de infraestructura aguas abajo del botadero propuesto, también se evaluó el peligro planteado por

el derrame de una falla de la plataforma de botadero Tucush en función de la cantidad de derrame potencial más allá la pata del botadero.

5.6 RESULTADOS

Para la plataforma de desmonte, los análisis indican que una falla superficial a lo largo de la alineación de la Sección TSE-1 podría movilizarse más allá de la cresta interior de la berma de impacto.

Para la plataforma de desmonte, los análisis indican que una falla superficial a lo largo de la alineación de la Sección TSE-5 podría derramar justo más allá de la cresta interior de la berma de impacto.

En un esfuerzo por retener el derrame a lo largo de la Sección TSE-1, la altura modelada de la berma del impacto se incrementó en 15 m, hasta la elevación de. Los análisis indican que una falla superficial a lo largo de la alineación de la Sección TSE-1 podría derramar justo más allá de la cresta interior de la berma del impacto.

Sobre la base de los resultados anteriores, se consideró probable que una falla de la plataforma del botadero pueda movilizarse más allá de la berma de impacto durante la construcción del botadero. Para minimizar el potencial de que esto ocurra, la altura de la berma del impacto se incremento nominalmente 30 m cerca de la Sección TSE-1 y al menos 15 m cerca de la Sección TSE-5 para aumentar la altura efectiva de la berma de impacto nominalmente a 65 m. Con base en los resultados a lo largo de la Sección TSE-5, la altura del impacto en la vecindad de la Sección TSE-6 se incrementó en altura nominalmente 10 mts, nuevamente dando lugar a una altura nominal, por encima de la pata de la plataforma, de 65 m.

Alternativamente, la cresta de la plataforma del botadero podría ser retenida, de modo que la punta de la plataforma no avance más allá de un punto que reduce la altura efectiva de la berma del impacto a menos de 65 m. El avance del botadero se recomienda que sea de forma que el avance en punta sirva como contrafuerte de los nuevos sectores generados en el botadero, y se defina una sombra de derrame de 50 m más allá de la punta de aguas abajo de la berma de impacto. Se considera que las áreas dentro de esta zona están en riesgo en caso de una falla superficial, y no se recomienda la construcción de infraestructura crítica o corredores de transporte dentro de esta zona. Si es necesario ubicar infraestructura crítica o corredores de acceso dentro de esta

zona, se deben considerar medidas de mitigación adicionales para proteger la infraestructura y / o el personal y el público.

También se debe mencionar que la construcción de la berma de impacto de 65 m, como se propuso. Sobre la base de los resultados de los análisis de derrame presentados anteriormente, para proporcionar una captación adecuada por debajo de la plataforma del botadero Tucush.

5.7 LIMITACIONES DEL DISEÑO

Los criterios de diseño presentados en el presente, se basan en programas de análisis e investigación in situ. Se consideran apropiados en base a las investigaciones y las evaluaciones adicionales, tales como las resumidas en el Cap. 2, se requerirán para verificar los volúmenes de excavación, se realizó la modificación de los planos y los criterios constructivos del Botadero Tucush en base a los resultados de los análisis de estabilidad incrementando la berma de impacto en los sectores de las secciones analizadas hasta una altura de 65 m, de modo que se ajusten a los criterios de diseño y a las recomendaciones contenidos del análisis.

Estos diseños tienen como objetivo la idoneidad del "Análisis de Estabilidad de las Descargas Masivas Botadero Tucush".

5.8 CONCLUSIÓN

Las siguientes conclusiones se basan en nuestra revisión de los resúmenes, de los archivos de análisis asociados y los resultados de los análisis de derrame:

- Sobre la base de los resultados de los análisis de estabilidad, la geometría de botadero Tucush asociada con el diseño de Descargas Masivas, debería ser adecuadamente estable.
- Donde la berma de impacto propuesta no se complete antes de la finalización de la plataforma, existe la posibilidad de que una falla superficial de la plataforma se movilice más allá de la berma del impacto. Para manejar esta probabilidad, se incrementó la altura de la berma de impacto para proporcionar una contención adecuada en el lado aguas arriba de la berma del impacto.

CAPITULO VI: CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL BOTADERO DE TUCUSH

6.1 CONSTRUCCIÓN DEL BOTADERO DE TUCUSH

6.1.1 Secuencia Constructiva del Botadero Tucush.

Uno de los métodos de construcción utilizados para la construcción del botadero de Tucush fue una construcción del tipo relleno a media ladera y cresta como se ilustran en la Figura 4.1 Se realizó trabajos complementarios (secuencia de bermas de impacto) previos al inicio de las descargas del botadero de Tucush, el comportamiento durante la construcción debe estar monitoreado a través de piezómetros y extensómetros todos monitoreados por telemetría, los cuales deben estar bien documentados y deben ser de fácil acceso. Durante las primeras etapas de la construcción del botadero, la estructura está sujeta a presentar superficies de falla debido a los taludes rocosos sub verticales, Se tuvo que desarrollar aguas debajo del botadero bermas de impacto construidas previamente al inicio de la construcción del botadero, la cual actuó como un contrafuerte para la base del botadero en su etapa intermedia de construcción y proporciona confinamiento para los suelos de la fundación. Otra ventaja de este tipo de construcción es que acorta las distancias de acarreo de los camiones mineros, muchas veces haciendo viable el desarrollo de un proyecto minero debido a la variabilidad de los precios de los minerales. En la mayoría de las minas a tajo abierto, la mina se inicia a una elevación relativamente alta y con estructuras o plataformas hacia abajo para mejorar la fundación. Como consecuencia de la economía se establece un nivel de recorrido en base a una serie de plataformas que son construidas a elevaciones intermedias para mejorar la fundación, las condiciones de cimentación y los taludes del terreno mejoran la estabilidad, al mejorar la fundación controlan frecuentemente los parámetros que incrementan la estabilidad.

En el Anexo A se indicará la secuencia constructiva del botadero Tucush, en la cual se mostrará el diseño de la berma de impacto previa a la construcción del botadero Tucush, así como el avance y crecimiento del botadero durante su construcción.



Figura 6.1 inicio de los trabajos del Botadero Tucush. (relleno a media ladera, año 2006)

6.1.2 Distribución del Material y Avance de la Cresta

Al iniciar con el proyecto del botadero de Tucush, el principal objetivo fue generara áreas de descargas con similares condiciones, el durante la primera etapa de la construcción del botadero es la etapa pueden ser activadas las fallas superficiales, para el caso del botadero de Tucush se tuvo las siguientes consideraciones, primero determinar la línea de contacto roca y relleno en la cresta donde se inició la construcción del botadero, generar una plataforma intermedia con el fin de mejorar la fundación confinando y consolidando los materiales del tipo morrenico y coluvial como se muestra en el Plano DWG A1 – 101 del Anexo I, con el objetivo de incorporar un mayor número de sectores de botaderos con condiciones similares para que pueden ser activados los una vez que alguna de las plataformas presente condiciones de asentamientos en la cresta, incrementando la longitud de la cresta del botadero generando un mayor número de áreas de descarga generando alternativas de descargas necesarias muchas veces para asegurar la continuidad del negocio. Hacer esto tiene dos beneficios. El primero es si una falla se presenta en un sector del botadero donde se puede observar el incremento de velocidades en la instrumentación geotécnica (extensómetros digitales) y el hundimiento de la cresta es excesivo, se suspenden las operaciones de ese sector del botadero hasta que se realice la supervisión geotécnica y se evalué las condición real del sector hasta que las condiciones se estabilicen, una vez que las condiciones se estabilicen (para el caso del botadero de Tucush es cuando los extensómetros digitales evidencien

velocidades menores a 1 cm/hr) se debe realizar la caracterización del botadero determinando las condiciones reales del sector e indicando el método para remediar las condiciones ya sea con corte de la plataforma, relleno de las mismas e indicando los ratios de descarga y el tipo de material. En segundo lugar, el vaciado a lo largo de toda la cresta en la mayor cantidad posible minimiza el avance de la cresta del botadero. Esto reduce el índice de carga en la cimentación y evita un posible incremento de la presión de poros en la fundación. Es relevante reconocer que para la construcción de este tipo de estructuras un índice lento de llenado (avance de cresta) permite tener más tiempo para que los materiales del botadero se consoliden y adquieran mayor resistencia a la fricción (Leps 1970).

6.1.3 Factores Topográficos a Considerar Durante la Construcción del Botadero Tucush

La topografía es una de las variables importantes a considerar durante la construcción de botaderos de gran altura ya que por lo general debajo de los botaderos los taludes presentan pendientes pronunciadas para el caso de botadero de Tucush pendientes mayores a los 40° debajo de los sectores que se va llenando, en la mayoría de los casos estos determinan la estabilidad de los botaderos de gran altura durante la construcción. El desarrollo del botadero debe planearse aprovechando al máximo la topografía del sector, siempre en este tipo de estructuras se debe tener en cuenta los sectores de máxima pendiente que sean ejes de quebradas, como experiencia durante la construcción de las diferentes plataformas del botadero de Tucush estas estos sectores son los de mayor probabilidad a desarrollarse una falla. Cuando los botaderos se van llenando en terrenos de taludes empinados, se deben seguir varios pasos para minimizar el riesgo de estabilidad.

El inicio de los botaderos en gran altura se debe comenzar con los rellenos en los sectores de con taludes sobreinclinados donde los taludes son menores y el confinamiento mejore la estabilidad del mismo.

Es importante considerar el diseño de estructuras complementarias en la base del botadero como bancos inferiores y bermas de impacto en las que se apoyará en pie del botadero o en la topografía disponible más plana, después de que el relleno inicial se haya adaptado a la topografía Ver Fig. 4.1.

las quebradas que atraviesan un talud empinado deben llenarse por medio del vaciado en el eje de la quebrada, esto evitará tener que atravesar los taludes

laterales empinados de la quebrada y promoverá la segregación natural de la roca gruesa en la base de la quebrada mejorando el drenaje subterráneo. La secuencia recomendada para el desarrollo de los botaderos de mina en una topografía sobreinclinada se ilustra en la Figura 4.2.

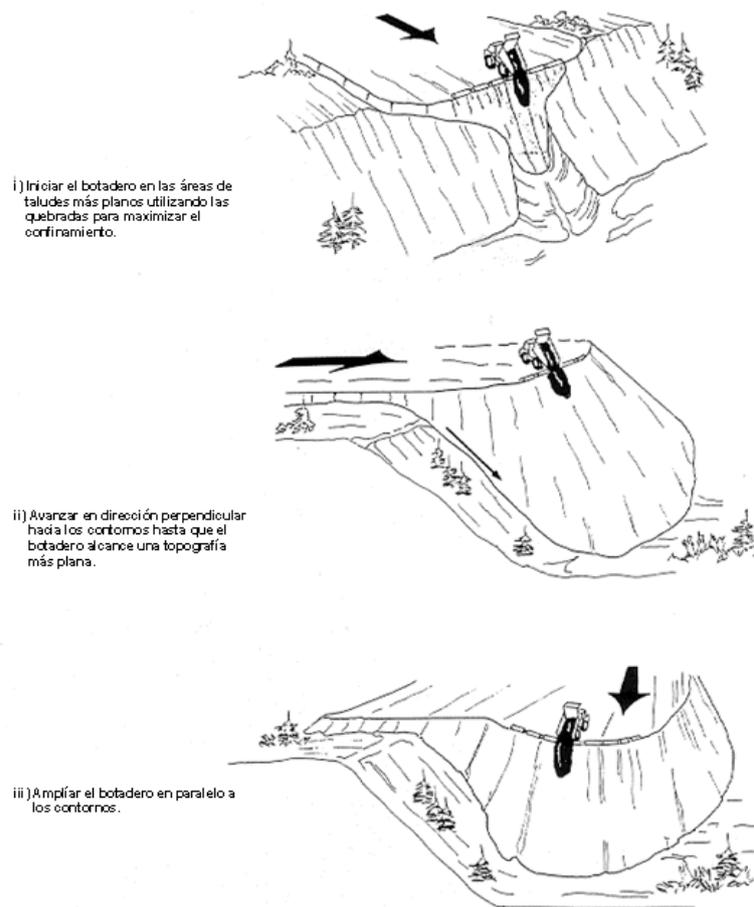


Figura 6.2 Secuencia para el Avance de Botaderos en Terrenos Empinados.

6.1.4 Terrazas y Estructuras Complementarias para Mejorar la Fundación

Las terrazas y las bermas de impacto son estructuras que proporcionan estabilidad para el diseño de botaderos de mina y pueden simplificar y acelerar la construcción del mismo. Las terrazas, por lo general, están relacionadas a la construcción ascendente, para el caso de estudio para la construcción del botadero de Tucush se realizó una mezcla de diferentes metodologías, para la construcción se conformó tanto terrazas como bermas de impacto, para posteriormente realizar la el relleno desde la cresta en sobre la plataforma

inferior, manteniendo así una berma de impacto durante la construcción del botadero de Tucush. Estas bermas de impacto son dimensionadas en caso se desarrolle algún evento de falla, como de detalla en capítulo 3 de estabilidad. Estas estructuras circundantes están asociados al tipo de construcción de botaderos descendentes y están configurados para mejorar y reforzar la fundación por medio de la construcción de los bancos intermedios. Las plataformas o bermas están típicamente ubicadas a intervalos verticales de 20 a 40m, y pueden ordenarse de manera descendente en la dirección de avance. El ancho de cada plataforma o berma se determina sobre la base de los requerimientos de la capacidad de eliminación, consideraciones de estabilidad y condiciones del talud en la base del mismo.

6.1.5 Consideraciones para diseñar Bermas de Impacto Botadero Tucush

En los casos en que los peligros potenciales prohíben o restringen las construcciones del botadero, puede ser viable mejorar la estabilidad del botadero a través del uso de bermas de impacto estas deben ser dimensionadas por un especialista considerando un volumen generado en base a los análisis de estabilidad, la implementación de trabajos de mitigación o protección contra el peligro de falla pueden hacer que el terreno sea utilizable como vía para acarreo de material o vía de conexión con otros sectores de la mina. Los trabajos de mitigación para temas de seguridad, comprenden bermas de impacto, la desviación de cuencas se complementa con trabajos de drenajes o conformación de plataformas para mejorar la fundación. El diseño requiere considerar las condiciones reales del terreno, así como con la evaluación del tamaño y de las características de flujo generado en caso de produzcan posibles fallas. En los terrenos con taludes empinados, donde el factor de seguridad es bajo y donde la probabilidad de ocurrencias de fallas superficiales es alta, es importante considerar estructuras complementarias como bermas de impacto al pie del talud, Si los daños potenciales relacionados a la falla pueden afectar personas o infraestructuras es importante reubicar el botadero o a la infraestructura posible a afectación, una medida de protección es construir una estructura de contención en forma de anillo en una ubicación cercana pie del botadero en su etapa final. Una berma de impacto es considerada una parte integral del diseño del botadero el objetivo de una estructura como la berma de impacto es incrementar del factor de seguridad incorporando mayor cantidad de

masa posible al piede del botadero. Las bermas de impacto, generalmente, se ubican talud abajo de la base del diseño final del botadero, donde funcionan como contención ante los bloques individuales como para flujos generados por activación de, El diseño de las bermas de impacto deben contemplar el volumen masa determinado en los análisis de seguridad, para contención de una falla de un tamaño específico al momento de activarse estas deben ser contenidas en las estructuras como la berma de impacto. Las bermas de impacto pueden ser muy efectivas para mitigar los problemas de desviación relacionados a pequeños derrumbes y flujos. Sin embargo, construir las bermas de impacto con la suficiente masa y tamaño como mitigar significativamente las fallas mayores de los botaderos, comúnmente, no es práctico. La Figura 4.3 a la derecha ilustra las configuraciones clásicas para pilares y bermas de impacto.

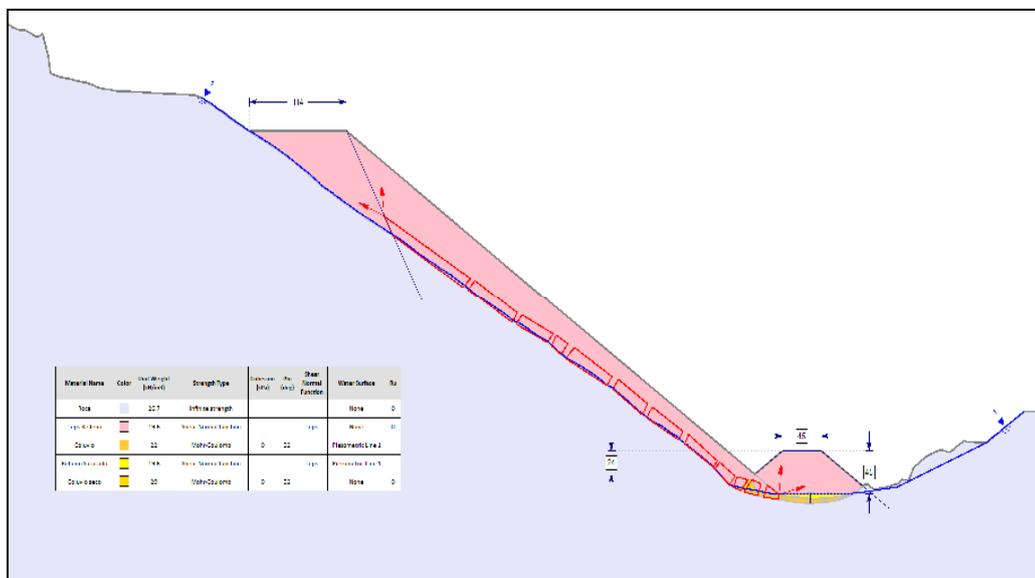


Figura 6.3 Muestra un ejemplo de una Bermas de Impacto.

6.2 INSPECCION GEOTECNICA DE BOTADEROS

Durante el proceso constructivo de los botaderos ubicados en el valle Tucush la supervisión Ingeniero Geotécnico estaba contemplada desde el inicio, es parte del requisito que se estableció como parte de las recomendaciones del diseñador y dentro de los acuerdos internos de la empresa debido a la criticidad en la etapa inicial del botadero, la labor del supervisor es realizar la caracterización de los frentes de descarga activos una vez durante la guardia día dando la prioridad a los botaderos más críticos; en caso de obtener como

resultado de la caracterización una valoración menor o igual a 30 (Condición “Malo”) se procederá a cerrar el botadero en coordinación con el supervisor del área (ver 4.3.3 Criterios para Control Geotécnico de Botaderos), En caso se identifique grietas de tensión, asentamientos en la plataforma, abultamientos en el talud y/o fallas de desgarre el supervisor Geotécnico evaluará las condiciones y brindara las recomendaciones necesarias a realizar el cierre de ser necesario. El supervisor Geotécnico deber ser calificado con experiencia este brindara las recomendaciones según su evaluación realizada en el botadero de Tucush, este propondrá la remediación ya sea recomendando el uso del método de avance de corte y relleno. El operador de maquinaria pesada será un colaborador estratégico encargado de brindar realizar el trabajo de remediación, el soporte ante estos problemas deberá de ser elaborado en un plan de mantenimiento preventivo este debe salir de los resultados obtenidos por la caracterización realizada por el geotécnico de turno, con la finalidad de garantizar la continuidad de la operación.

6.3 CARACTERIZACIÓN DE BOTADEROS FRENTES DE DESCARGAS ACTIVOS.

Los botaderos son estructuras a manera de montones construidos como, Apilamientos directamente sobre terrenos planos, pendientes muy suaves, Simplemente apoyados sobre taludes naturales a lo largo de quebradas e inclusive a lo largo de crestas, como ya se vio en cap 2. Estos apilamientos pueden estar sujetos a distintos grados de deformación que pueden dar lugar a distintas formas de ruptura. El objetivo del Sistema de Clasificación Geotécnico para valorar las distintas condiciones de un botadero es para optimizar su construcción y durante las evaluaciones geotécnicas diarias ver las condiciones del botadero critico antes de iniciar con las descargas, evaluando los siguientes parámetros, controlando la calidad de los materiales, distribuyendo ordenadamente las descargas en todo el frente de la plataforma y sobre todo manteniendo la Seguridad y Producción como los factores más importantes en su construcción, verificando la correcta ubicación de la instrumentación geotécnica antes del inicio de los trabajos. Las plataformas de los botaderos caracterizados para el presentan las siguientes bajas temperaturas y fuertes precipitaciones durante los periodos de setiembre a abril y fuertes nevadas lo cual afecta al monitoreo geotécnico. En estos climas la influencia de las precipitaciones y las nevadas, generan un aporte importante de las aguas de

escorrentías por infiltración en la plataforma del botadero debido a la granulometría del material que puede variar entre 0.05 hasta 2 m. estos juegan un papel importante para la estabilidad del botadero debido a que pueden incrementar la presión de poros, disminuyendo las fuerzas resistentes del botadero.

6.3.1 Valoración del Riesgo Durante la Caracterización

Se define el riesgo como el producto del peligro que puede ser medido en función a la frecuencia o probabilidad de ocurrencia y magnitud de un evento adverso (DS 024), El riesgo se divide en tres:

- Seguridad de Personal y Equipo.
- Riesgo de las Instalaciones.
- Riesgo Ambiental.

6.3.2 Sistema de Clasificación Geotécnica Aplicada a la Construcción de Botaderos de Gran Altura

El sistema de clasificación geotécnica, se aplica durante las evaluaciones diarias realizadas por la supervisión geotécnica, durante la evaluación se observa y valora los siguientes parámetros que definirán las condiciones en la que se encuentra la plataforma del botadero antes del inicio de los trabajos, para este trabajo se tomó como referencia lo realizado por el Ing. Carlos Aguirre Carpio en veladero “CONSTRUCCIÓN DE BOTADEROS DE DESMONTE A PARTIR DE UNA CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA EN ZONAS DE CLIMAS SECOS CON INVIERNOS RIGUROSOS”

6.3.3 Objetivo de la Calificación de Botaderos de gran altura

El objetivo principal de la caracterización de botadero es realizar la construcción de los botaderos sin eventos de seguridad, colocando como prioridad la seguridad del personal, cuidando el medio ambiente y las instalaciones e infraestructura, generando un programa de descargas controlado para evitar la sobrecarga del botadero ya que esta es una de las razones principales de la ocurrencia de los deslizamientos según lo registrado por la British Columbia, buscando siempre el equilibrio sin llegar a ser ni muy conservador ni muy

permisible, apoyados con una correcta instrumentación y evaluación geotécnica, buscando ajustes en los programas de descarga basados en las condiciones del botadero.

simplificando los criterios personales y empleando factores probados logrando estandarizar las evaluaciones geotécnicas con el sistema de caracterización, aplicando el sistema de caracterización a sectores con condiciones semejantes o simplemente distintos ajustando ciertos parámetros como se puede observar en la matriz de caracterización, para el análisis del comportamiento de los botaderos se evalúa las siguientes valoraciones.

- Asentamientos de la Plataforma. En caso se presenten una herramienta para controlar los niveles de asentamiento son los extensómetros digitales, estos registran las deformaciones unidireccionales de acuerdo a la instalación de la instrumentación para nuestro caso en el botadero de Tucush se usó extensómetros digitales SLIDEMINDER, la Figura 4.4 muestras el asentamiento registrado en plataformas activas en botaderos de gran altura.

- Condición de las Bermas. Una de las referencias al momento de realizar la evaluación geotécnica es la condición de las bermas, estas tu pueden brindar una información inmediata del tipo del material y del ratio de descarga realizado en la plataforma, así como la condición de la fundación durante el avance de cresta en el turno de trabajo, en la figura 4.4 se pude observar, la información que nos brinda las condiciones de las bermas, tipo de material, ratio de descarga y asentamiento, así como la condición del talud si presenta cambios de pendiente.



Figura 6.4 Muestra las grietas de Tracción (asentamientos) presentadas en las plataformas.

- Presencia de Grietas. La evidencia de grietas en las plataformas, para el caso de los botaderos de Tucush se deben a varios factores uno de ellos es la altura de los botaderos, la granulometría del material usado para la construcción del botadero, las grietas de tracción registras durante la construcción del botadero de Tucush se lograron documentar grietas hasta los 80 metros tomando en cuenta la posición inicial de la cresta del botadero como referencia, la Fig 4.4 muestra la formación de grietas en una de las plataformas del botadero.
- Condición de la Plataforma. Es uno de los factores relevantes para la operatividad del botadero, esta engloba varios parámetros como asentamiento de la plataforma, condición de la berma, ondulaciones en la misma, dependiendo de la evaluación de las condiciones de la plataforma el supervisor de geotecnia establecerá dentro de las recomendaciones para el reinicio de los trabajos en la plataforma, el método constructivo para la remediación este puede ser aplicando corte y relleno de la plataforma dependiendo de las condiciones del ángulo del talud sobre inclinación mayor a 39° , o simplemente reiniciar nivelando la plataforma con material de mediana granulometría.

- Instrumentación Adecuada, la instalación de una adecuada instrumentación en las plataformas de los frentes activos de los botaderos, sirven para brindar una alerta temprana frente a la activación de una falla, este punto se detallará en el punto 4.4.5 Monitoreo e Instrumentación Geotécnica, en el cual se mostrara la importancia de trabajar con instrumentación en tiempo real y que estas cuenten con niveles de alarma que pueden advertir la generación de un evento, esta herramienta es de gran utilidad para la construcción de grandes botaderos, para el caso del botadero de Tucush los eventos registrados durante el proceso constructivo nos brindó como aprendizaje el espaciamiento entre extensómetros es de 100 a 120 metros, esta distancia en la cresta sirve como un sector empleado para descargar (nueva plataforma de descarga) ver Figura 4.5.
- Presencia de Agua. Cuando un botadero solo tiene estabilidad marginal y el riesgo de falla con una gran desviación no es aceptable, se debe poner particular atención al efecto que pueda tener la incorporación de agua y nieve en el botadero debido a la infiltración sobre el material granular y los efectos de estos sobre la estabilidad del mismo.



Figura 6.5 Muestra la sectorización del botadero y la instrumentación geotécnica

- Tipo de Material. - En caso de tener material de mala calidad para la construcción de este tipo de estructuras se requiere realizar una mezcla de relación 3/1 (3 de Material de Buena granulometría por 1 de Material de Mala Calidad), la distribución debe ser regular y en todo el ancho de la plataforma del

botadero seleccionado, esta proporción aplica a equipo pesado (camión Caterpillar o Komatsu). Para el caso de volquetes de 15m³ o similares la proporción es de 9 volquetes (mala calidad) / 3 volquetes (buena calidad).

El Ingeniero Geotécnico II indicará los límites de descargas para cada zona, los límites se encuentran establecidos de acuerdo a lo indicado en el cuadro de Niveles de Alarma, en la columna Reducir Descargas.

- Distribución del Material a lo largo de los Frentes de Descarga. El tractor siempre deberá operar perpendicular a la cresta y este debe ser un operador calificado y entrenado cuya labor fundamental es la distribución del material a lo largo de toda la plataforma, en caso se presenten grietas tensionales y fallas de desgarre el operador de tractor del área debe informar inmediatamente a su supervisor de guardia el cual coordinará con Geotecnia a fin de evaluar la condición del botadero.

- Ángulo del Talud. Por lo general este parámetro está asociada a problemas de fundación, sobrecarga de ratios de descarga, tipo de material y distribución de material, durante la construcción del botadero se forma dos ángulos en los taludes, al pie del botadero se forma una talud con el material grueso segregado naturalmente por las descargas al vacío generalmente menos a los 37° esto puede generar una confusión al momento realizar la caracterización del botadero, por eso la importancia de saber diferenciar en campo este tipo de condiciones.

- Taludes Combados, este tipo de condición se puede presentar debido a problemas en la fundación o por descarga excesiva de material fino o sobrecarga de material sobre el botadero, la topografía es una de las condiciones que puede generar este tipo de condiciones geotécnicas.

- Condiciones de la Pata, mediante la observación del pide del botadero se pude determinar problemas en la fundación generalmente el aborregamiento del material orgánico, coluvial o lacustre es un indicio de alta probabilidad de ocurrencia de fallas.



Figura 6.6 Muestra la formación de los ángulos de taludes y taludes combados

6.3.4 Calificación de Botaderos

Para una correcta construcción de los botaderos se debe realizar una correcta zonificación de las áreas de descarga con la finalidad de poder identificar fácilmente el sector y lugar preciso de los frentes activos de descarga esto con el objetivo de realizar un correcto Monitoreo de las deformaciones en la plataforma, deformaciones en las crestas, deformaciones en los taludes y las deformaciones en la fundación.

Distribuir y programar adecuadamente los materiales provenientes de los diferentes frentes de minado cumpliendo con el crecimiento de los botaderos de acuerdo al Plan de Largo Plazo y Corto Plazo, es otro de los puntos importantes durante la clasificación de los botaderos. Los Criterios para Control Geotécnico de Botaderos se detallan a continuación:

1. Selección de las Zonas.
 2. Observaciones de Campo.
 3. Planeamiento Largo Plazo y Corto Plazo.
- Avance de Cresta Semanal.

- Avance de Cresta Mensual.

4. Zonificación de Botaderos.

- Ancho Operativo: Descarga Perpendicular al Ingreso.
- Ancho Operativo: Descarga en Dirección al Ingreso.
- Señalización: Letreros.
- Instrumentación adecuada.
- Control de los Frentes de Descarga en los Botaderos: Topografía.
- Selección de lugares para la descarga: Tipo de Material.

6.3.5 Control de la Calidad del Material

Una de las formas más efectivas para mejorar la estabilidad del botadero es mediante el control adecuado del material decir al tener control sobre la calidad del material ubicado en las partes críticas del botadero está demostrado que mejora sustancialmente las condiciones de estabilidad del botadero. Cuando se hace vierte el material sobre en un terreno de talud inclinado, solo se debe colocar relleno de roca estéril, durable y gruesa en las quebradas o cursos de agua definidos ya que estos servirán como dren natural debido a la segregación de los bloques de mayor tamaño por gravedad al momento de realizar las descargas al vació. Otra de las ventajas al momento de realizar las descargas al vació sobre taludes naturales de ángulos mayor a los 30° es que la roca estéril gruesa directamente en los taludes mejora el contacto de fricción entre el relleno y la cimentación, mejora el drenaje e incrementa la resistencia cerca de la base del botadero.

Los materiales de grano fino, quebradizos y de baja calidad deben ser colocados en las partes superiores del botadero, donde el material no está expuesto a flujos de escorrentía significativos. Los suelos y rocas descompuestas altamente meteorizados deben conformar lo bancos o plataformas de botaderos alejadas del contacto con la parte inferior de la pared del botadero y la fundación, es importante considerar la mezcla del material del relleno de roca estéril fina con los residuos más gruesos o colocados en la parte superior de los botaderos finales para ser usados mejorar la calidad del material. Los materiales finos de los botaderos deben ser ubicados en bancos delgados y compactados con camiones de acarreo para mejorar la estabilidad y la resistencia. La mayor

cantidad posible de rocas gruesas de buena calidad usados en relleno de quebradas naturales y los sectores de contacto del botadero con la fundación, lo importante de realizar descargas al vacío es que naturalmente se segregan por gravedad los bloques de mayor tamaño y estos llegan a la fundación mejorando la misma.

Condición del Botadero	Valoración	Ajustes
Botadero Malo	0 a 30	Si los valores son menores a 15 y los resultados del monitoreo establecen aceleraciones mayores a 3.5cm/h cerrar el botadero hasta remediar los problemas; si los valores están entre 15 y 30, cerrar el botadero, remediar y reducir las descargas en un 50%
Botadero Regular	30 a 50	Si el valor varia de 30 a 40 reducir las descargas en un 20% y si el valor varia entre 40 y 50 reducir las descargas en un 10%
Botadero Bueno	50 a 70	No necesita factor de ajuste

Cuadro 6.1 Muestra los Ajuste Realizados Debido a la Caracterización del Botadero

Otro enfoque para manejar los materiales de botaderos de baja calidad es colocarlos en botaderos intermedios. Estos materiales deben ser incorporadas en botaderos intermedios, mediante un plan de descarga generado por el área de planeamiento mina de manera organizada de modo que no se descargue material fino en zonas de falla potencial.

6.3.6 Ajuste de Descargas en el Botadero

La grafica 4.6 muestra que la aplicación de los planes de descarga lo funcional que para la construcción de botaderos de gran altura ya que se ha logrado optimizar el trabajo en los botaderos, basándonos en la información obtenida por la instrumentación geotecnia esta complementada con las evaluaciones geotecnias haciendo uso de la caracterización de botaderos, se logró la optimización de las ratios de descarga sin sobrecargar el botadero.

El análisis del comportamiento en el botadero muestra que respetando la ratio de descargas propuesto se puede asegurar la estabilidad del botadero y por otro

lado se puede evitar el sub dimensionamiento de descargas que atente contra la producción.

De acuerdo a los resultados obtenidos con la aplicación del sistema se concluye que para diferentes condiciones en un botadero es necesario aplicar diferentes factores de ajuste a las descargas planificadas, esta programación es aconsejable realizar para los planes semanales de descarga los cuales podrían ser fácilmente modificados si la condición del botadero mejora.

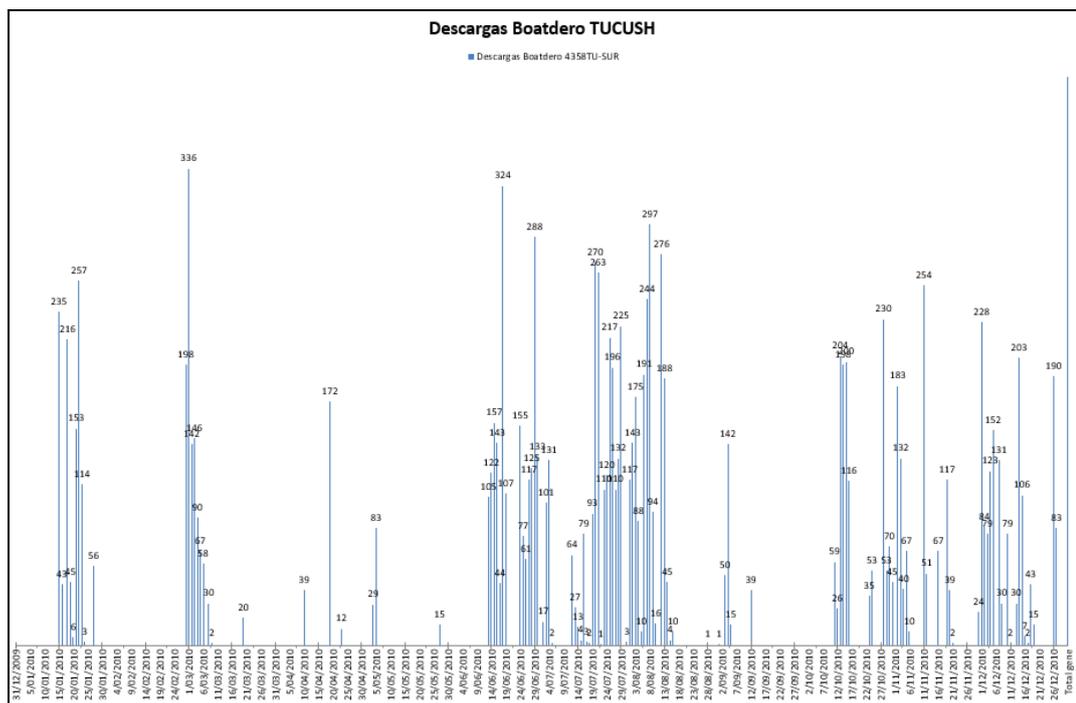


Figura 6.7 Muestra las descargas acumuladas por turno durante el año 2010

6.3.7 Resumen y Consideraciones Principales del Sistema de Clasificación

El sistema propuesto es producto de la experiencia en los botaderos de Tucush y en otros lugares de condiciones distintas. La aplicación del sistema permite despejar las dudas referidas al proceso constructivo de botaderos con problemas como asentamientos, agrietamientos, fallamientos y la dificultad en la distribución de materiales. Facilita la distribución ordenada de los materiales en los diferentes frentes de descarga. Si un sector del botadero es inestable puede ser paralizado y se pueden habilitar otros sectores sin problemas. Los planes de diseño de botaderos deberán contemplar todos los factores adversos que puedan afectar

su normal construcción; presencia de materia orgánica, afloramientos naturales en los taludes, drenajes, etc. Este sistema propone como una metodología de trabajo para botaderos activos y no se contrapone con los sistemas propuestos por la British Columbia. Como todo sistema de clasificación geotécnico la propuesta presentada en este trabajo deberá ser continuamente calibrada y mejorada con el tiempo.

6.4 CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCION DEL BOTADERO TUCUSH

6.4.1 Remoción de Suelos Orgánicos y Otros Suelos Débiles

Debido a que se hallaron suelos lacustres de grano fino en varias calicatas y perforaciones en la base del Valle Tucush (ver plano DWG A1 - 101). Tomando como base la distribución interpretada de los tipos de terreno, estos suelos comprenderán un tramo significativo de la fundación del Botadero de Desmonte Tucush. Tal como se describió en el cap 2, se observó que estos suelos son húmedos a saturados y blandos a firmes en consistencia.

Excepto donde se provean específicamente los suelos orgánicos o blandos, sueltos o saturados de grano fino, deberán removerse desde adentro del contorno de la ampliación sureste propuesta del botadero Tucush (es decir, suelos lacustres Tipo A en la fundación del botadero Tucush actual, suelos lacustres Tipo B cuyos análisis de estabilidad indiquen que pueden ser encapsulados sin impactar la estabilidad del botadero total, etc.). Se debe tener cuidado durante la remoción de suelos incompetentes/suavizados para minimizar la perturbación de los suelos competentes subyacentes y promover el drenaje en estas áreas. Estos materiales deben removerse y eliminarse en un área de escombrera adecuada fuera del contorno del Botadero de Desmonte Tucush. Cuando la excavación de suelos incompetentes produzca una depresión topográfica, la excavación se rellenará con estéril limpio y de buena granulometría, para evitar que el agua se embalse y ayudar a prevenir la erosión y el transporte de sedimentos. Una vez terminada la preparación de la fundación, ésta deberá ser inspeccionada por un ingeniero geotécnico calificado, a fin de confirmar que todos los suelos incompetentes se hayan removido antes de comenzar el desarrollo en un área dada.

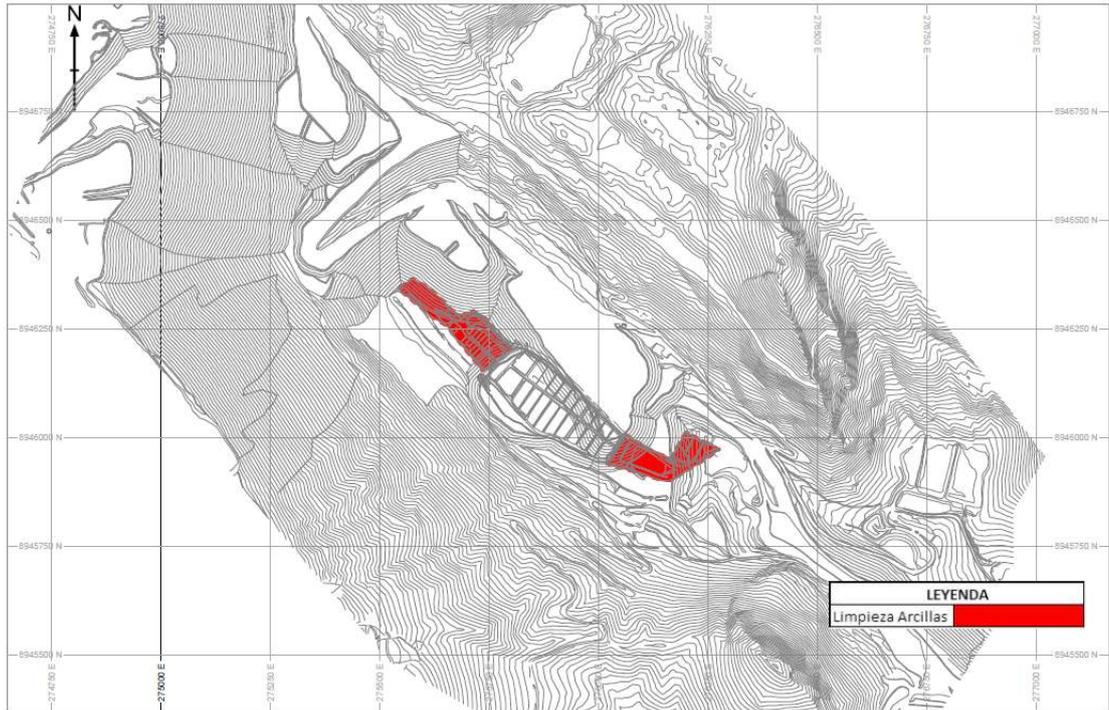


Figura 6.8 muestra los sectores con mayores potencias para ser removidas en la base del botadero

6.4.2 Vertido o Descarga Direccional

Cuando se realice vertido directo de camiones sobre taludes moderados a empinados, deberá aprovecharse al máximo toda diversidad topográfica que mejore la estabilidad a corto plazo, realizando este tipo de vertido los bloques de mayor tamaño segregan naturalmente por gravedad hacia el pie del botadero en el contacto del botadero con la fundación sirviendo como dren natural, Cuando sea posible, el desarrollo del vertido continuará a través del talud, antes que directamente por la línea de máxima pendiente.

Se utilizará tanta longitud de cresta como sea posible para minimizar las tasas de avance de crestas y maximizar el tiempo disponible de consolidación tanto para el estéril como para los materiales de la fundación.

6.4.3 Colocación Selectiva del Material

Donde sea posible, el material se vaciará en forma directa con camiones en una pila con ángulo de reposo mínimo de 25° . Esto fomentará la segregación natural de los materiales, y los bloques rocosos más competentes más grandes se dirigirán al pie de botadero. Los materiales de grano más fino, tales como desmonte con arcilla alterada u oxidada o suelos de grano fino, deberán

colocarse en áreas donde la estabilidad no sea crítica y donde el drenaje no los afecte.

6.4.4 Drenaje y Escorrentía Superficial

Se deberá tomar medidas específicas para controlar la escorrentía superficial y el drenaje. En particular, las superficies de las pilas deberán aplanarse lejos de la cresta de la pila, a no menos del 2%. La escorrentía deberá captarse en zanjas y conducirse lejos de la pila en áreas donde no contribuya a una inestabilidad potencial.

6.4.5 Monitoreo e Instrumentación Geotécnica

Se llevarán a cabo inspecciones visuales permanentes regularmente en todas las plataformas y en las caras de las pilas para identificar agrietamientos, pandeo de la cara, el pie o el área de la fundación, u otros indicios de inestabilidad. Se realiza el monitoreo de las áreas de las crestas utilizando extensómetros digitales, otros métodos para identificar a tiempo emplazamientos con GPS, casetas robóticas con prismas instalados en la plataforma y radares, estos equipos medirán las deformaciones significativas o inusuales que puedan indicar el desarrollo de inestabilidad. Un ingeniero geotécnico calificado deberá llevar a cabo inspecciones periódicas del botadero durante su desarrollo.

A fin de monitorear el incremento de la presión intersticial (presión de poro) y los índices de disipación en suelos lacustres Tipo B en la fundación, para monitorear el posible incremento de la presión de poros se instaló una red de piezómetros de cuerda vibrante en la fundación del botadero. Las ubicaciones de los piezómetros por debajo del botadero se muestran en las Fig. 4.9 Se instalaron diez piezómetros de cuerda vibrante en diez perforaciones, una por pozo, en suelos lacustres por debajo de la ampliación propuesta del Botadero Tucush para monitorear los niveles piezométricos y la respuesta de la presión intersticial a la velocidad de carga del botadero. Dadas las presiones intersticiales que pueden generarse dentro de estos suelos, se utilizó transductores de piezómetros con un rango de operación de entre 0 y 250 psi.

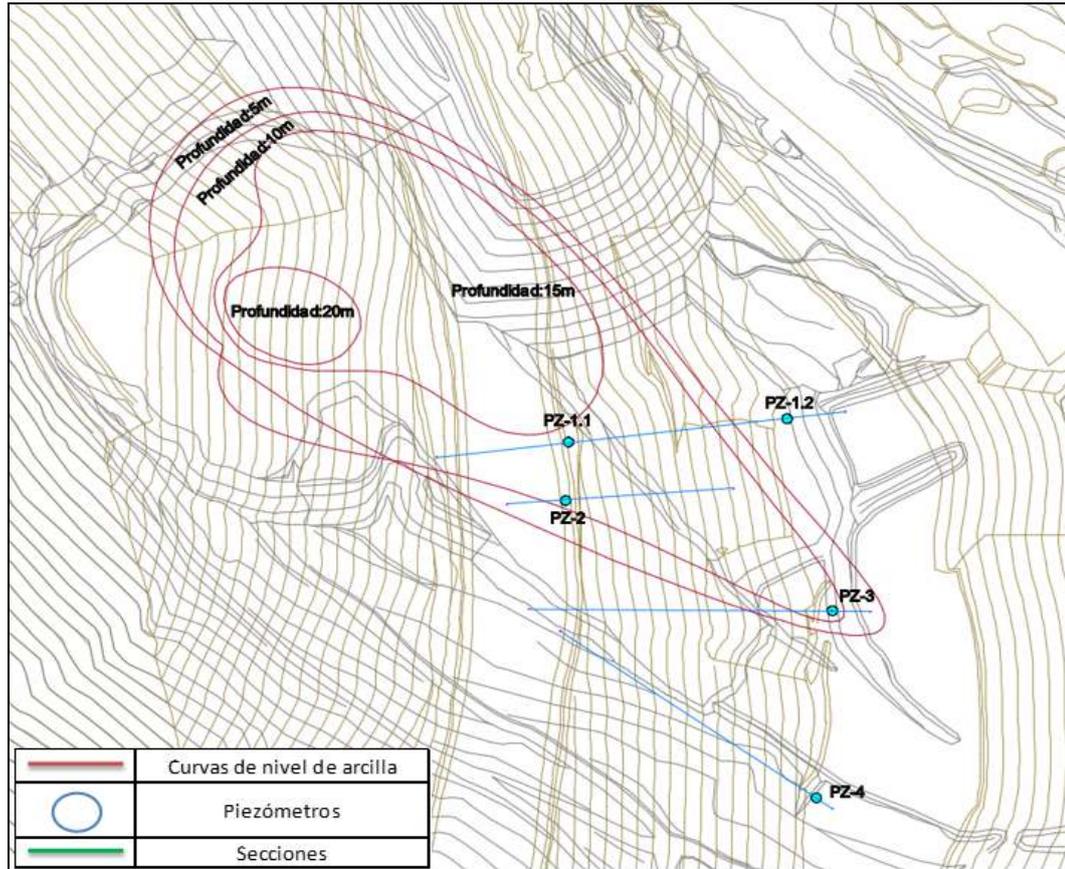


Figura 6.9 muestra los sectores donde se instalaron los piezómetros en la base del botadero

Los transductores de los piezómetros deben instalarse en sondajes entre 3 y 5m por debajo de la superficie del terreno. Los cables de los transductores deben portegerse con conductos de acero enterrados en trincheras excavadas en la fundación del botadero y deben terminar en una ubicación conveniente más allá del pie del Botadero final para facilitar el monitoreo a largo plazo. El monitoreo de piezómetros de cuerda vibrante deberá llevarse a cabo al menos semanalmente, durante períodos de construcción de botaderos encapsulación de pilas y cada dos semanas en otros momentos.

6.4.6 Extensómetros Digitales

Es un instrumento que nos sirve para medir el movimiento relativo superficial entre dos puntos expresado en cm / h . este sistema es empleado para el proceso constructivo de botaderos de gran altura en la mayoría de las operaciones mineras, los extensómetros digitales realizan la recolección de datos de velocidad y desplazamiento en función del tiempo, la principal función de esta instrumentación es la advertir de forma temprana del posible desarrollo

de un evento de falla, son mayormente empleados en los botaderos de desmonte, los extensómetros digitales (Ver Fig. 4.10) constan de un cable con estaca anclado a un extremo de una grieta de tracción o área agrietada que debe ser monitoreada, el cable atraviesa sobre una polea hacia un trípode anclado a un sistema de poleas con contrapeso como se observa en la figura 4.10, la instalación del sensor debe ser perpendicular al desarrollo de la grieta de tal forma que los movimientos de la plataforma sean registrados por el extensómetro en tiempo real mediante la telemetría, de esta forma se pueda alertar a la operación minera de forma temprana, la ventaja del uso de este tipo de sensor es la configuración del sistema de alarmas, los extensómetros digitales son de gran importancia para el sistema de caracterización de botadero, ya que estos te brindan al información del comportamiento del botadero durante las 12 horas del turno de trabajo.

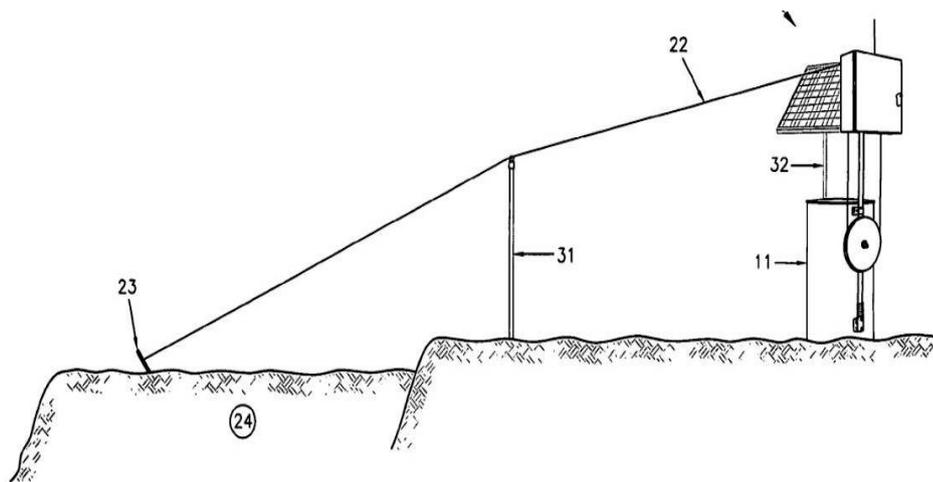


Figura 6.10 Instalación de un extensómetro digital en el botadero (Fuente SlideMinder)

El control de los botaderos de gran altura es realizado con extensómetros digitales SlideMinder de la empresa Call &Nicholas Instruments INC, cada sensor alimenta una base de datos, la cual se puede acceder mediante el software OREAD en el que se puede crear proyectos individuales para realizar los análisis individuales de cada extensómetro, también se puede analizar las velocidades incrementales, las inversas de las velocidades, los desplazamientos acumulados, grafica el estado de las baterías y la temperatura e instalar pluviómetro para ver la influencia del agua de las precipitaciones sobre los

botadero. Este instrumento está hecho para condiciones climatológicas extremas como lo detalla el manual de usuario de SLIDEMINDER.



Figura 6.11 Extensómetro digital. Fuente (Manual Slideminder)

6.4.7 Extensómetros Manuales

Los extensómetros manuales tienen el mismo funcionamiento de los extensómetros digitales, las lecturas se realizan de forma manual y en periodos de 3 horas si el botadero no presenta deformaciones mayores a 1cm/hr. constan de: una estaca de 1.2 metros, un trípode de metal, una polea, cable, cinta métrica, una platina donde se coloca la cinta métrica y una pesa. Su función es medir los desplazamientos de la cresta del botadero de acuerdo a un plan establecido por el área de geotecnia para el ciclo de monitoreo, La medición de este instrumento se hace de forma manual por medio de una cinta métrica de abajo hacia arriba, usando un clavo en la pesa como referencia, la cual está suspendida por el cable de acero, este sistema inicia desde la estaca de acero de 1.20 m pasa por la polea y es fijada al sistema de contrapeso las fig 4.11 y 4.13 muestra la forma de cómo se realiza el monitoreo con este sistema.



Figura 6.12 Extensómetro manual. Fuente (Cia. Minera Antamina CMA)

La finalidad de todo extensómetro ya sea digital o manual es poder determinar los desplazamiento en las diferentes zonas de las plataformas de los botaderos en evaluación, la limitación de los extensómetros manuales es que existe una dispersión al momento de realizar las lecturas por lo mismo se recomiendo que estas sean realizadas por un supervisor calificado para disminuir la dispersión, debido a que la frecuencia de monitoreo es amplia el riesgo de falla se incrementa al realizar la construcción de botaderos de gran altura con este sistema de extensómetros. La ventaja de este equipo es que no necesita de ninguna fuente de energía para su funcionamiento, la forma del registro de la medida del desplazamiento acumulado es tal como se muestra en la Fig 4.11.



Figura 6.13 Extensómetro manual forma de lectura de desplazamientos. Fuente (CMA)

6.4.8 Programa del Extensómetro Digital OREAD de SlideMinder

OREAD es un sistema de integración de datos de los extensómetros digitales obtenidos mediante la telemetría, para el análisis de este sistema una de las ventajas es el fácil acceso desde cualquier punto de la operación por medio de las tecnologías de radio Rajant y frecuencias de radio, ambas no interfieren las comunicaciones existentes, el software utiliza desarrollos gráficos desde una conexión IP en la Web – estos gráficos puede ser visto y controlado desde cualquier Tablet u ordenador por medio de la red interna de la empresa, el sistema de extensómetros digitales cuenta con luces estroboscópicas que pueden ser activadas cuando se activa uno de los niveles de alarma configurados en el sistema OREAD, estos niveles de alarma son enviados como cuadros de diálogo los cuales pueden ser configurados por el usuario a través de teléfonos móviles, Tablet y ordenadores que se encuentren conectados por medio de navegadores web y la configuración permite el envío de correo

electrónico con los niveles de alarmas a los usuarios involucrados en la operación, permite la personalización de las alarmas al personal geotécnico para establecer advertencias definidas por el usuario para múltiples niveles de alarmas por sensor y botadero, los equipos están diseñados para soportar duras condiciones y temperaturas extremas, permite el seguimiento a lo largo del desarrollo de una falla.

EL sistema cuenta con un programa que identifica cada sensor (extensómetro), mediante el programa se puede personalizar diferentes proyectos para cada extensómetro digital o un grupo de sensores de una misma plataforma, se puede programar la frecuencia de monitoreo.

Del mismo modo se puede analizar las gráficas de desplazamiento, velocidad, inversa de velocidad, temperatura, precipitaciones, batería y voltaje.

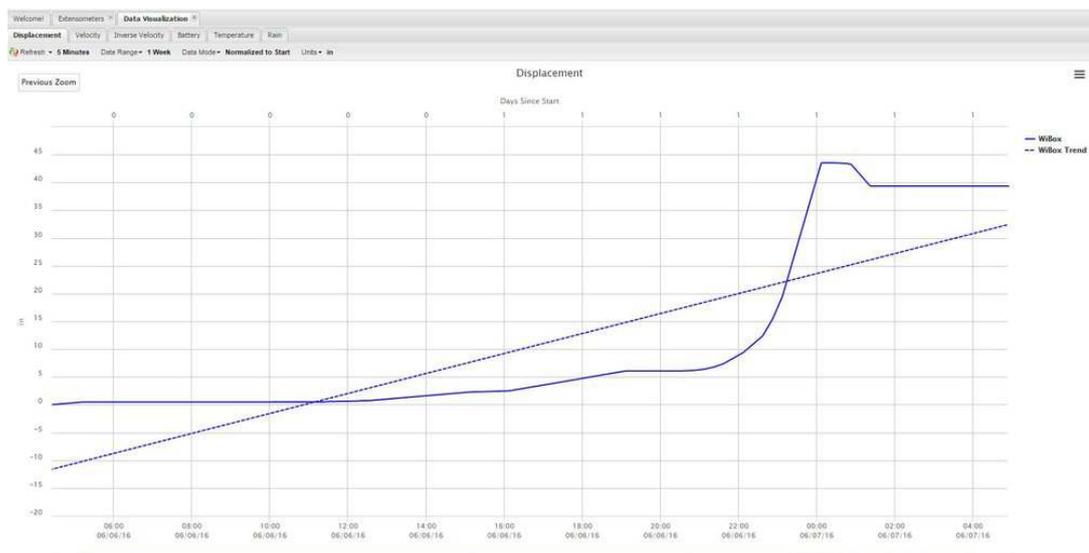


Figura 6.14 muestra la gráfica de desplazamiento de un extensómetro digital

Mediante el uso de este software OREAD el supervisor geotécnico puede configurar las unidades de medida para la medición del desplazamiento y la velocidad, así como los criterios de alarma para el control de monitoreo estas pueden ser múltiples y configuradas por criticidad de zonas y botaderos, antes del inicio de los trabajos sobre las infraestructuras para monitorear se debe realizar una serie de pruebas para el aseguramiento de los trabajos, adicionalmente a lo indicado líneas arriba la oficina de control de equipos debe notificar a los responsables del área de la operatividad de los sensores para realizar el inicio de los trabajos, al ser notificado algún nivel de alarma el

ingeniero geotécnico debe evaluar los riesgos y de ser necesario realizar la evacuación del personal involucrado en las descargas, equipos e infraestructura aguas debajo del área monitoreada, deben ser advertidos con anticipación a fin de no tener daños personales y minimizar los daños materiales en caso se desarrolle un evento de falla se debe activar el plan de emergencia realizado antes del inicio del proyecto..

El sistema OREAD de SlideMinder consiste de dos componentes: software y hardware que incluye uno o más extensómetros, una estación radio base y una computadora. Los componentes del software incluyen el software que comunica la Base y la computadora central. El programa es usado para almacenar los datos de movimiento en una base de datos central, para visualizar datos de movimiento y recibir los mensajes de alerta es necesario activar el sistema OREAD.

Todos los extensómetros instalados en los diferentes botaderos, comunican al servidor de la Base y la computadora central a través de la estación radio base (ver Figura 4.12). Si la comunicación es interrumpida, los extensómetros pueden almacenar los datos de movimiento hasta que el vínculo sea restablecido La estación base de la radio está conectada por una señal de cable hacia la computadora. La estación radio base sirve para coleccionar datos de movimientos del terreno, esta envía comandos a los parámetros de los extensómetros establecidos tales como los intervalos de datos reportados. Los extensómetros digitales almacenan los datos de movimiento hasta que la comunicación con la central de base de datos sea restablecida. Almacenar información dependerá mucho del tamaño del disco duro de la computadora.

Después de recibir los mensajes de alerta, estos pueden ser revisados en la base de datos del programa OREAD de SlideMinder. El geotécnico de campo debe comunicarse con el supervisor de operaciones para activar los procedimientos operacionales para brindar una solución permanente o definitiva.

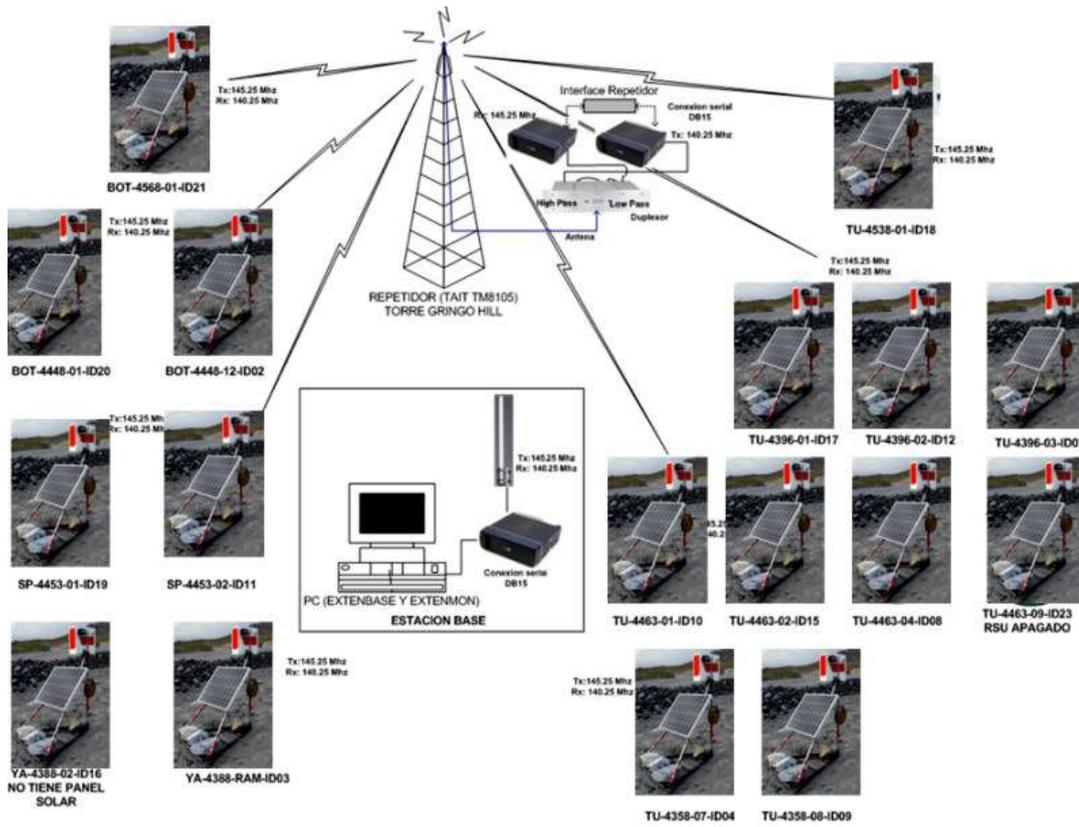


Figura 6.15 Red de extensómetros digitales (Fuente Slideminder)

6.4.9 Niveles de Alarma y Criterios de Cierre del Botadero Tucush

El departamento de geotecnia de cada operación minera tiene la función de establecer niveles de alarma y criterios para el cierre de un botadero, para el caso del botadero de Tucush se estableció en su etapa inicial los siguientes criterios de cierre:

Niveles de Alarma	Velocidad cm/hr	Reducir descargas	Observación
Watch	1 – 1.5	-	Inicio de Alertas
Warning 1	1.5 – 2	20%	De la última hora de descarga
Warning 2	2 – 2.5	50%	De la última hora de descarga
Danger	>2.5	-	Botadero Cerrado

Cuadro 6.2 Muestra niveles de alarma iniciales del Botadero de Tucush.

En caso que se presenten de comunicación impidiendo el funcionamiento de los extensómetros digitales por problemas con la telemetría, el Ingeniero Geotécnico

se encargará de instalar extensómetros manuales en los frentes activos, la toma de lecturas será según las siguientes condiciones:

Durante el turno día se realizarán 02 lecturas al inicio y fin de turno cuando las condiciones sean normales, en caso las velocidades se incrementen por encima del Nivel Danger las lecturas se realizarán cada 30 min, Durante el turno noche se realizarán 02 lecturas al inicio y fin de turno cuando las condiciones sean normales, en caso las velocidades se incrementen por encima del Nivel Danger las lecturas se realizarán cada 30 min. El monitoreo de los extensómetros digitales se realizará bajo los siguientes criterios:

Si el botadero presenta una inclinación del talud $>38^\circ$ y el rango de movimiento registrado por el extensómetro se encuentra dentro de los niveles de alarma, se recomienda realizar descargas directamente en el talud. (Según la tabla 4.1)

Si el botadero presenta una inclinación $>38^\circ$ pero $<40^\circ$ y el rango de movimiento registrado por el extensómetro se encuentra dentro de los niveles de alarma por debajo 1.0cm/hr se recomienda realizar la evaluación correspondiente del botadero.

Si el botadero presenta una inclinación $>40^\circ$ y el rango de movimiento registrado por el extensómetro es $>2.5\text{cm/hr}$, se debe realizar el corte el botadero con un tractor que trabaje perpendicular a la cresta.

Si la velocidad registrada por el extensómetro es $>2.5\text{cm/hr}$, cerrar el botadero y no reabrirlo hasta que la velocidad se encuentre por debajo 1.0cm/hr.

Niveles de Alarma

La determinación de la velocidad registrada por el extensómetro se realizará teniendo en cuenta la metodología de las medias móviles a un intervalo de tiempo de 1 hora, a continuación, se indican los niveles de alarma durante la construcción de la segunda etapa de construcción del botadero de Tucush:

Niveles de Alarma	Velocidad cm/hr	Velocidad cm/día	Reducir descargas	Observación
Watch	1 – 2	24 – 48	-	Inicio de Alertas
Warning 1	2 – 3	48 – 72	20%	De la última hora de descarga
Warning 2	3 – 4	72 – 96	50%	De la última hora de descarga
Danger	>4	>96	-	Botadero Cerrado

Cuadro 6.3 Niveles de Alarma en el Botadero Tucush en su segunda etapa

Diariamente el Ingeniero Geotécnico enviará reportes de las condiciones de las plataformas del botadero al personal de Operaciones involucrado en el proceso constructivo.

6.5 VALIDACIÓN DE LA GEOLOGÍA DEL LECHO ROCOSO

Para este estudio no se ha realizado una evaluación detallada de la geología del lecho rocoso y de la estructura que subyace al botadero propuesto. Se ha supuesto que el lecho rocoso es competente y que las orientaciones y la continuidad de las fallas u otras zonas de debilidad dentro de la fundación de manto rocoso no afectarán negativamente la estabilidad del botadero. Esta suposición deberá verificarse durante el diseño de detalle utilizando un mapeo de la superficie existente, perforaciones de exploración y condenación y otra información pertinente para elaborar una interpretación geológica, para el área de ampliación propuesta, incluyendo las secciones y planos correspondientes. Podrán requerirse investigaciones adicionales del subsuelo, incluyendo posiblemente perforaciones adicionales o métodos geofísicos para elaborar una interpretación geológica confiable. Si se hallan condiciones geológicas adversas, podrán requerirse análisis adicionales de estabilidad y posiblemente modificaciones de los criterios de diseño.

6.6 MEJORA DE LA FUNDACIÓN Y MANEJO DE ESCOMBROS

Como se detalló en el Cap. 2 debido a las potencias encontradas de material lacustre, se recomienda remover los suelos lacustres Tipo B y todo otro suelo incompetente dentro de la zona del contorno de construcción de la base del botadero Tucush, los suelos lacustres eliminados deben ser depositados en un área de escombros adecuada fuera del contorno del Botadero de Desmonte Tucush final. La extensión del depósito lacustre Tipo B se ilustra en las Figura 4.7 los límites de áreas que se muestran se basan en información disponible obtenidas de los trabajos del estudio de fundación (calicatas, perforaciones y estudios geofísicos), a partir de esto se representa una estimación conservadora del área diferenciando los tipos de suelos. En esta figura también se muestra la zona de la fundación detallada. Además de la zona del depósito lacustre Tipo B identificado para su remoción, se recomienda remover un acopio de suelo de cobertura ubicado en las inmediaciones del pie del

Botadero final propuesto. Se recomienda la remoción de aproximadamente 40,000 m³ de suelo lacustre y 140,000 m³ de suelo de cobertura para facilitar la construcción del Botadero Alternativa N° 1. Se recomienda que se remueva tanta cantidad de depósito lacustre Tipo B como sea posible (es decir, cuando el depósito tenga la menor cantidad de espesor) para minimizar el riesgo de inestabilidad (la construcción del botadero de forma ascendente por capas de 60 mts cada una por temas de costos operativos y distancias de acarreo fue desestimada). Como el diseño del Botadero Alternativa N° 2, no considera el acopio de suelo de cobertura mencionado precedentemente, deberá removerse solamente el tramo del acopio que estaría dentro del contorno de la Pila reinclinada más inferior recomendada (ver Figs. 4.8 y 4.9). Asimismo, además de los 40.000 m³ aproximados de suelo lacustre que se recomienda remover.

Dada la baja resistencia al corte del suelo lacustre Tipo B, la operación de remoción de material debe realizarse con cuidado, a fin de evitar la desestabilización de la excavación. Los valores remodelados de resistencia al corte para este material, son bajos estos y se midieron in situ. Dado que el material no se encontraba confinado, durante la remoción del material existió una alta probabilidad de que se produzca una falla en el depósito lacustre durante la excavación, lo cual podría originar un alud no controlado mínimo, pero este generaría turbidez y cantidades elevadas de sedimentos aguas abajo. por tal razón se considera improbable que el grueso de este material soporte equipos tradicionales de movimiento de tierra directamente (equipos de pesados usuales en las operaciones mineras tractores y camiones Cat y Komatsu). Por tal razón se planteó la remoción del tipo de suelo con equipos menores, dentro del plan de remoción tomando en cuenta los espesores del estudio de fundación y remplazando el material removido por material de buena granulometría y de buena durabilidad, tampoco se debe descartar la posibilidad de que los tramos del depósito de suelo lacustre Tipo B tengan una resistencia aún más baja que, para obtener los mejores resultados posibles, se realizó otras obras de mejora de la fundación durante la estación seca drenaje. En caso de observar que una parte significativa del depósito de suelo lacustre tiene una resistencia al corte nominal inferior a aproximadamente. Cuando el espesor del depósito sea inferior a 3-5m aproximadamente (dependiendo del tamaño del equipo usado), se prevé que el material podrá excavar desde arriba y cargarse directamente en los camiones remolque en una serie de paneles pequeños de aproximadamente 5m

de ancho por 10m de largo. A excepción de la excavadora, por ninguna razón las personas y el equipo ingresarán a la excavación durante el proceso de remoción del material lacustre ver En el plano DWG-A3-103 sector del material lacustres planteado para remoción, debido a la posibilidad de falla supercríticas de tipo flujo del suelo lacustre disturbado. Se supone que cada panel terminado se rellenará hasta el nivel del suelo circundante con estéril, para crear una superficie de circulación adecuada, para que los equipos accedan a los paneles subsiguientes, ayudar a aumentar el drenaje de la fundación y soportar los taludes de corte finales a lo largo del perímetro de la excavación. Si bien se espera que el espesor del suelo lacustre del área recomendada para la remoción, sea menor que 3 a 5m, si el espesor del suelo lacustre excede 5m, se recomienda usar un sistema de excavadora de cuchara de arrastre, similar al empleado para ayudar a remover el lodo del sector indicado en el plano DWG-A3-103, con el fin de facilitar una excavación segura. Para ser posible la construcción del botadero se debe diseño un sistema de drenaje el cual consto de canal de desvío de aguas pluviales. El agua que se acumule en la excavación durante el proceso de excavación, deberá bombearse a un área receptora adecuada con pozas de sedimentación. La excavación de suelos lacustres y su reemplazo por estéril limpio deberá realizarse de arriba hacia abajo para reducir el potencial de contaminación del relleno de estéril con sedimentos finos. A fin de limitar la cantidad de material de grano fino que se derrame de los camiones en circulación hacia el área de eliminación.

6.7 MANEJO DE AGUAS SUPERFICIALES

6.7.1 Hidrología

Los criterios de diseño para el ordenamiento de las aguas pluviales del Valle Tucush fueron desarrollados como parte del proyecto de la berma de impacto del Valle Tucush (ver Anexo A secuencia constructiva de la berma de impacto) los cuales constan de un sistema de canales de coronación y canales internos del que abarcan todo el área tomando la forma de una espina de pescado la dimensión de los canales tiene una profundidad de hasta 3 a 5 mts por 4 mts de ancho, estos canales se rellenaran con material de buena granulometría > 0.5 mts de diámetro y con buenas propiedades de durabilidad. se diseñaron estructuras hidráulicas para tratar el caudal máximo de una tormenta.

Teniendo en cuenta el mismo enfoque líneas arriba, se desarrolló un modelo escorrentía, el cual se usó para estimar caudales pico para eventos de tormenta con periodo de retorno de 1:20 años y 1:100 años para la condición actual de la cuenca y para condiciones esperadas con posterioridad a la terminación del último Botadero Tucush propuesto. Se dividió el Valle Tucush en diez subdrenajes de condiciones similares de fundación y características similares de escorrentía. Para los fines de dicho estudio más reciente, se han adoptado los mismos límites generales del subdrenaje, pero modificados según los requerimientos, de manera que se reflejen las geometrías propuestas del Botadero de Desmonte final. Los límites del subdrenaje se ilustran en el plano de ordenación de aguas superficiales que aparece en el plano DWG-A2-105 Manejo de Agua Superficial Valle de Tucush.

6.7.2 Control de Sedimentos

Las áreas de la fundación del Botadero, disturbadas por actividades de remoción de material lacustre del suelo de cobertura o por la excavación de suelos incompetentes de la fundación, pueden estar propensas a erosión.

Cuando el agua de escorrentía entra en contacto con los depósitos expuestos de suelos erosionables o con estéril que contiene componentes de grano fino, puede aumentar la concentración de los sólidos en suspensión en la escorrentía.

El control de sedimentos se realizó mediante una Poza de decantación ubicada aguas abajo del pie del Botadero final, se presentó como la opción más práctica para reducir la concentración de los sólidos en suspensión del agua de escorrentía. Esta poza se usó para tratar la escorrentía proveniente de la zona del Valle Tucush ocupado por el Botadero de Desmonte Tucush construido anteriormente. Para los fines del presente estudio, se supone que el terraplén de la Poza de decantación se construyó teniendo en cuenta los cuidados mínimos aplicables a las Presas de terraplén y que es segura para el pretendido uso.

6.7.3 Estructuras de Manejo de Aguas

La escorrentía se recolecta aguas abajo del Botadero final, mediante un canal de derivación que capta el caudal desde el pie del Botadero y lo conduce a la Poza de decantación existente al sureste del pie del Botadero.

Sobre la base de los resultados del modelamiento de escorrentía, realizado para este estudio, se prevén caudales máximos para 1:20 años y 1:100 años, un promedio de 6.1 m³/s respectivamente, para las condiciones actuales y la geometría del Botadero.

Tiempo de Residencia y Tratamiento en la Poza. - La dimensión de las Pozas de decantación, debe ser tal que ofrezca un tiempo de retención suficiente para la decantación de partículas del tamaño de limo superior a 15 micrones de diámetro. Las partículas con diámetro inferior a 15 micrones aproximadamente (es decir, limos y arcillas finas) por lo general no sedimentan a menos que se produzca floculación. La velocidad de sedimentación de partículas esféricas superiores a 15 micrones de diámetro en el agua se rige por la Ley de Stokes sobre decantación. De lo cual se determinó que un tiempo de detención de alrededor de cinco horas debería bastar para remover todos los sólidos sedimentables superiores a 15 micrones de diámetro. Los cálculos de detención se realizaron con una profundidad mínima de 2m y una relación largo/ancho no inferior a 5:1. Una relación menor (numéricamente) largo/ancho puede provocar un cortocircuito y una mezcla inadecuada.

En el diseño también se contempló una Poza de pre sedimentación. Las Pozas de pre sedimentación deberán ser del tamaño necesario para un tiempo de retención de 30 minutos (es decir, 1/10th el tamaño de la Poza principal). Una Poza de pre sedimentación con dicha capacidad podrá típicamente atrapar alrededor del 80% de los sólidos sedimentables afluentes. Por consiguiente, la frecuencia de la remoción de sedimentos de la Poza principal podría verse reducida. Dado que la mayoría de los sólidos sedimentables se depositarán en la Poza de pre sedimentación, el volumen de almacenamiento restante de la Poza quizás requiera solamente limpieza en forma periódica, solo en caso que sea necesario. Para la remoción de material se desarrolló una Poza de pre sedimentación de mayor capacidad, dentro de las principales estructuras necesarias para un adecuado manejo de aguas superficiales se encuentran las siguientes:

6.7.4 Poza de Decantación

La Poza de decantación existente y el área circundante inmediata, se muestran en el plano DWG-A2-105 manejo de aguas superficiales. Como puede apreciarse en el plano 105, la Poza existente está restringida por la topografía en

tres lados, con un dique de contención compuesto de material de relleno compactado. El dique de contención ha sido construido con suelos morrénicos obtenidos localmente, con un talud de aproximadamente 2.5:1 en la cara interna, a una altitud de cresta de aproximadamente. El tramo oeste de la cara aguas abajo, es predominantemente mucho más plano que 2.5:1, mientras que el extremo este del terraplén, áreas localmente más empinadas, compuestas de relleno de rocas angulosas, ha sido armado en reposo sobre la cara aguas abajo.

6.7.5 Producción de Sedimentos

La mayoría de las pendientes del Valle Tucush, están compuestas de una capa de suelo de cobertura con presencia de vegetación o de manto rocoso, según la carga de sedimentos observada en el humedal construido, se producen pocos sedimentos anualmente debido a la erosión. Sin embargo, la remoción del acopio de suelo de cobertura y del suelo lacustre Tipo B recomendada más arriba, expondrá importantes áreas del suelo a la erosión. Se puede estimar la cantidad de sedimento que podría ser erosionado y arrastrado por erosión natural o erosión de surcos de una pendiente en particular, usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por su sigla en inglés). Esta ecuación puede usarse para predecir la velocidad de erosión promedio a largo plazo "X", basada en el tipo de precipitación, el tipo de suelo, la topografía, la cubierta vegetal (de existir) y las prácticas de control de erosión empleadas. La USLE se expresa de la siguiente manera:

$$X = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Donde R es el factor de precipitación y escorrentía; K es el factor de erosionabilidad del suelo; LS es el factor de longitud-gradiente de la pendiente; C es el factor de ordenación de cultivos/vegetación y P es el factor de prácticas de control de la erosión. La tasa de producción de sedimentos se calculó en menos de 100 m³/año.

6.7.6 Zanja de Captación, Canales de Afluentes y Estructuras de Descarga

Se deberá construir una zanja de captación y canal de afluente entre la descarga de la alcantarilla a través del camino y la entrada de la Poza de decantación para

encaminar el agua de escorrentía a través de una Poza de pre sedimentación. Desde la Poza de pre sedimentación, el agua correría por un vertedero. Los caudales de diseño y las dimensiones requeridas del canal para estructuras de entrada fueron realizadas con una excavadora 330 y las dimensiones fueron de 3 a 5 metros de alto por un ancho de 4 metros, por encima del diseño propuesto por el diseñador. La zanja de captación y el canal de afluente se han dimensionado para dar cabida a un caudal máximo de tormenta con un periodo de retorno 1:100 años. Durante la construcción se halló un manto rocoso poco profundo a lo largo de la alineación. El tramo en mención se requirió realizar perforaciones y voladuras para construir el Segmento. Como se señala precedentemente. Dada la naturaleza densa, gruesa de los suelos morrénicos expuestos en las inmediaciones de la Poza de decantación, se instaló una bomba de lodos durante la construcción de los canales de drenaje.

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se basan en nuestra revisión de los resúmenes, de los archivos de análisis asociados y los resultados de los análisis de derrame:

- Sobre la base de los resultados de los análisis de estabilidad, la geometría de botadero Tucush asociada con el diseño de Descargas Masivas, debería ser adecuadamente estable, soportada por una adecuada instrumentación geotécnica en tiempo real acompañada de un procedimiento estandarizado para los trabajos de descargas masivas este documento debe incluir niveles de alarma asociados.
- Los FS de la Sec TSE 5, correspondiente a la Fase 8 del botadero, indican estabilidad estática precaria ($FS < 1.2$) e inestabilidad en condición sísmica con un avance de cresta mayor a los 35 m, por lo cual se sugirió modificar el crecimiento de la fase 8 como se indica en las Figuras 6, 7 y 8, no con descarga frontal hacia talud en dicho sector.
- De los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad se identificó que donde la berma de impacto propuesta no se complete antes del inicio de las descargas masivas en el botadero Tucush, existe la posibilidad de que una falla superficial de la plataforma se movilice más allá de la berma del impacto. Para manejar esta probabilidad, se incrementó la altura de la berma de impacto para proporcionar una contención adecuada en el lado aguas arriba de la berma del impacto.
- Los análisis de la Sec TSE 5 indican inestabilidad estática, requiriéndose cubrir el sector SE sobre el material lacustre, de acuerdo al procedimiento sugerido como resultados del análisis de estabilidad y de flujo de material.
- La Sec TSE 5 indica que igualmente es necesario cubrir con relleno hacia el sector SW, por condición de inestabilidad estática., se ha considerado el retiro del material lacustre al final de la sección, resultando inestable en condición sísmica.
- La Sec TSE 6 indica que el buttress presenta inestabilidad en condición sísmica, lo cual ratifica la necesidad de ampliar el buttress hacia aguas abajo hasta los 65 m. En la verificación de runout, la berma propuesta (año 2018) tiene 45 m de altura, generando un ángulo de 24° que no cubre la siguiente secuencia (año 2019). Por lo tanto, se recomienda como primera opción, correr 65 m la berma hacia afuera, o como segunda opción, elevar la

berma 15 m más, con lo que el ángulo de 26° cubriría la cresta de botadero propuesto.

- En resumen, la eliminación de material lacustre ha sido insuficiente, por lo que se requirió ampliar el contrafuerte aguas abajo para evitar fallas de fundación y mejorar la efectividad de la berma e runout..
- Se aprecian FoS mayores a 1 bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas de 0.15 y 0.24g en los perfiles evaluados como: Perfil TSE 01, 05, 06 y 06A, los perfiles analizados se realizaron para el diseño final del botadero.
- Se realizó la simulación del flujo producido por un plano de falla de 0.24g en el perfil 3 empleando Dan W, siendo contenido dicho flujo por el sistema de rampas construido en el wetland, con bermas de impacto de hasta 65 m de altura.
- Cabe mencionar que los análisis realizados a los diseños temporales fueron evaluados con 0.15g.
- La Sección TSE 6A del botadero se mantiene estable en sus condiciones estáticas y pseudoestáticas de 0.24g, Se recomienda realizar descargas al vacío, teniendo en consideración los niveles de alarma recomendados para este sector, iniciar evaluación con danger de 2.5cm/hr.
- Descargar al vacío durante el turno día evaluando de manera constante la plataforma del sector, una vez que se incrementen las velocidades a niveles mayores a 2.5 cm/hr, a partir de ahí se recomienda avanzar el botadero con corte y relleno.
- Durante el proceso constructivo se tuvo un control estricto del material descargado haciendo uso de las herramientas establecidas en la caracterización de botaderos, se demostró la eficacia del método durante la construcción del botadero, en la figura 4.7 se aprecia el incremento de las descargas aplicando la caracterización, La cantidad de descargas deben de ser determinadas operativamente y de acuerdo al comportamiento de los extensómetros.
- El nivel de alarma recomendados para el cierre del botadero es de Danger será con velocidades > 2.5cm/hr, el sistema OREAD enviara mensajes de alerta a los involucrados en la descarga para que se tomen las siguientes medidas de cierre del botadero, Se decidirá cerrar el botadero bajo el siguiente protocolo:

- El Ingeniero Geotécnico será responsable de reportar de forma inmediata a la supervisión de las condiciones que se encuentra el botadero y su cierre inmediato. Operaciones será responsable de levantar una berma no menor de 1.0m de altura que sea claramente visible al ingreso del botadero.
- El Ingeniero Geotécnico reportará en cambio de guardia a toda la supervisión de mina y otros involucrados (planeamiento, carreteras) sobre la decisión del cierre.
- De los hallazgos encontrados durante la construcción del botadero y de la experiencia para el caso del relleno en el valle de Tucush se concluye y valida la importancia del uso de los extensómetros digitales durante las descargas al vacío en botaderos de gran altura.
- Es importante que los sensores deben estar calibrados—extensómetro digital SlidMinder-los datos son confiables.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un procedimiento de trabajo para estandarizar los trabajos de descargas masivas desde una altura mayor a los 250 m.
- La apertura y cierre de botaderos deberá realizarse con la supervisión del supervisor de geotecnia mina, este debe contar con una experiencia mina de 3 años en trabajos similares, la coordinación para la apertura y cierre de botadero debe ser de un grupo multidisciplinario en el que participaran de forma activa el personal de Planeamiento, Operaciones y Geotecnia, previa evaluación de las condiciones de estabilidad haciendo uso del sistema de caracterización de botaderos.
- El Ingeniero Geotécnico II, deberá realizar un reconocimiento preliminar del sector antes de emplear la matriz de Caracterización de Condiciones Geotécnicas para Botaderos Activos. Para realizar la caracterización de botaderos activos se debe emplear el formato mostrado en el Cuadro 4.1 Muestra Sistema de caracterización de Botaderos, denominado “Matriz de Caracterización de Botaderos Activos”, el Ingeniero Geotécnico deberá ubicarse en lugares seguros con respecto a la cresta, no aproximarse con camionetas a la misma y mucho menos si hubiese presencia de grietas, de preferencia realizar la primera evaluación desde el sector de los extensómetros.
- La caracterización se realizará en cada uno de los botaderos activos, se llenará en el formato correspondiente y serán almacenados en una base de datos, esta actividad estará a cargo del Ingeniero Geotécnico.
- Según la valoración obtenida de la caracterización el ingeniero geotécnico determinará el estado de la operatividad del botadero y la necesidad de realizar alguna actividad específica como corte, nivelación, etc., comunicándole al supervisor de operaciones encargado de la zona.
- El Ingeniero Geotécnico, instalará extensómetros en ubicaciones apropiadas correspondientes a cada zona de descarga; estos serán cambiados de posición con frecuencia según el avance de cresta del botadero y una correcta configuración del mismo.
- La distancia entre extensómetros debe encontrarse en el rango de 80m a 120m.
- La instrumentación deberá estar convenientemente protegida con 02 bermas de altura máxima 1.0 m paralelas al cable del extensómetro, dejando libre la

parte posterior para la toma de lectura y mantenimiento de los extensómetros. Esta actividad estará a cargo de Operaciones Mina.

- El Ingeniero Geotécnico II será responsable de inspección de las condiciones de los extensómetros y verificará lo siguiente:
 1. Condición de instalación del cable que será lo más perpendicular posible a las grietas.
 2. Cantidad de cable.
 3. Condiciones de la pesa.
 4. Trípodes asegurados con rocas.
 5. Estacas de anclaje bien orientadas y ubicadas.
 6. Condición y visibilidad de los trípodes
 7. Asegurar la comunicación de los extensómetros con la PC central de monitoreo.
 8. Sistema de protección de los trípodes (bermas de 1m de altura)
- Los rangos de movimiento que limiten los trabajos en los botaderos deberán ser responsabilidad del Ingeniero Geotécnico quien sustentará técnicamente la decisión ante los diferentes niveles de alarma. Los niveles de alarma geotécnicos serán establecidos independientemente en cada botadero.
- Si se produjeran periodos de intensas lluvias será necesario realizar una observación minuciosa de los botaderos para identificar lugares donde se den acumulaciones de agua con la finalidad de desaguarlos y evitar de esa forma que drenen hacia la cresta o filtren hacia el interior del botadero, el Supervisor de Mina O3, O4, Ingeniero Geotécnico II e Ingeniero de Drenaje Superficial estarán a cargo de esta actividad.
- Se recomienda trabajar con más instrumentos tales como prismas, escáner laser y piezómetros para relacionar más datos y resultados confiables para calibrar los modelos.
- Se recomienda usar los métodos estudiados para la construcción de botaderos de gran altura, ya que la metodología empleada en el trabajo ha sido empleada en botaderos bajo distintas condiciones climáticas, tipos de materiales depositados, obteniendo resultados aceptables en seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

1. British Columbia. Mine Waste Rock Pile Research Committee. Mined Rock and Overburden Piles, Canada 1991.
2. Chapra C. Steven y Canale P. Raymond Métodos Numéricos para Ingenieros, 6° Edición, editorial McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES.
3. Das M. Braja Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Editorial Cengage Learning, Estados Unidos 2008.
4. Giancoli. Física para ciencias e ingeniería. Volumen 01, 4° edición, Editorial Pearson.
5. Hoek E. & Bray J.W. Rock Slope Engineering, London, 1981.
6. Lopez J. Manual de Construcción y Restauración de escombreras, Madrid, España, Edicion Graficas Arias Montano S.A. Madrid, 2006.
7. Moya C. Rufino Estadística Descriptiva. Editorial San Marcos
8. ROCSCIENCE. Dips, Slide Swedge, Toronto 2006
9. Wyllie C. Duncan & Mah W. Christopher. Rock Slope Engineering Civil and Mining. 4° Edición.

Anexo A: Secuencia constructiva del Botadero de Tucush

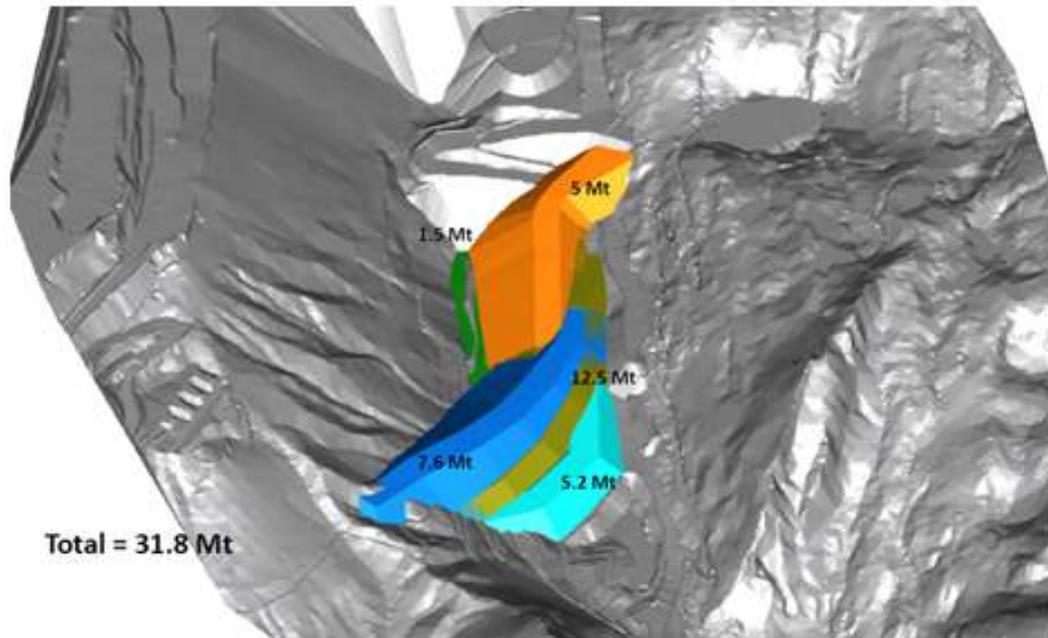


Figura 1.-Diseño final de la berma de impacto propuesta como resultado del análisis de estabilidad de 65 mts de altura.

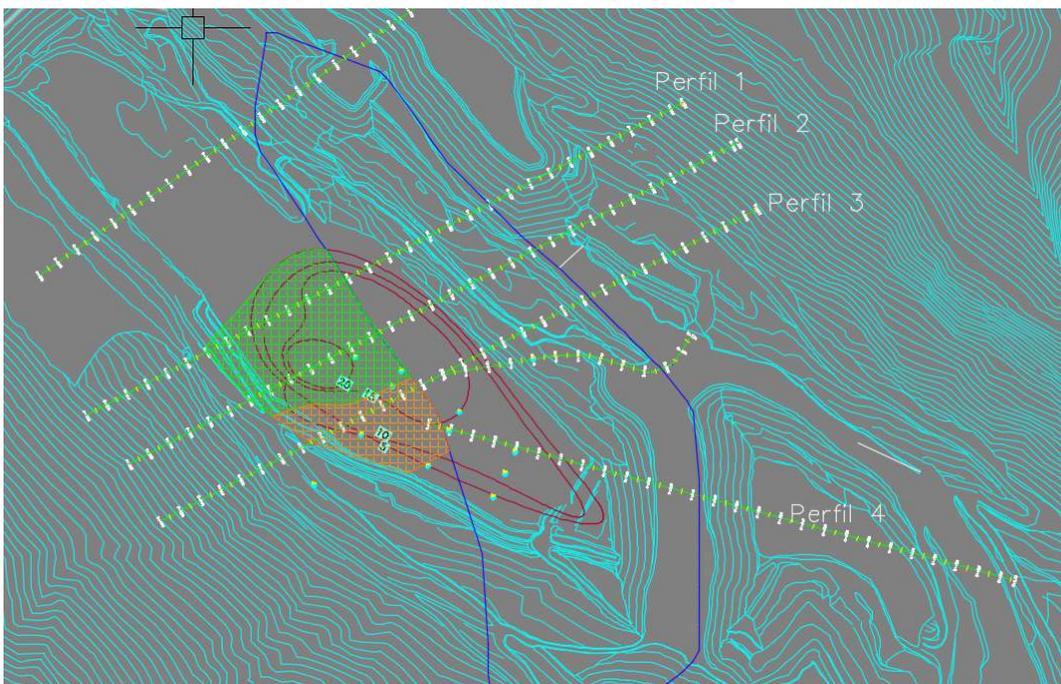


Figura 2.-Para la consolidación del material Lacustre se realizó el confinamiento del mismo con capas de material de buena granulometría y de gran durabilidad con 2 capas de 6 m de alto, este relleno se realizó con volquetes de 15 a 20 m³, en su etapa inicial posteriormente se realizó una capa de 10 m de altura con camiones de 290 tn aproximadamente.

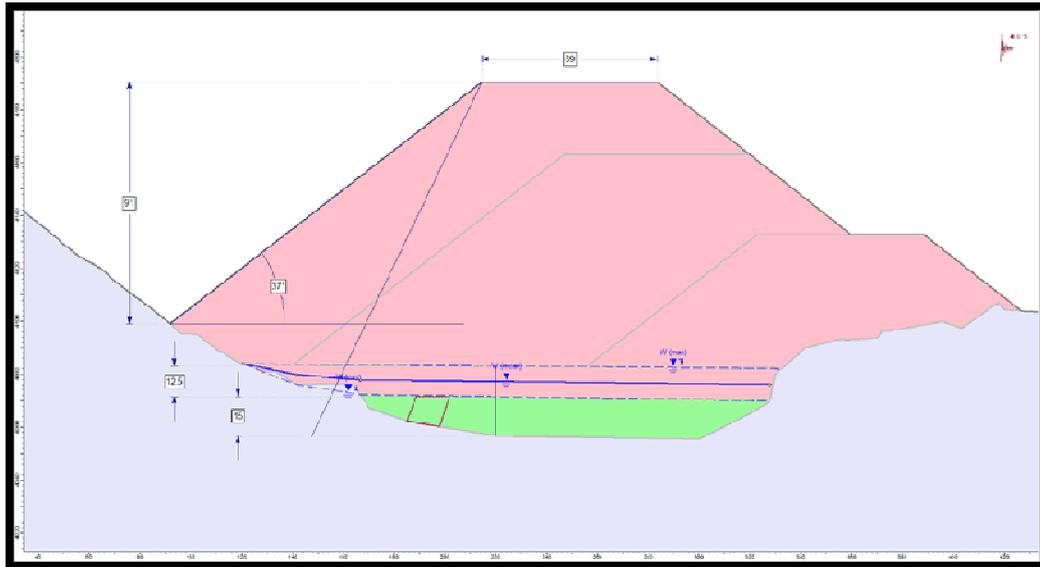


Figura 3.- La figura muestra la secuencia de cómo se logró la consolidación del material Lacustre descrito en detalle en el capítulo 2, se observa 02 capas de 6m de altura construida con volquetes de 15 a 20 m³ de capacidad, la siguiente capa se realizó con 10 m de altura con equipos de 290 tn, como se observa en la siguiente lamina.



Figura 4.- Se muestra la forma como se procedió con el confinamiento del material lacustre en la capa de 10 m, con los camiones Mineros, los círculos muestran la ubicación de los piezómetros instalados para monitorear el comportamiento de la presión de poros durante la conformación de capas de confinamiento.

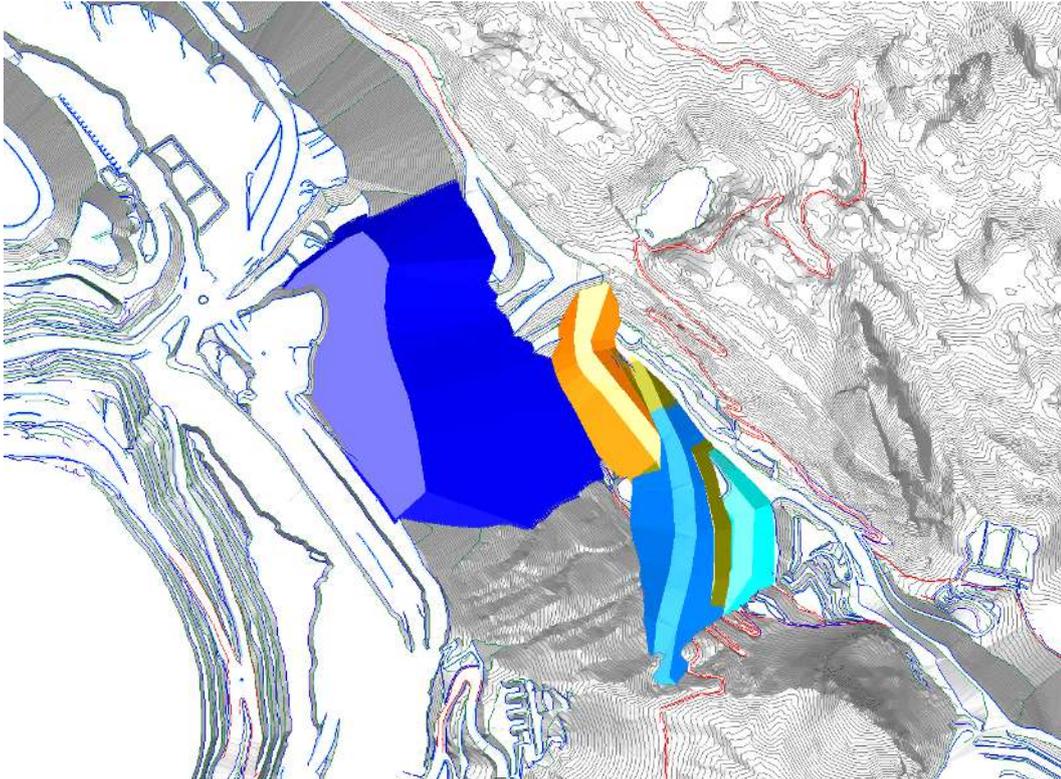


Figura 5.-La figura muestra el diseño final del botadero de Tucush, plan de descargas de la operación minera para los próximos 5 años

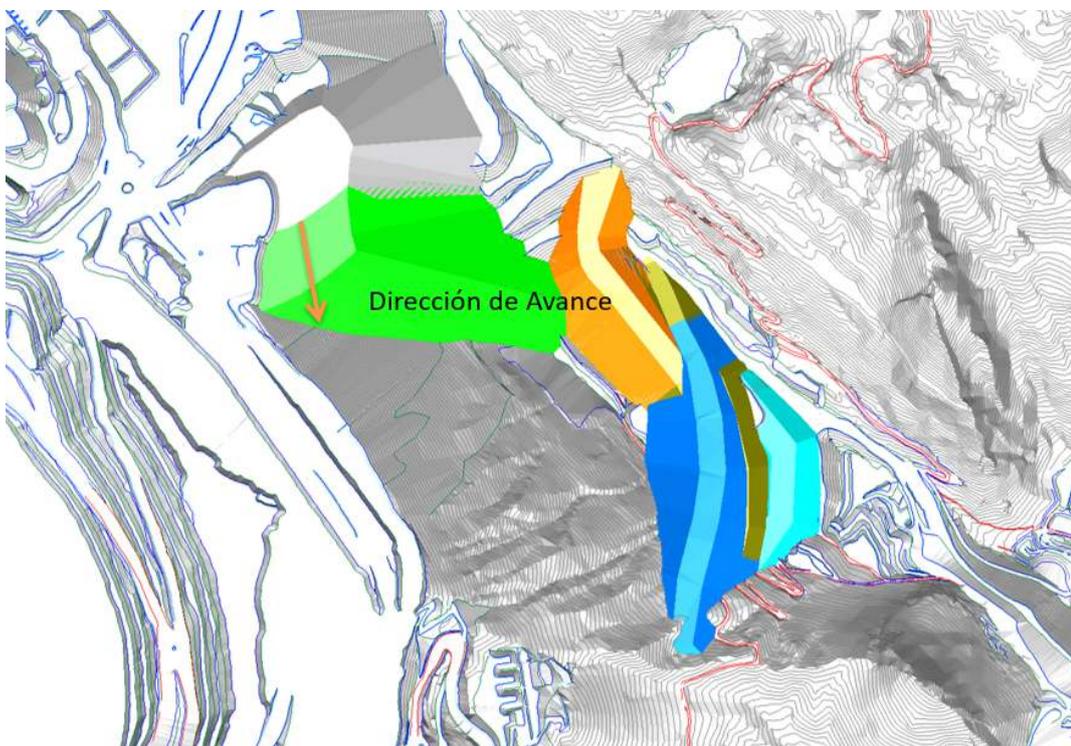


Figura 6.-La figura muestra la propuesta del avance del botadero propuesto para el presente informa y la importancia de la direccion de avance, con el objetivo que se generen nuevas plataformas de descargas una vez que el avance del botadero llegue ala berma de impacto.

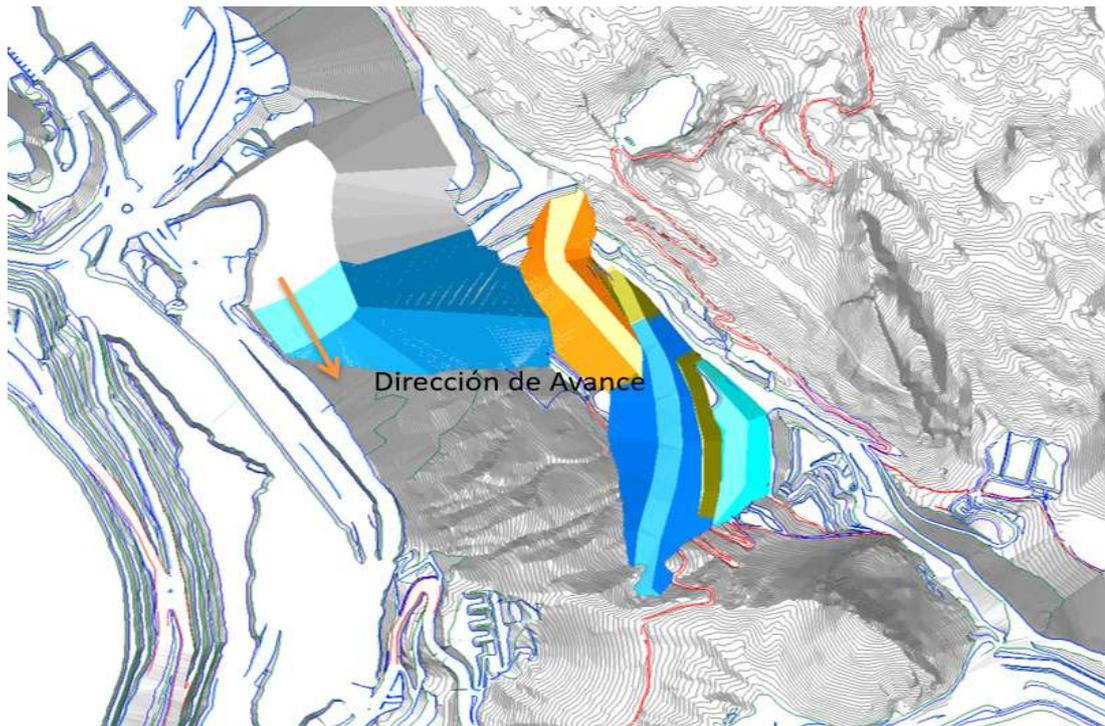


Figura 7.-La dirección de avance del botadero es de importancia para la viabilidad del botadero ya que un avance distinto al propuesto es más probable que se presente eventos de fallas superficiales como se observan en los análisis de estabilidad.

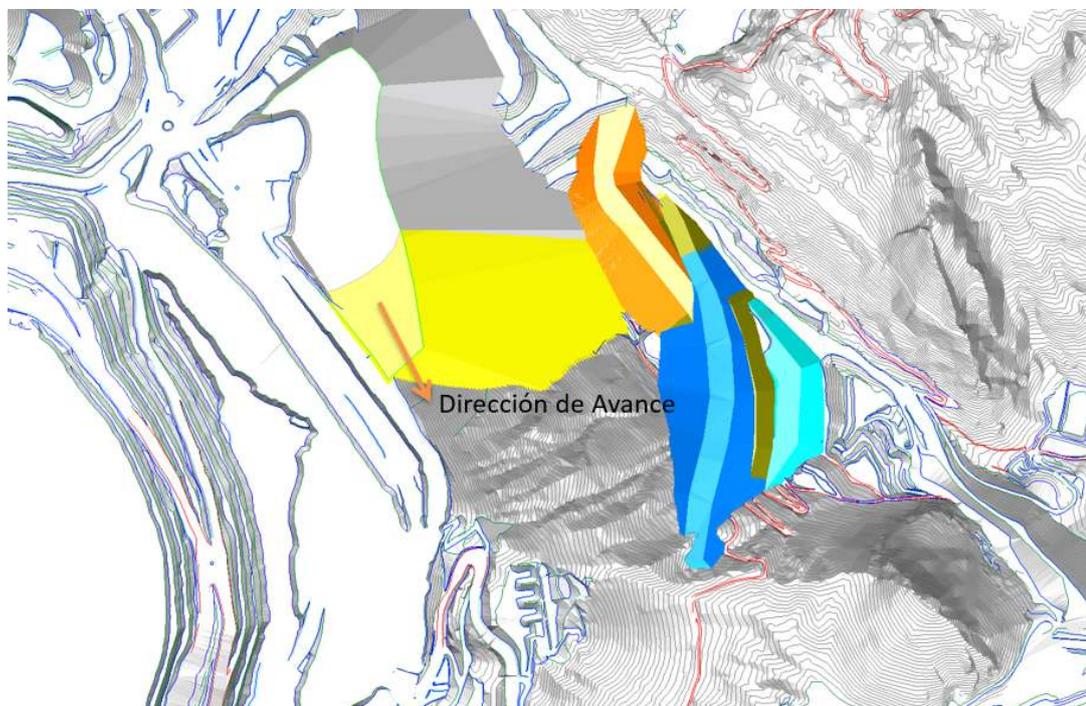
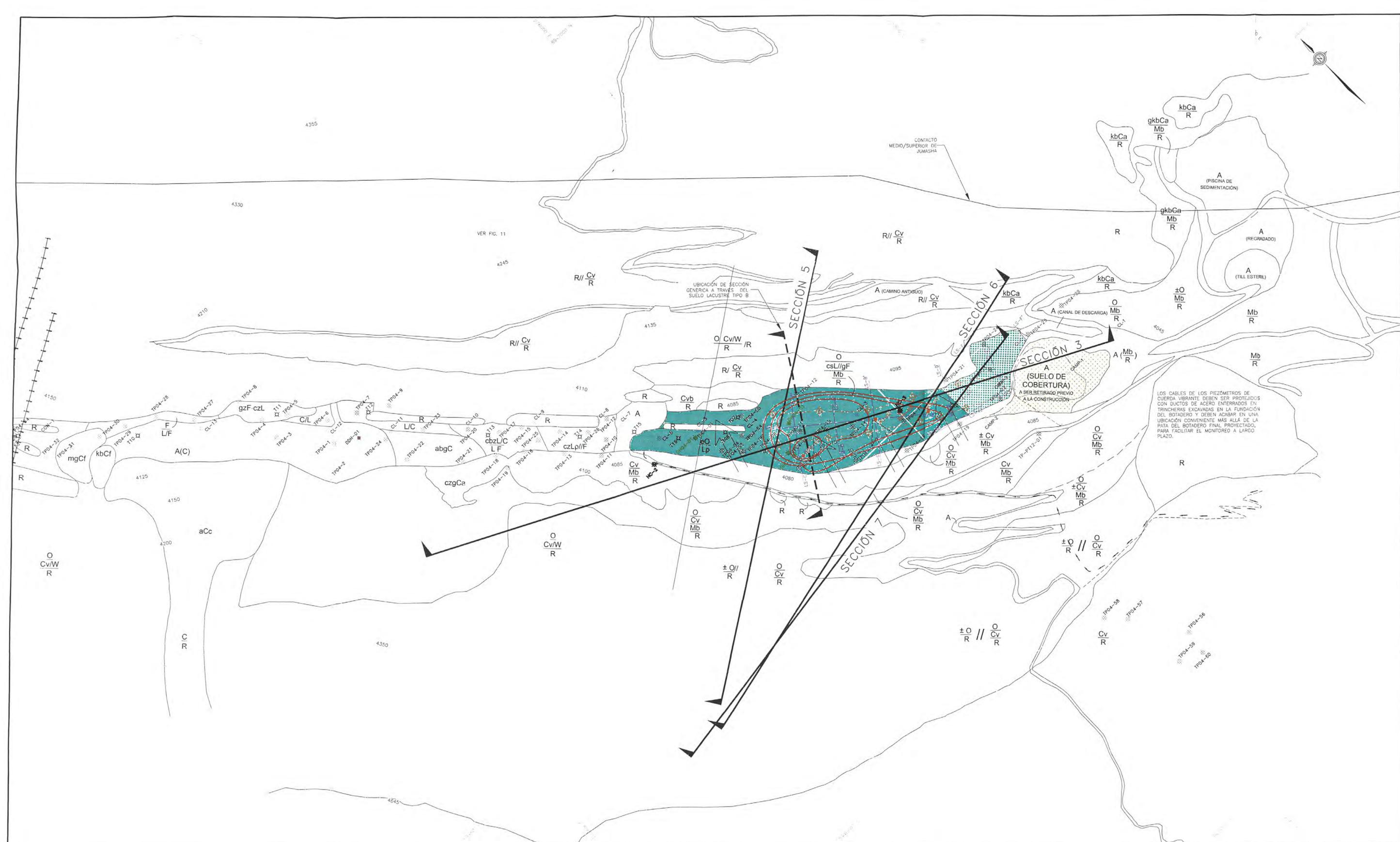


Figura 8.-Como se observa a medida que se realiza el avance del botadero se pueden ir generando nuevas plataformas de descargas asociados a las secciones analizadas.

Anexo I: Planos de Geología, Línea Sísmica y Secciones para Análisis de Estabilidad



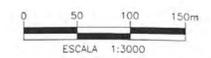
- LEYENDA**
- SECCIÓN 1**
- TP04-10: NÚMERO Y UBICACIÓN DE SECCIÓN
 - TP04-23: LÍMITE DE UNIDAD DE TERRENO
 - TP04-10: CALICATA (PITEAU, 2004)
 - TP04-23: CALICATA (KLOHN, 2004)
 - ⊕: TALADRO (HCI, 2003)
 - ⊕: CALICATA (2000)
 - ⊕: TALADRO (2000)
 - ⊕: TALADRO (2002)
 - ⊕: TALADRO (KLOHN, 2004)
 - ⊕: CALICATA (MRA, 1997)
 - TP-PT12-01: CALICATA (PITEAU, 2012)
 - : SUPERFICIE DE DESVIO DE FLUJO
 - - - - -: SENDERO
 - 4045: CURVAS DE NIVEL (CADA 5m)
 - : ÁREA DE LACUSTRE TIPO B
 - : ÁREA DE RECOMENDADA DE REMOCIÓN DE LACUSTRE TIPO B (BOTADERO ALTERNATIVA N° 1)
 - : ÁREA DE RECOMENDADA DE REMOCIÓN DE LACUSTRE TIPO B (BOTADERO ALTERNATIVA N° 2)
 - ▨: ACOPIO DE SUELO DE COBERTURA
 - ←: DIRECCIÓN DE AVANCE DE ENCAPSULACIÓN DE LAS PILAS
 - : TRAZA DE PERFIL SISMICO (GEONSTRUMENTOS)
 - ⊕: UBICACIÓN DEL TRANSDUCTOR DE PIEZÓMETRO DE CUERDA VIBRANTE

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL TERRENO

- SÍMBOLOS**
- kbCa**
- EXPRESIÓN SUPERFICIAL MATERIAL SUPERFICIAL TEXTURA
- TEXTURA**
- a BLOQUES
 - b BOLONES
 - c ARCILLA
 - z LIMO
 - s ARENA
 - g GRAVA
 - k GULJARROS
 - e FIBROSO
- MATERIAL SUPERFICIAL**
- A ANTROPOGÉNICO
 - R ROCA BASAL
 - C COLLUVIAL
 - F FLUVIAL
 - M MORRENA
 - O ORGÁNICO
 - L LACUSTRE
 - W SUELO RESIDUAL
- EXPRESIÓN SUPERFICIAL**
- j PENDIENTE SUAVE (3-15°)
 - a BAJADA (ABANICOS COALESCENTES)
 - t TERRAZA
 - p PLANICIE
 - f ABANICO (<15°)
 - c CONO (>15°)
 - v COBERTURA (0,1-1m)
 - b MANTO (>1m)
 - r LOMA(S)

- MEDIDA**
- x/y x ES MAS EXTENSO QUE y
 - x//y x ES CONSIDERABLEMENTE MAS EXTENSO QUE y
 - x/y x SOBREPONE ESTADÍSTICAMENTE A y
 - x·y x E y SON APROXIMADAMENTE IGUAL DE EXTENSOS

NOTA: SISTEMA DE COORDENADAS PSAD - 56

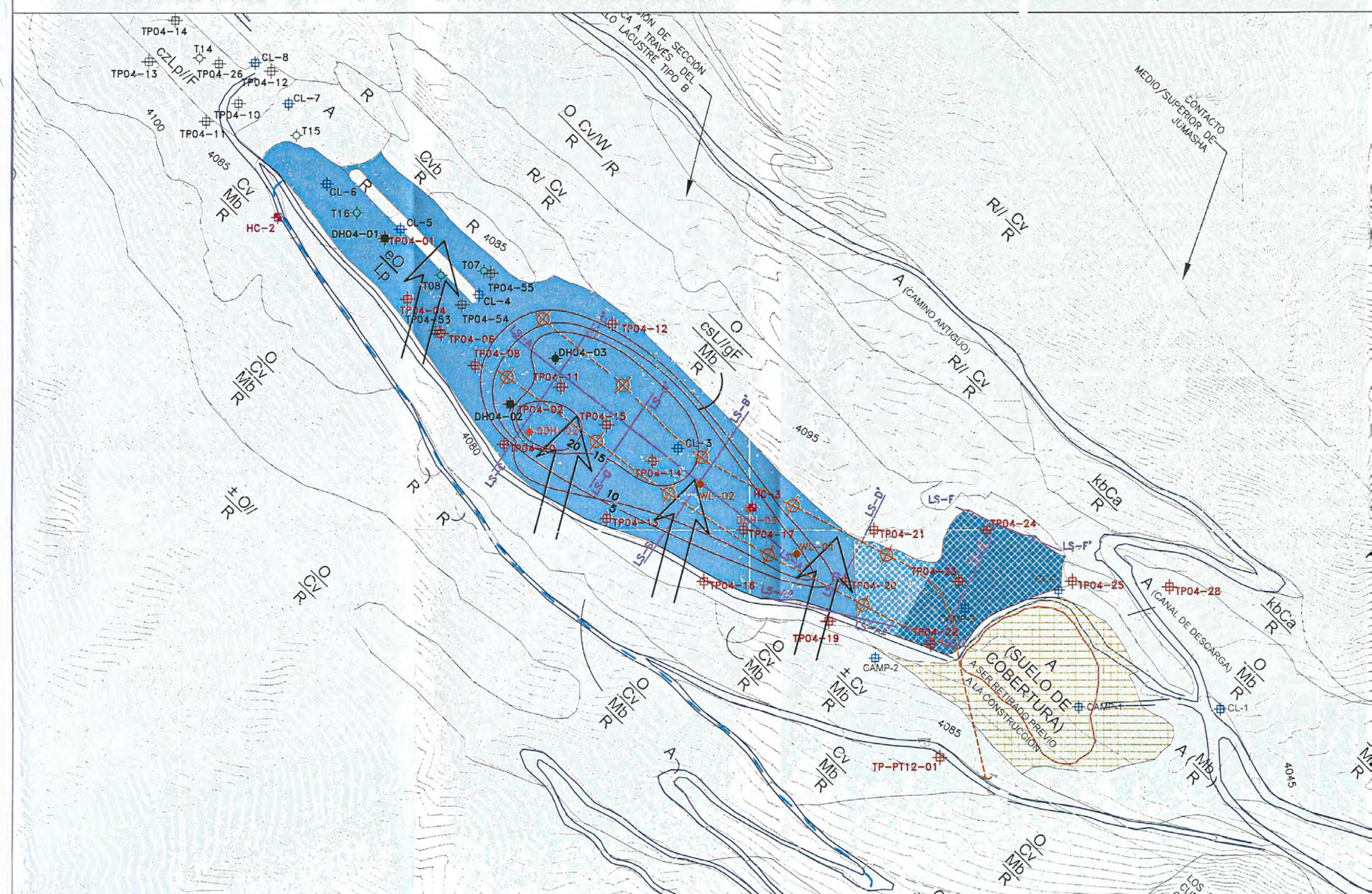


TESIS:
ANÁLISIS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y LA ESTABILIDAD DEL BOTADERO DE TUCUSH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PLANO DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

POR: WM
DCC
FECHA: DIC 20
PLANO: 101



- TRAZA DE PERFIL SSMCO (GEOSTRUMENTOS)
- CA. DATA (PTEAU, 2004)
- CA. DATA (KLOHN, 2004)
- ALADRO (HC, 2003)
- CALICATA (2000)
- TALADRO (2000)
- TALADRO (2002)
- TALADRO (KLOHN, 2004)

- 4045 CURVAS DE NIVEL (CADA 5m)
- ÁREA DE LACUSTRE TIPO B
- ÁREA DE RECOMENDADA DE REMOCIÓN DE LACUSTRE TIPO B (BOTADERO ALTERNATIVA N° 1)

- ÁREA DE RECOMENDADA DE REMOCIÓN DE LACUSTRE TIPO B (BOTADERO ALTERNATIVA N° 2)
- ACOPPIO DE SUELO DE COBERTURA

TESIS:
ANÁLISIS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y LA ESTABILIDAD DEL BOTADERO DE TUCUSH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

PLANO DE LINEA SISMICA-REMOCIÓN DE MATERIAL

POR	FECHA
WM	FEB 20
APROBADO	FIGURA
DCC	102

Anexo II: Resultados del Análisis de Estabilidad

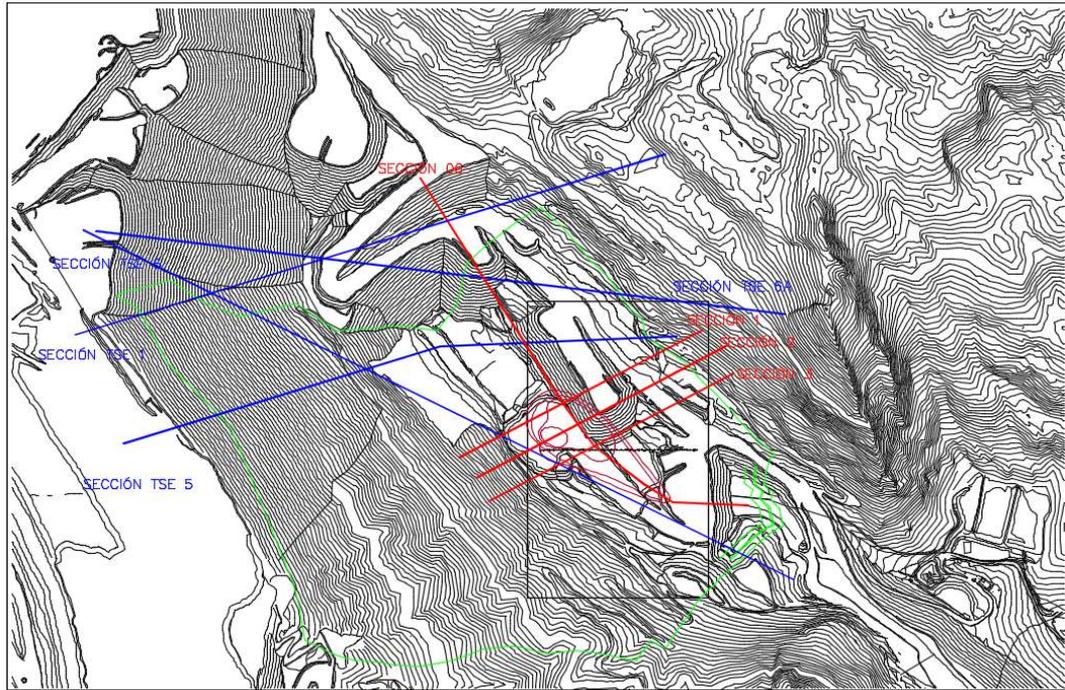


Figura 9.-: Muestra Vista en planta de las secciones analizadas (TSE 1, TSE 5 y TSE 6), ver plano DWG-A1-104 perfiles de secciones analizadas para análisis de estabilidad para mayor detalle.

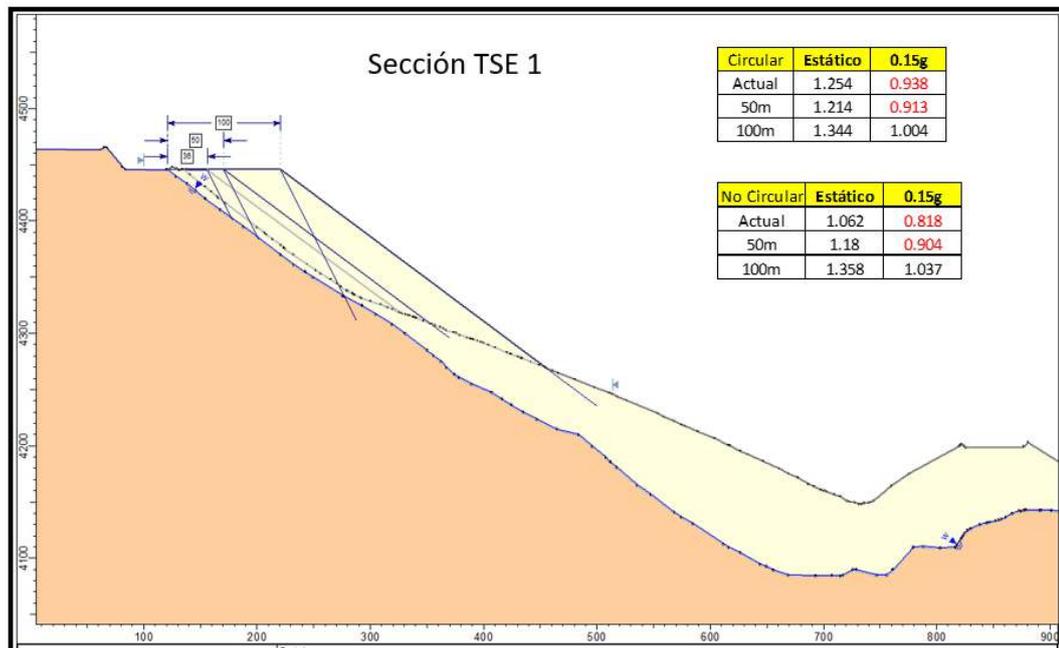


Figura 10.- Muestra el resumen de la sección TSE 1, se evaluó el análisis estático de la estabilidad del talud de la sección TSE 1 con diferentes avances de crestas logrando FS aceptables con diferentes avances de crestas, por tal razón le daremos más importancia a las fallas profundas (rupturas no circulares).

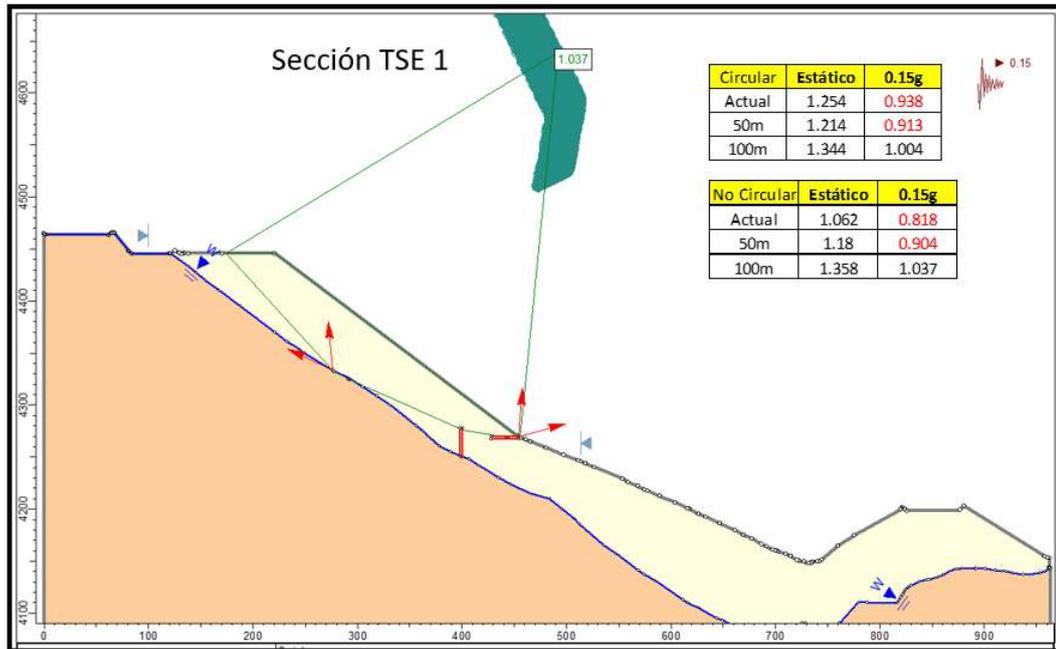


Figura 11.- Muestra el resumen del análisis de la sección TSE 1, Como se detalla en el Cap. 3 en el punto 3.3 de los resultados del análisis de estabilidad, debido a la geometría y las condiciones de la fundación se dará más importancia a los análisis de estabilidad para falla profundas (no circular), se evaluó la estabilidad con diferentes avances de crestas logrando FS aceptables con un avance de cresta de 100 mts.

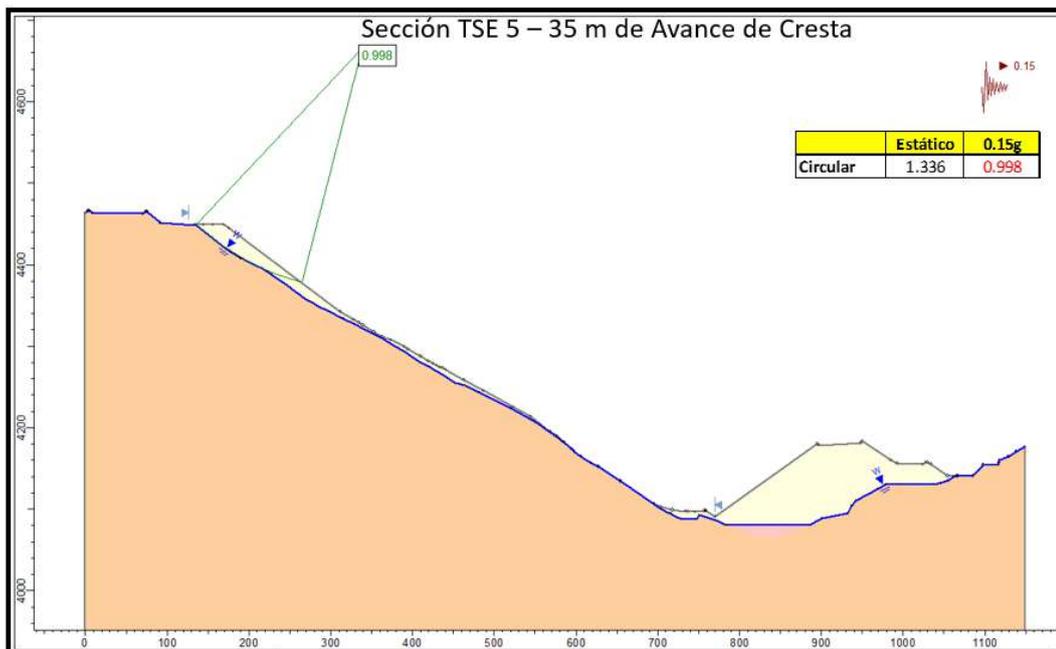


Figura 12.- Muestra los resultados del análisis Circular para un avance de cresta de 35 m de la sección TSE 5, de los resultados se observa que para condiciones estáticas los valores de FS > 1.3, para condiciones pseudo-estático los valores de FS < 1, de lo obtenido se descarta iniciar alguna plataforma de botaderos desde este nivel.

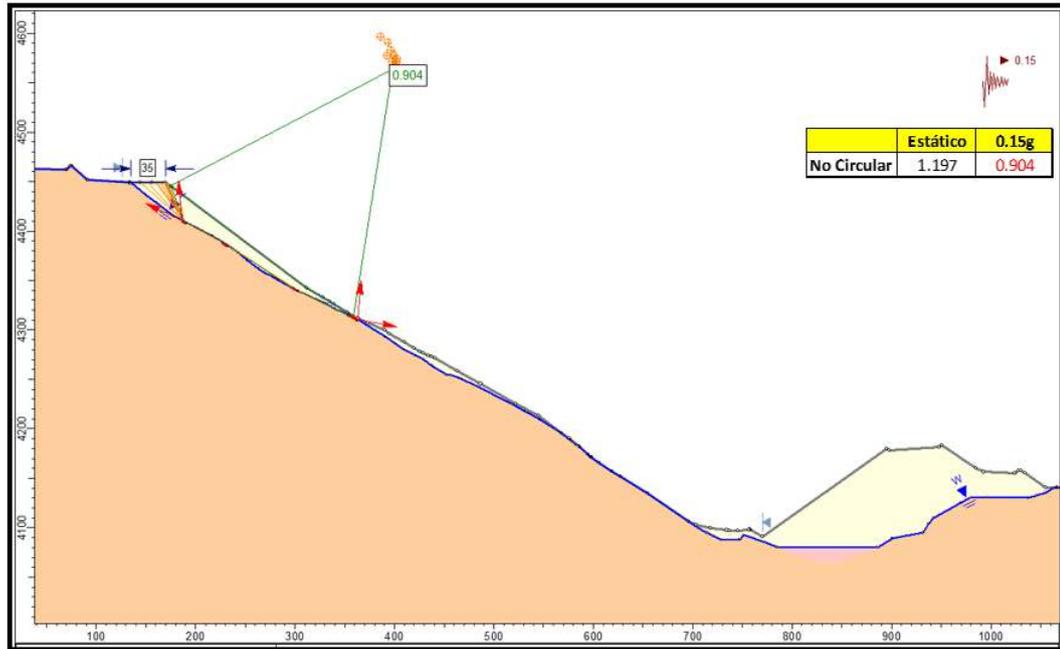


Figura 13.- Muestra los resultados del análisis No Circular para un avance de cresta de 35 m de la sección TSE 5, de los resultados se observa que para condiciones estáticas los valores de FS > 1.1, para condiciones pseudo-estático los valores de FS < 1, de lo obtenido se descarta iniciar alguna plataforma de botaderos desde este nivel.

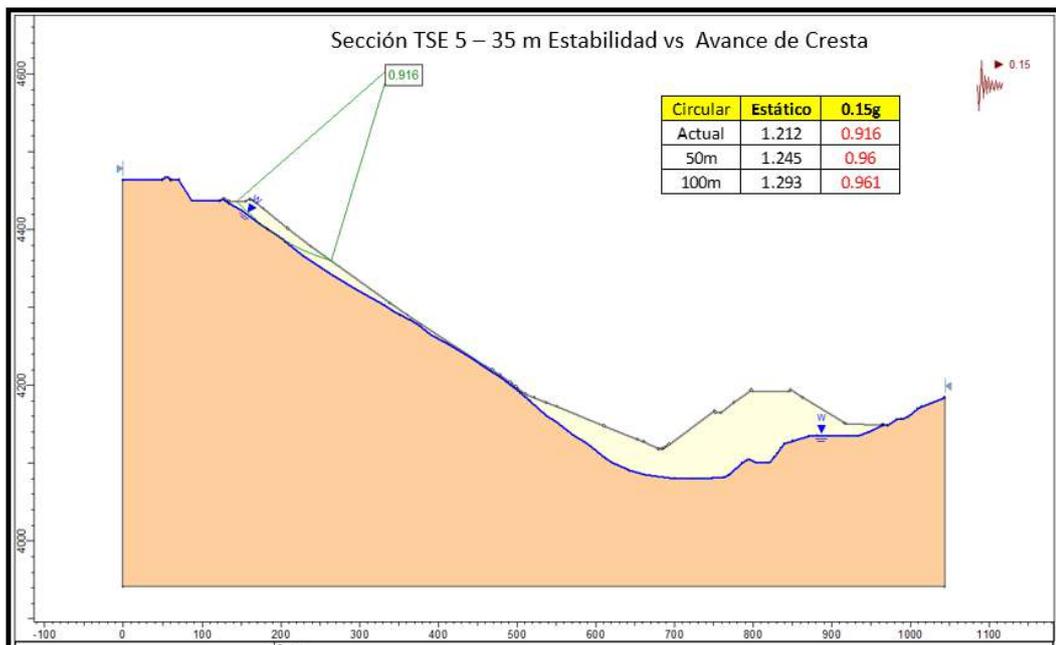


Figura 14.- Muestra los resultados del análisis Circular para diferentes avances de cresta de la sección TSE 5, de los resultados se observa que para condiciones estáticas los valores de FS > 1.2 para condiciones pseudo-estático los valores de FS < 1, de lo obtenido se descarta iniciar alguna plataforma de botaderos desde este nivel.

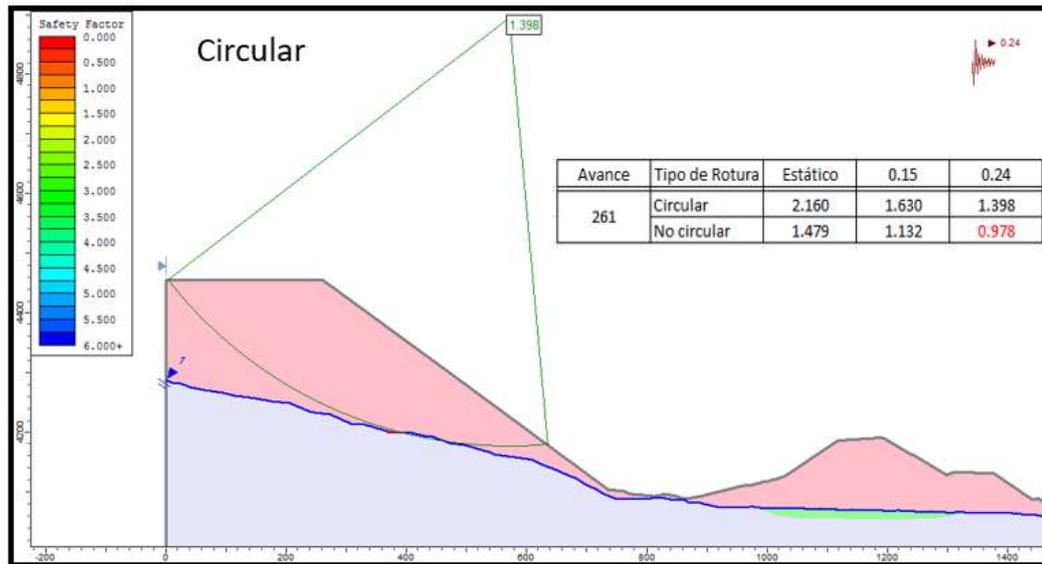


Figura 15.- Muestra la última configuración de botadero parece representar el peor de los casos entre las secciones analizadas por estabilidad (TSE 6 y TSE 6A), para las fases provisionales del desarrollo del botadero no reflejaba la geometría a lo largo de esta sección durante el desarrollo de la plataforma de botadero propuesto.

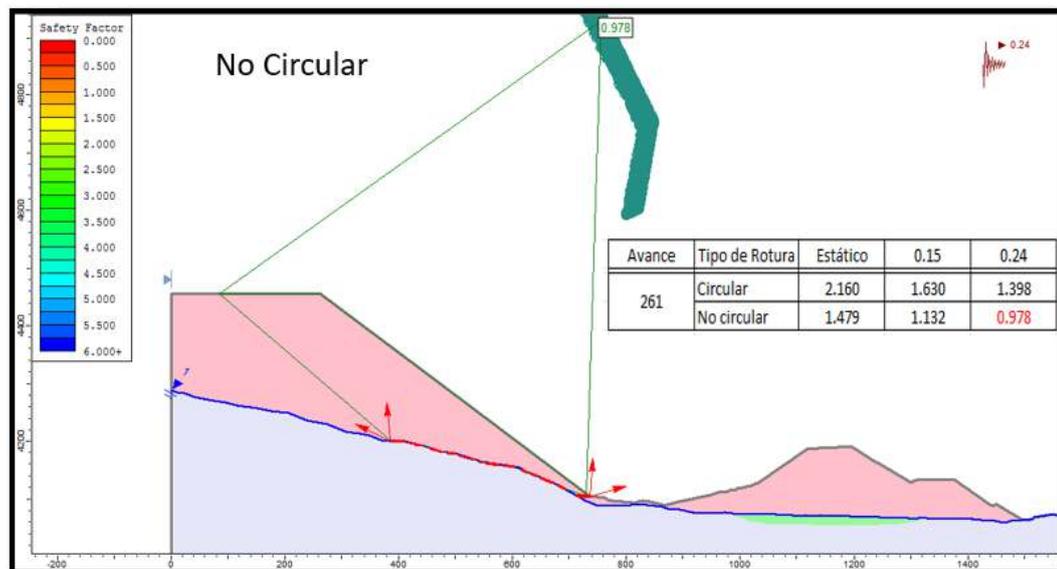


Figura 16.- Muestra el resumen de FS para condiciones estáticas y pseudo-estático, se los resultados obtenidos del análisis de estabilidad esta plataforma se trabajar teniendo la siguiente consideración planteada en el cuadro 4.1 para botaderos de Tucush en su etapa inicial, se trabaja con tractores a control remoto en los sectores de riesgo y las descargas con los camiones mineros de 297 tn se realizaran en plataforma y empujadas con tractor a control remoto, Cabe mencionar que estos diseños son temporales y deben de ser evaluados a 0.15g.



Figura 17.- Se realizo el análisis del flujo del material para las diferentes secciones, de los resultados obtenidos se incrementó la altura de las bermas de impacto de 10 a 15 m. (TSE 6 para el caso de la sección el incremento de berma fue de 10m).

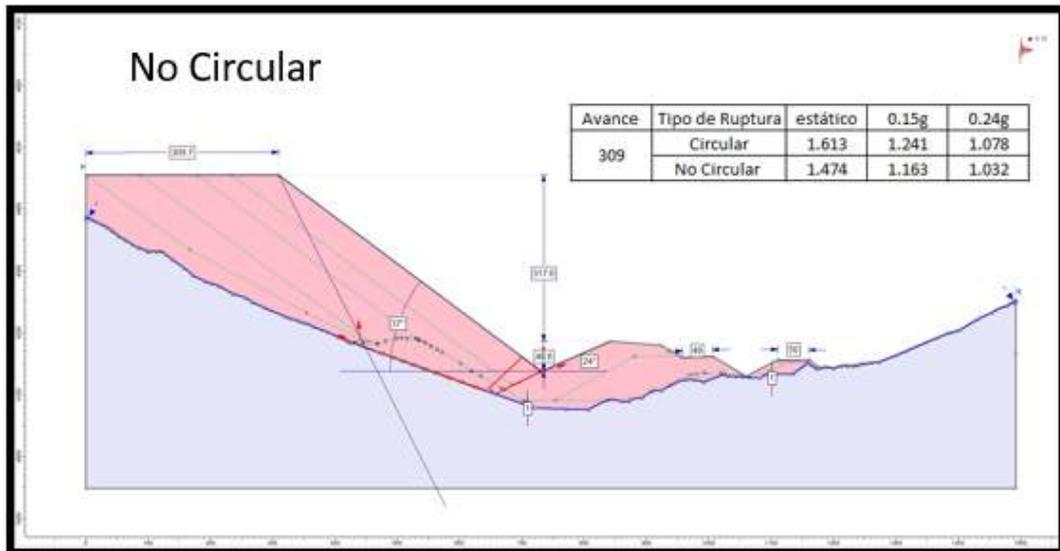


Figura 18.- Muestra el resumen de la sección TSE 6A, se evaluó el análisis estático de la estabilidad del talud de la sección TSE 6A con diferentes avances de crestas logrando FS aceptables con diferentes avances de crestas.

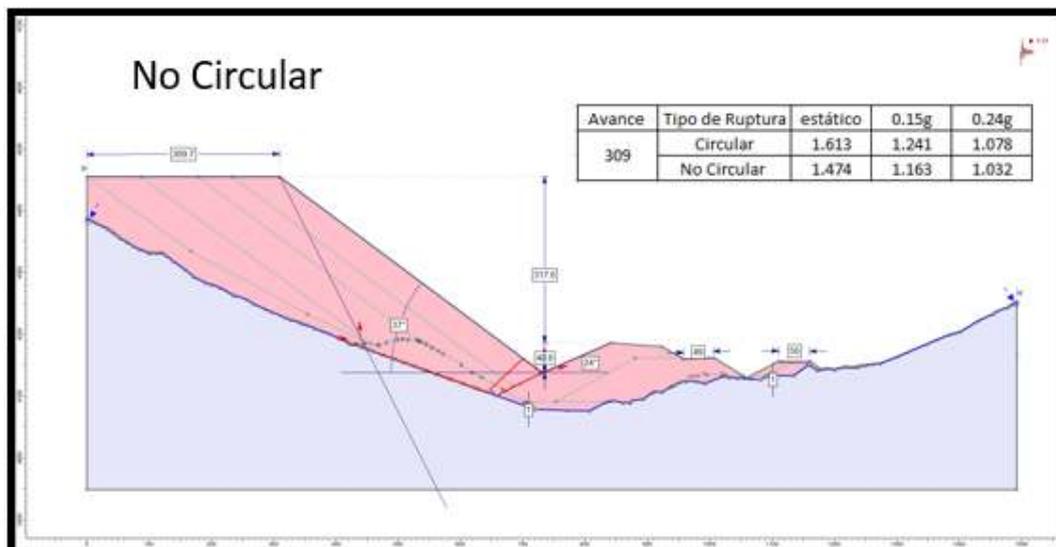


Figura 19.-: TSE 6A Se aprecian FS mayores a 1.4 bajo condiciones estáticas y FS mayores a 1.0 pseudoestáticas de 0.15 y 0.24g en los perfiles evaluados

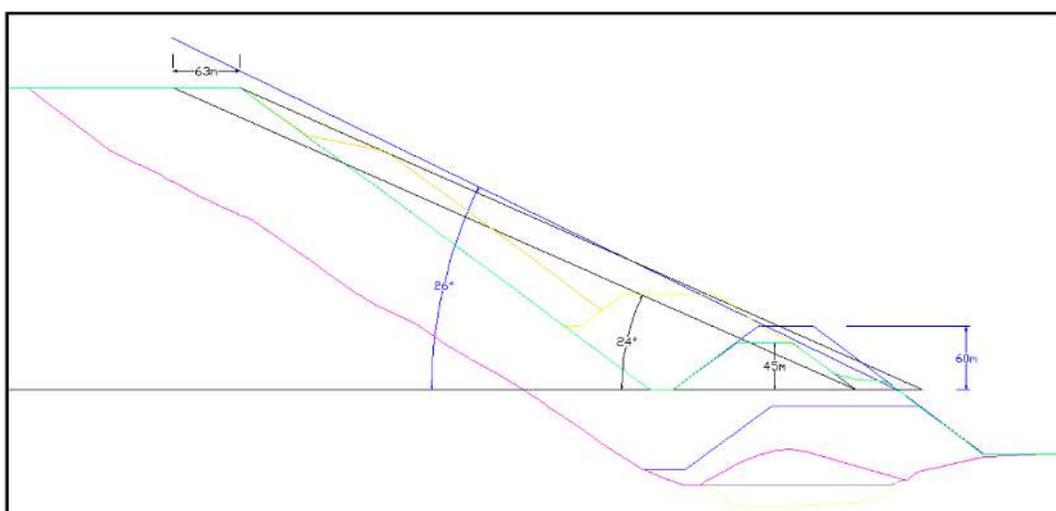


Figura 20: Perfiles TSE 1, 5, 6 Y 6A, se realizó la simulación del flujo producido por un plano de falla de 0.24g en el TSE 6A empleando Dan W, siendo contenido dicho flujo por el sistema de rampas construido en el wetland.