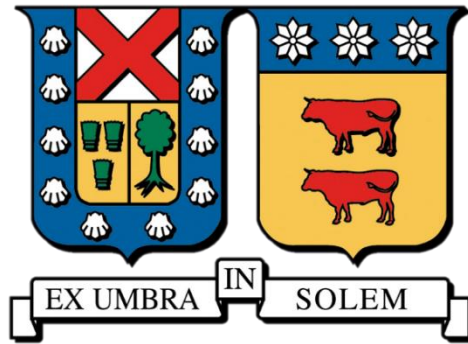


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOTÉCNICOS Y DE TRONADURA
EN EL CUMPLIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL
TALUD EN RAJO ESPERANZA SUR

Memoria de Titulación presenta por
JOCELYN NINOSKA PANGUI ORTIZ

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía
Dra. ADELINE DELONCA

Profesor Correferente
MILKO DIAZ IRARRAZABAL

Julio, 2024

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este proceso me he dado cuenta de que tengo mucho que agradecer y poco espacio para ello. En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia, mi madre, padre, hermano y mi cuñada han sido el principal pilar en mi crecimiento estudiantil y personal. Sin ellos no sería lo que hoy soy y estoy eternamente agradecida. A mi pareja que su soporte me ayudó a atravesar esta etapa de la mejor manera, sin ti esta memoria no estaría tan bien escrita y quizás la ansiedad ya me hubiese matado.

Agradecer a quienes hicieron posible este trabajo, a Milko que su guía, su disposición y ayuda en la realización de esta memoria han sido un regalo invaluable y que llevaré siempre en mi corazón e intentaré seguir sus pasos en cuanto a comprensión, buen trabajo y buena voluntad. También agradecer al área de geotecnia de Centinela que me recibieron con los brazos abiertos, agradecer a Cesar por permitirme la entrada a su área, Carlos quien fue mi segunda guía, a Yaris y Miguel quienes me aconsejaron en momentos claves, a Gerson quien me mostró un poco más de los que implica la geotecnia. También agradecer al equipo de Enaex, a Matías quien tuvo la mejor disposición y ayuda.

A las chicas AMSA, Carla, Angela y Danae, que hicieron de mi estadía una hermosa etapa de aprendizaje llena de diversiones y cariño, al llegar nunca pensé en encontrar gente tan bella de corazón y que sin esperar nada más que amistad ayudaron con su consejos en este proceso.

Agradezco de todo corazón a cada una de las personas que conocí en mi vida universitaria, mi vida como intento de basquetbolista durante toda la carrera y darme cuenta de que fue difícil compatibilizar estudios y deporte, pero que volvería a tomar cada una de esas decisiones si me permite volver a encontrar las amistades que hoy mantengo.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo identificar la influencia de los factores geotécnicos y de tronadura en el cumplimiento de los parámetros de diseño banco-berma, específicamente el ancho de berma y el ángulo de cara de banco en el rajo Esperanza Sur de Minera Centinela. Para ello, se realizó un análisis estadístico del rajo para identificar desviaciones en la información proporcionada. Luego, se llevó a cabo un análisis estructural y de tronadura en zonas específicas del rajo para identificar los principales mecanismos de falla y determinar las tendencias en los parámetros de tronadura que afectan el cumplimiento de la berma.

Los resultados del análisis estadístico general del rajo ESS indicaron que el ángulo de cara de banco alcanzó valores de 66° , 71° y 74° en los dominios estructurales 03, 04 y 05, respectivamente. El caso de estudio reveló la necesidad de aumentar los anchos de bermas requeridos para asegurar la contención de la caída de rocas o material, ajustando los valores a 9,2 [m], 8,4 [m] y 8,0 [m] para los mismos dominios.

La selección de zonas de interés identificó dos polígonos de estudio, A y B, los cuales no cumplen con los porcentajes de ancho de berma (35% y 63%, respectivamente) y de ángulo de cara de banco (48% y 64%, respectivamente). El caso de estudio determinó que son necesarias bermas más anchas de 9,5 [m] y 8 [m], respectivamente. El análisis estructural indicó que los principales mecanismos de falla en los polígonos seleccionados son la falla en cuña en el polígono A y la falla plana en el polígono B. Finalmente, el análisis de tronadura no proporcionó resultados concluyentes respecto a los parámetros analizados, es decir, no se encontró una tendencia clara entre el cumplimiento y los parámetros de tronadura.

En base a lo anterior se recomienda reevaluar el diseño de banco-berma para los polígonos A y B, considerando una reducción del ángulo cara de banco, teniendo en cuenta la influencia del control estructural presente y su posible repetición aguas abajo. Esta disminución en los ángulos caras de banco debe ser complementada con una reducción en el ángulo interrampa para preservar la geometría y lograr bermas más amplias. Además, se sugiere llevar a cabo tronaduras controladas en estos sectores, junto con estudios de campo lejano y de campo cercano para evaluar el impacto energético de las tronaduras en la pared de los bancos construidos.

ABSTRACT

The objective of this study is to identify the influence of geotechnical and blasting factors on the compliance with bench design parameters, specifically the bench width and the bench face angle, in the Esperanza Sur pit of Minera Centinela. To achieve this, a general statistical analysis of the pit will be conducted to identify any deviations in the provided information. Subsequently, a structural analysis will be carried out in specific areas of the pit to identify the main failure mechanisms. Finally, a blasting analysis will be performed in these same areas to determine trends in the blasting parameters that affect the non-compliance of the berm.

The results of the general statistical analysis of the ESS pit indicated that the bench face angle reached values of 66° , 71° , and 74° in structural domains 03, 04, and 05, respectively. The case study revealed the need to increase the bench widths to ensure the containment of falling rocks or material, adjusting the values to 9.2 m, 8.4 m, and 8.0 m for the same domains.

The selection of areas of interest identified two study polygons, A and B, which do not compliance the required bench width percentages (35% and 63%, respectively) and bench face angle percentages (48% and 64%, respectively). The case study determined that wider berms are necessary, specifically 9.5 m and 8 m, respectively. The structural analysis indicated that the main failure mechanisms in the selected polygons are wedge failure in polygon A and planar failure in polygon B. Finally, the blasting analysis did not provide conclusive results regarding the analyzed parameters, meaning no clear trend was found between compliance and blasting parameters.

Thus, it is recommended to reevaluate the bench design for polygons A and B, considering a reduction in the bench face angle, considering the influence of the existing structural control and its possible repetition in subsequent phases. This reduction in bench face angles should be complemented with a reduction in the interramp angle to preserve the geometry and achieve wider berms. Additionally, it is suggested to carry out controlled blasting in these areas, along with far-field and near-field studies to evaluate the energy impact of the blasts on the constructed bench walls.

ABREVIATURAS

AB: Ancho de Berma

ABd: Ancho de Berma de Diseño

ABR: Ancho de Berma Requerido

ACB: Ángulo Cara de Banco

ACBd: Ángulo Cara de Banco de Diseño

AMSA: Antofagasta Minerals S.A.

Dip Dir: Dip Direction

DOM: Dominios Estructurales

ESS: Esperanza Sur

FoS: Factor de Seguridad

IRA: Ángulo Interrampa

LP: Línea de Programa

PB: Perdidas de Berma

PoF: Probabilidad de Falla

UG: Unidad Geotécnica

CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1.	General.....	10
1.2.	Motivación.....	11
1.3.	Objetivos.....	11
1.3.1.	Objetivo General	11
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	12
1.4.	Alcances.....	12
2.	MARCO TEÓRICO	13
2.1.	Minera Centinela	13
2.1.1.	Rajo Esperanza Sur	14
2.1.2.	Autonomía.....	15
2.2.	Proceso geotécnico	16
2.2.1.	Modelo geotécnico	18
2.2.2.	Diseño de talud.....	21
2.2.3.	Análisis de estabilidad.....	22
2.2.4.	Bases de diseño geotécnico	25
2.2.5.	Implementación.....	25
2.3.	Conciliación de taludes en Esperanza Sur.....	30
3.	METODOLOGÍA.....	33
3.1.	Recopilación de información.....	34
3.2.	Revisión estadística rajo ESS	34
3.3.	Zonificación y análisis estadístico.....	36
3.4.	Análisis estructural y calidad del macizo rocoso.....	37

3.5.	Análisis de tronadura	39
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	40
4.1.	Revisión estadística rajo ESS	40
4.2.	Zonificación y análisis estadístico	42
4.3.	Análisis estructural	44
4.3.1.	Macizo Rocoso	44
4.3.2.	Análisis Cinemático	45
4.3.3.	Pérdidas de Berma.....	49
4.4.	Análisis de tronaduras	53
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
6.	BIBLIOGRAFÍA	61
7.	ANEXOS	64
7.1.	Tabulación ODOT	64
7.2.	Orientación dominios estructurales	64
7.3.	Índice de GSI	65
7.4.	Perfiles polígono A	66
7.4.1.	Banco 2168.....	66
7.4.2.	Banco 2186.....	66
7.4.3.	Banco 2216.....	67
7.5.	Perfiles polígono B	67
7.5.1.	Banco 2184.....	67
7.5.2.	Banco 2216.....	68

ÍNDICE DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1: Distrito Minero Centinela (DMC) y contexto estructural (Superintendencia de Geotecnia, 2023).....	13
Ilustración 2: Topografía rajo Esperanza Sur a mayo del 2023. Fuente: Superintendencia de Geotecnia (Superintendencia de Geotecnia, 2023).....	14
Ilustración 3: Parámetros geométricos de un rajo.	16
Ilustración 4: Descripción general del Proceso Geotécnico para la construcción de taludes para una mina a rajo abierto.....	18
Ilustración 5: Distribución del factor de seguridad y su relación con la probabilidad de falla (GEOCONTROL, 2022).	24
Ilustración 6: Esquematización del funcionamiento de un software de conciliación de taludes (Gerencia Mina, 2019).	30
Ilustración 7: Esquema de ancho de berma requerida y pérdidas de berma.....	31
Ilustración 8: Metodología empleada para la realización de la memoria.	33
Ilustración 9: Conciliación de taludes rajo ESS. En verde las zonas de cumplimiento de ancho de berma y en rojo las zonas de incumplimiento de ancho de berma.	37
Ilustración 10: Rajo Esperanza Sur y modelo de bloques de GSI.	38
Ilustración 11: Dominios estructural rajo Esperanza sur y principales set de joint que definen cada dominio.	38
Ilustración 12: Zonificación de los polígonos seleccionados en Esperanza Sur.....	42
Ilustración 13: Caracterización del macizo rocoso mediante parámetro de GSI y delimitación de polígonos de análisis A y B.	45
Ilustración 14: Inestabilidades cargadas de los polígonos A (izquierda) y B (derecha).	45
Ilustración 15: Roseta de diaclasa y contornos de concentración de polos para polígono A (arriba) y polígono B (abajo).....	46
Ilustración 16: Concentración de polos y definición de ventanas polígono A (izquierda) y polígono B	47
Ilustración 17: Análisis cinemático para los mecanismos de falla cuña y plana de los polígonos A (arriba) y polígono B (abajo).....	49

Ilustración 18: Perfiles en las zonas seleccionadas (Compañía Minera Centinela, 2024).....	50
Ilustración 19: Perfiles polígono A banco 2200 (Compañía Minera Centinela, 2024).....	51
Ilustración 20: Perfiles polígono B banco 2200 (Compañía Minera Centinela, 2024).	52
Ilustración 21: Inestabilidades descargadas y perfiles de los polígonos A (Izquierda) y B (derecha).....	53
Ilustración 22: Caracterización GSI para Macizo Rocoso.....	65
Ilustración 23: Perfiles Banco 2168	66
Ilustración 24: Perfiles Banco 2186	66
Ilustración 25: Perfiles Banco 2216.	67
Ilustración 26: Banco 2184 polígono B.....	67
Ilustración 27: Banco 2184 polígono B.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de diseño del banco en Rajo Esperanza Sur.	35
Tabla 2: Distribución de datos en el rajo según dominio estructural.....	40
Tabla 3: análisis estadístico para el caso de diseño por dominio estructural del rajo ESS.	41
Tabla 4: Revisión estadística para el caso de estudio por dominio estructural del rajo ESS.....	41
Tabla 5: Resumen de la revisión estadística para el caso de diseño y de estudio.....	42
Tabla 6: Ubicación de los polígonos seleccionados.	43
Tabla 7: Revisión Estadística para los polígonos A y B.	43
Tabla 8: Revisión Estadística de los polígonos para el caso de estudio.	44
Tabla 9: Resumen de la revisión estadística para el caso de diseño y de estudio de los polígonos.....	44
Tabla 10: Orientación de las inestabilidades polígono A.	47
Tabla 11: Orientación de las inestabilidades polígono B.....	48
Tabla 12: Perdidas de bermas (PB) y anchos de berma (AB) según los perfiles para el polígono A.	51
Tabla 13: Perdidas de bermas (PB) y anchos de berma (AB) según los perfiles para el polígono B.	53

Tabla 14: Cantidad de mallas de tronadura por banco en polígono A y B.....	54
Tabla 15: Información de las mallas de tronadura polígono A.....	54
Tabla 16: Información de las mallas de tronadura polígono B.....	55
Tabla 17: Información de precorte para las tronaduras del polígono A.....	55
Tabla 18: Información de precorte para las tronaduras del polígono B.....	56
Tabla 19: Tabulación ODOT: Anchos de berma requeridos según la altura del banco, ángulo Cara de Banco y su porcentaje de retención.	64
Tabla 20: Dip/Dip Dir de los Set de Joint de los dominios estructurales presentes en Esperanza Sur.	64

1. INTRODUCCIÓN

1.1. General

Las caídas de rocas y los desprendimientos de material de los bancos son un foco de gran preocupación en la industria minera, ya que representa un riesgo permanente a la seguridad de las personas y la integridad de los equipos involucrados en el proceso, impactando directamente en la continuidad operacional del rajo. Los eventos de caída de roca y/o material hacen referencia a una pérdida del equilibrio de un bloque o varios bloques desde un banco de manera vertical o subvertical. Se caracterizan por ser impredecible, con un rápido avance y que, generalmente, pueden ocurrir por factores climáticos, operacionales, de tronadura o geotécnicos (Caiceo, 2019).

La caída de roca es un problema de seguridad, así lo define el Reglamento de Seguridad Minera en su Art. 654 el cual establece que “En minas a rajo abierto se deberá mantener un control del desmoronamiento y desprendimiento de rocas y material, de la estabilidad de los taludes y cresta de los bancos” (Chile, 2004). La principal medida de contención dentro del rajo corresponde al ancho de la berma, esto implica que el cumplimiento de los parámetros asociados al diseño banco-berma es la primera medida mitigadora para asegurar la estabilidad del talud durante toda su vida operativa.

La industria minera ha experimentado una evolución significativa en la configuración geométrica de los rajes, centrándose especialmente en el aumento del ángulo interrampa (IRA), lo que ha generado numerosas implicancias. Entre las ventajas más significativas se encuentra que ha provocado una menor extracción de material de lastre, trayendo consigo una mejora en la eficiencia de la producción y un aumento de las ganancias económicas (Chauca, 2021). Sin embargo, un cambio en la geometría del rajo conlleva a una disminución en los anchos de berma, presentando un dilema de seguridad para el personal y los equipos dentro de la operación.

Los parámetros de construcción del rajo se diseñan iniciando con la mínima unidad que corresponde a la definición del banco, este se basa en 3 principales parámetros que son: (i) altura de banco que obedece a la necesidad técnica-económica de los equipos de perforación, carguío y transporte existentes (Sanhueza, 2017), (ii) el ángulo cara de banco que está definido por la condición estructural a nivel de banco, la orientación y prácticas de tronaduras (Hustrulid et al.,

2013) y (iii) el ancho de berma, diseñado para retener la caída de material y/o roca que se desprenda desde el banco inmediatamente superior (Macciotta et al., 2020).

Para asegurar las condiciones de trabajo las compañías mineras emplean criterios que acepten un cierto riesgo en el diseño de sus bermas, en general se suele considerar que la berma de diseño debe tener entre un 70% a 80% de capacidad de contención ante eventos de caída de roca (Read & Stacey, 2009). Existen factores que pueden alterar este cumplimiento, desde el punto de vista geotécnico la presencia de discontinuidades puede favorecer el descreste de los bancos, mientras que la construcción a través de la tronadura puede sobre dañar las paredes de los bancos impactando no solo en las bermas sino también en el cumplimiento de los ángulos cara de banco.

Así, surge la necesidad de analizar e identificar el comportamiento en el cumplimiento del ancho de berma y del ángulo cara de banco, identificando zonas sensibles y correlacionando su incumplimiento con factores geotécnicos como condición estructural y factores operacionales como las tronaduras de contorno.

1.2. Motivación

Este trabajo nace de la motivación de Antofagasta Minerals S.A. para mantener la integridad de sus operaciones y de la inquietud creciente que representan los eventos de caída de roca, teniendo como principal objetivo asegurar la salud física y emocional de sus trabajadores, buscando siempre el equilibrio sostenible entre la eficiencia y seguridad del negocio minero. De esta forma busca ser un aporte para estudiar el cumplimiento de los anchos de berma y ángulos cara de banco que permitan una operación más sostenible en el tiempo, además de ser un aporte para fases posteriores de expansión del rajo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el impacto de los factores geotécnicos y de las tronaduras de contorno en el nivel de cumplimiento de los parámetros de diseño Banco – Berma, dando énfasis en el logro del ancho de berma en rajo Esperanza Sur de Minera Centinela.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar aquellas orientaciones de banco que forman mecanismos de falla tipo cuña y planas.
- Analizar la relación entre el cumplimiento real del ancho de berma y ángulo cara de banco y el comportamiento de los mecanismos de fallas presentes.
- Evaluar la relación que tienen los parámetros de la tronadura de contorno en el cumplimiento del ancho de berma.
- Confirmar la validez del parámetro de diseño correspondiente al ángulo cara de banco

1.4. Alcances

- El trabajo de estudio se desarrollará en Compañía Minera Centinela perteneciente al grupo minero Antofagasta Minerals S.A. específicamente en el rajo autónomo Esperanza Sur.
- Se utilizará como análisis los datos de conciliación de taludes provenientes exclusivamente de Fase 2 y Fase 3 del rajo Esperanza Sur. Donde el horizonte de análisis contempla el 2022 hasta mayo 2023.
- Los dominios estructurales utilizados comprenden únicamente a los planteados en las bases de diseño del 2023 de Minera Centinela, donde existió una reducción de los dominios presentes en el rajo de 13 a 5 dominios.
- El análisis de este estudio no considera el modelo hidrogeológico existente dentro del rajo.
- Uso de Vulcan como método de visualización

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Minera Centinela

Minera Centinela es una de las cuatro compañías mineras del grupo privado Antofagasta PLC, la cual es administrada y operada por medio de Antofagasta Minerals S.A. (AMSA). Actualmente es el séptimo productor de cobre a nivel nacional y el décimo a nivel mundial. Su estructura societaria está compuesta por un 70% propiedad de Antofagasta Minerals S.A. y el 30% restante por Marubeni Corporation. Centinela se encuentra ubicada en la segunda Región de Antofagasta, específicamente en la comuna de Sierra Gorda, aproximadamente a unos 2.300 m.s.n.m. La historia de la compañía tal como se conoce hoy, comienza en el 2014 con la unificación de las operaciones de mina El Tesoro y mina Esperanza, con la intención de crear una estrategia de planificación y operación integrada entre ambas compañías (Antofagasta Minerals S.A., 2023).

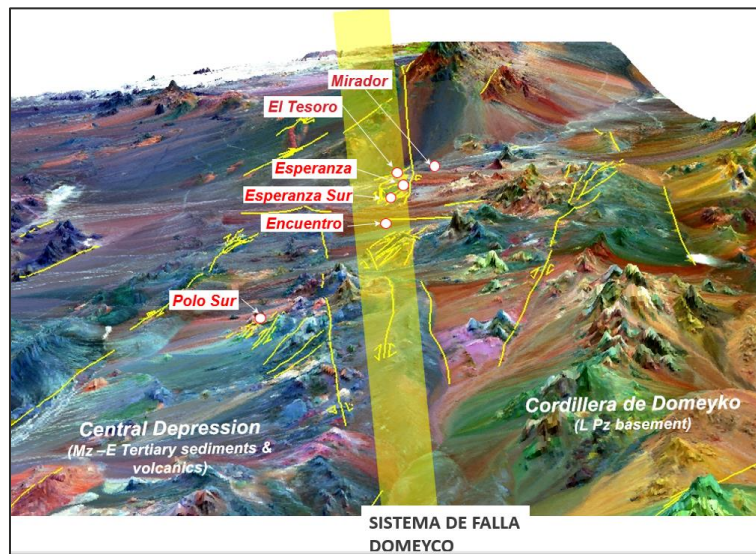


Ilustración 1: Distrito Minero Centinela (DMC) y contexto estructural (Superintendencia de Geotecnia, 2023)

Compañía Minera Centinela es un conjunto de yacimientos denominado Distrito Minero Centinela, este tiene una orientación NNE con una extensión aproximada de 50 km (Superintendencia de Geotecnia, 2023), emplazado entre la depresión central por el oeste y en el borde de la cordillera de Domeyko por el este y de norte a sur se encuentra enlazada al sistema de fallas Domeyko (Muhre & Perelló, 2009). Cuenta con varios yacimientos con diferentes etapas de proyecto, la distribución de los rajes se muestra en la Ilustración 1. Los yacimientos que actualmente están en etapa de

explotación son Esperanza, Esperanza Sur, Llano y Encuentro; Polo Sur se encuentra en etapas de proyecto y Tesoro, Tesoro Sur, Tesoro Noreste y Mirador terminaron su ciclo productivo (Gerencia de P&D, 2019).

Sus yacimientos son del tipo cobre porfídicos y exóticos explotados a través del método de extracción de cielo abierto (Retamal, 2019), los depósitos corresponden a minerales de óxidos y sulfuros por lo que cuenta con dos líneas productivas (Morales, 2020). Uno que produce concentrados de cobre para sulfuros, mientras que para óxidos produce cátodos de cobre, alcanzando una producción total de 247.500 toneladas de cobre para el año 2022. Sus principales subproductos corresponden a oro, plata y molibdeno (Antofagasta Minerals S.A., 2023).

2.1.1. Rajo Esperanza Sur

Esperanza Sur es uno de los principales rajos de la compañía y quien dará continuidad operacional a Minera Centinela, comenzó sus operaciones en el 2020 y en principio, cuenta con una proyección de su vida útil de 43 años. Corresponde a un depósito de sulfuros y se estima que contiene cerca de 1.400 millones de toneladas de reserva con una ley promedio de 0,4% de cobre que, en su máxima etapa de producción, se estima que incrementará la producción de Centinela entre 10.000 a 15.000 toneladas de cobre por año.



Ilustración 2: Topografía rajo Esperanza Sur a mayo del 2023. Fuente: Superintendencia de Geotecnia (Superintendencia de Geotecnia, 2023).

La Ilustración 2 muestra la topografía del rajo Esperanza Sur a mayo del 2023, el pit final contará con una profundidad de 850 metros aproximadamente. Actualmente se encuentra en el desarrollo de la operación de Fase 2 y Fase 3 de un total de 15 fases planificadas al 2058, siendo Fase 2 quien aporta mineral a la producción actualmente.

2.1.2. Autonomía

La planificación de Esperanza Sur consideró el inicio de sus operaciones con una externalización de sus servicios de transporte por medio de equipos manuales que, progresivamente durante 2022, fueron cambiados por equipos autónomos propios. Actualmente, el rajo cuenta con una flota de 17 equipos CAEX y 2 palas completamente autónomas, siendo así la primera mina en implementar la autonomía en Antofagasta Minerals y la segunda a nivel nacional (WPUSER, 2023).

Una de las principales ventajas de implementar equipos autónomos reside en disminuir la exposición de las personas, permitiendo una reducción de accidentes de alto potencial. Además, desde el punto de vista productivo se estima que, para Esperanza Sur, el uso de camiones autónomos podría aumentar la productividad entre un 19% a 25% (Minería Chilena, 2019). Esto se debe principalmente a una mejora en la utilización de los equipos, pues no se consideran pérdidas por horas de colación o cambio de turno y posibilita que circulen a una velocidad mayor similar a la diseñada por el fabricante (Tecnología Minera, 2023).

Sin embargo, las principales desventajas que se podría presentar en la operación del rajo se asocian al cambio cultural que deben tener los trabajadores a estas nuevas condiciones de operación, pues deben especializarse para monitorear y mantener la flota desde la distancia. A esto se le deben agregar las condiciones de terreno necesarias para los camiones autónomos, ya que cualquier elemento que obstaculice la ruta podría detener la flota (Magri, 2014).

Un ejemplo de esto son las rampas de acceso, las cuales deben estar limpias y libres de rocas para evitar que los sensores hagan que el equipo se detenga. Una segunda condición por considerar viene a ser el ancho nominal de las rampas para camiones autónomos, el cual debe ser mayor que las que utilizan camiones manuales pues, para realizar las maniobras, el camión autónomo requiere de más espacio disponible.

2.2. Proceso geotécnico

La construcción de las paredes del rajo guarda una estrecha relación con el desarrollo del proceso geotécnico, el cual demanda una colaboración coordinada que abarca las áreas de Planificación, Geología, Geotecnia, Seguridad, Operación de la mina, entre otros (Minería Chilena, 2014). Esto permitirá comprender el entorno cercano donde estará ubicado el rajo y ayudará a la correcta planificación de la extracción de mineral.

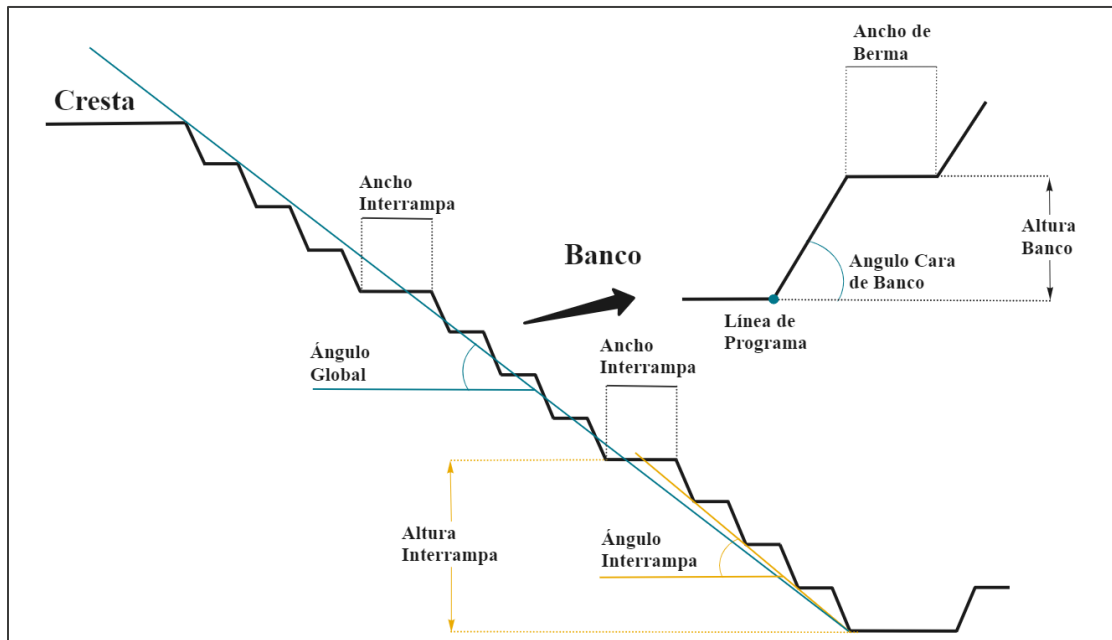


Ilustración 3: Parámetros geométricos de un rajo.

La unidad mínima para el diseño de taludes es la configuración de la escala Banco-Berma y corresponde a la definición de tres parámetros de diseño que son: (i) ancho de berma, (ii) ángulo cara de banco y (iii) altura de banco (Ilustración 3).

El primero de ellos está destinado a contener la caída de material o rocas desde el banco inmediatamente superior y corresponde a la distancia horizontal que va de la pata del banco anterior a la cresta del banco. El ángulo cara de banco es el ángulo que se forma entre la cara del banco y la horizontal, la elección de este parámetro responde a una lógica estructural y tiene como objetivo evitar la formación de inestabilidades y/o bloques que puedan provocar desprendimientos o caídas de rocas (Hustrulid et al., 2013). La altura del banco corresponde a la distancia vertical desde la cresta a la pata del mismo banco, la elección de este parámetro es de carácter operacional y depende

del tipo de equipos seleccionados, además de otras características como el nivel de selectividad, tasa de producción o tipo de depósito (Medina Bustamante, 2021).

El proceso geotécnico para la construcción de taludes se enfoca en tres objetivos fundamentales que resultan esenciales para asegurar la sostenibilidad de una empresa: (i) enfocarse en un compromiso de responsabilidad social que prioriza la prevención de accidentes de alto potencial, resguardando así la vida de los trabajadores; (ii) abordar cuestiones económicas relacionadas principalmente con la gestión de la continuidad operativa, afectando directamente el negocio; (iii) y orientarse hacia el cumplimiento de las regulaciones y la preservación del medio ambiente (Read & Stacey, 2009).

El proceso geotécnico no es un proceso normado como tal, depende en gran medida de quien lo realiza, sin embargo, comparte elementos esenciales los cuales se observan en la Ilustración 4. Todo proceso geotécnico comienza con la recopilación de las distintas fuentes de información que caracterizan el sector de la mina, describen el ambiente geográfico, tectónico, calidad de la roca y la condición de agua, esto es esencial ya que validan la información del entorno de la mina y resguarda el diseño. Cada uno de estos puntos del flujo principal son vistos en secciones más adelante.

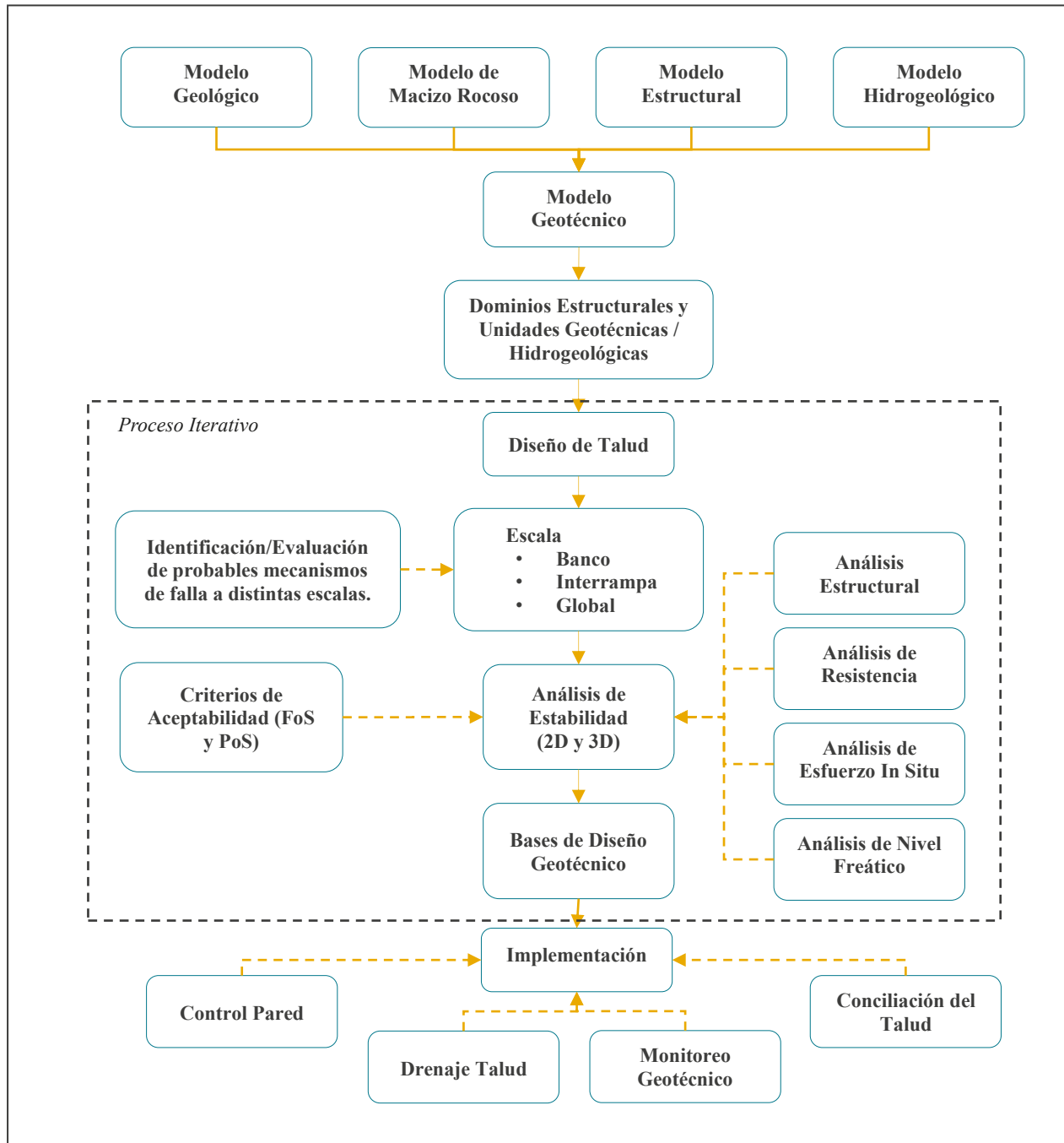


Ilustración 4: Descripción general del Proceso Geotécnico para la construcción de taludes para una mina a rajo abierto.

2.2.1. Modelo geotécnico

El desarrollo del modelo geotécnico en la construcción de taludes es un proceso fundamental que entrega los lineamientos básicos para la estabilidad del rajo, permite comprender el entorno de la mina y posibilita la definición de los dominios geotécnicos. El modelo geotécnico está compuesto

por la información consolidada de cuatro modelos esenciales que son el modelo geológico, modelo de macizo rocoso, modelo estructural y modelo hidrogeológico y que entregan como resultados las unidades geotécnicas (UG), unidades hidrogeológicas (UH) y los dominios estructurales.

- **Modelo geológico**

Este modelo busca entregar una representación del sector, vinculando la geología física regional y los eventos ocurridos en la formación del yacimiento con el entorno de la mina. Este modelo debe prepararse de manera precisa por ser un elemento fundamental en el diseño de taludes. La caracterización del modelo geológico debe contener en su información, como mínimo, la naturaleza del suelo, la litología, el tipo y el grado de alteración, descripción de las zonas mineralizadas, meteorización, y los esfuerzos in situ (Read & Stacey, 2009).

- **Modelo macizo rocoso**

El propósito de este modelo es generar una base de datos con las propiedades ingenieriles del macizo rocoso para ser usados en los análisis de estabilidad. El modelo de macizo rocoso considera propiedades básicas de la roca como la resistencia de la roca intacta, la resistencia de las estructuras, la clasificación del macizo rocoso y la resistencia del macizo rocoso. Esto se determina principalmente con pruebas de laboratorio como el UCS para el caso de la resistencia de la roca intacta. Para la clasificación del macizo rocoso existe métodos como el GSI, el RMR, el Q de Barton, entre otros.

- **Modelo estructural**

El objetivo de este modelo es describir la orientación y espacialidad de la distribución estructural para entender cómo afecta en la estabilidad de los taludes. En general, el modelo estructural considera dos niveles de información sobre las estructuras. El primero corresponde a las estructuras mayores que tiene influencia a nivel de escala interrampa y global, afectando principalmente al macizo rocoso donde se encuentran las fallas o pliegues. El segundo nivel, en cambio, considera las estructuras menores que influyen a escala de banco e interrampa, donde se encuentran las familias de discontinuidades o set de joints o diaclasas, estas últimas son las que afectan el comportamiento y cumplimiento de los parámetros geométricos del banco.

- **Modelo hidrogeológico**

La presencia de agua en un rajo puede afectar de dos maneras: (i) aumenta los esfuerzos efectivos y la presión de poro ejercida en el macizo rocoso disminuyendo su resistencia al corte, (ii) puede generar una condición saturada que favorece la aparición de “piscinas” de agua estancada, lo que podría disminuir la efectividad de los explosivos o impedir el acceso de sectores dentro de la mina.

El modelo hidrogeológico, por ende, considera la porosidad y presión de poros junto con el nivel freático. A diferencia de los otros tres modelos, la condición de agua en el rajo es el único factor que puede ser alterado artificialmente a través de la extracción de agua.

- **Unidades geotécnicas**

La unificación del modelo geológico y modelo de macizo rocoso generan el modelo de caracterización y da como resultado las unidades geotécnicas. Ellas corresponden a una caracterización del sector de la mina según su calidad utilizando información como UCS y módulos elásticos, definiendo así sectores con comportamiento geotécnico y geológico similar.

- **Dominio estructural**

Los dominios estructurales son el resultado del Modelo Estructural, y sectorizan el ambiente estructural del rajo según las características de fallas o discontinuidades presentes. La primera división se realiza a partir de las fallas mayores presentes, ya que estas marcan límites estructurales naturales de división del macizo rocoso. Luego se analiza cada sector de manera individual para identificar si existen orientaciones preferentes en las discontinuidades como joint o diaclasas; si dentro de estos sectores existe más de una orientación preferente, estos se suelen subdividir en dominios más pequeños.

- **Unidades hidrogeológicas**

Corresponde a una sectorización de la zona de interés a partir de la información del agua presente, incluye información como datos hidrogeológicos regionales históricos o una recopilación por medio de datos obtenidos de campañas de sondajes. Esto permite dimensionar el caudal de agua que debe ser extraído para mantener el rajo estable.

2.2.2. Diseño de talud

El desarrollo del diseño del talud debe considerar implementar toda la información que caracteriza el sector de la mina, comenzando por una división del modelo geotécnico en dominios que tengan características geológicas, estructurales y propiedades del macizo rocosos similares. Esto ayudará para generar un diseño del rajo preliminar. El diseño del talud es un proceso iterativo que va desde la unidad mínima que es el diseño Banco – Berma, pasa a escala interrampa y termina con el diseño global del talud. Cada una de estas escalas requieren pasos que aseguren la estabilidad del rajo. Las diferentes escalas de trabajo requieren necesidades de información diferenciadas y específicas que se describen a continuación:

- **Escala banco – berma**

El diseño del banco debe estar pensado para cumplir con criterios de seguridad ya que requiere de anchos de bermas que aseguren la detención y contención del material de derrame o caída de roca, además se debe asegurar la confiabilidad del diseño, lo que implica que las superficies y crestas deben ser estables en el corto y largo plazo.

El banco de un talud se compone esencialmente de 3 parámetros (i) Altura de banco, (ii) ancho de berma y (iii) ángulo cara de banco (ver Ilustración 3). El proceso para realizar la configuración del banco comienza con un análisis de información estructural proveniente de las inestabilidades utilizando proyecciones estereográficas. Se definen las orientaciones de los sets de discontinuidades predominantes, sectorizándolas según las estructuras definidas por la orientación de las paredes del talud y los sets, luego se realiza un análisis cinemático a partir de los sets definidos y se establece el ángulo cara de banco. El principal objetivo es lograr un ángulo cara de banco que disminuya la posibilidad de formar discontinuidades planares, cuñas o bloques inestables para finalmente determinar el ancho de berma. La altura de banco generalmente corresponde a una decisión económica y de disponibilidad de los equipos.

- **Escala interrampa**

La cinemática que se utiliza para la escala interrampa es la misma que se utiliza a escala banco, solo cambian las dimensiones de análisis. Generalmente los mecanismos de fallas (cuñas o planares) deben ser lo suficientemente largas para abarcar dos bancos o más banco. La definición del ángulo interrampa es un componente crítico, ya que es el componente económico de la mina y

debe seguir una serie de pasos para determinar el ángulo óptimo de cada una de las paredes del rajo. Se comienza estableciendo la orientación, el espaciamiento, la longitud, la ubicación y/o la probabilidad de ocurrencia de las fallas y sets de joint, la resistencia al corte y finalmente se realiza un análisis de estabilidad para determinar la probabilidad de que los planos o cuñas fallen.

- **Escala global**

La escala global incluye el análisis cinemático de los mecanismos de fallas cuña o planares vistos previamente y el comportamiento del macizo rocoso, este último abarca mecanismos de fallas mucho más complejos y que requieren de análisis mediante software de modelamiento numérico. En general, en macizos rocosos débiles, el principal mecanismo de falla estará dominado por la resistencia del macizo. Es importante realizar un análisis global del rajo puesto que verifica la estabilidad de los taludes a nivel interrampa y se asegura que el macizo rocoso sea capaz de sostener el diseño propuesto en toda la altura del pit.

2.2.3. Análisis de estabilidad

Una vez que existe un diseño preliminar de los taludes, es necesario validarlo a través de un análisis de estabilidad que busca que los taludes sean capaces de permanecer durante toda la vida de la mina. En general, este proceso puede ser desarrollado a través del modelamiento en dos o tres dimensiones y permite comprobar si el talud es sustentable en el tiempo, es decir, que no existan mecanismos de fallas o desplomes de las paredes que afecten la seguridad y funcionalidad del diseño del talud.

El análisis de estabilidad se realiza en función de cuatro objetivos principales: (i) Determinar si el diseño es estable, (ii) identificar los mecanismos de fallas predominantes en el rajo y determinar la sensibilidad del diseño a otros mecanismos como la lluvia o sismos, (iii) identificar zonas de potencial interés geotécnico donde existan zonas que deban ser estabilizadas y (iv) diseñar el mejor talud desde el punto de vista de seguridad, confiabilidad y economía (Suárez, 2009).

Tradicionalmente, los criterios de aceptabilidad son definidos por las compañías mineras según el apetito de riesgo que establezcan dentro de su gobernanza corporativa, sin embargo, deben cumplir condiciones mínimas que satisfagan el proyecto y que respondan a un compromiso social y legislativo del país.

- **Criterios de aceptabilidad a escala banco**

El criterio de aceptabilidad en el diseño del banco está definido por la berma de diseño la que, a su vez, se determina por la capacidad de retención de las bermas ante inestabilidades y/o caídas de rocas del banco superior, más la pérdida de berma medida en terreno. Desde un punto de vista económico no es factible diseñar bermas que contengan el 100% del material de derrame y/o caídas de rocas, por lo que el porcentaje de retención que normalmente se utiliza en la industria minera se encuentra entre un 70% a un 85% (Read & Stacey, 2009)

- **Criterios de aceptabilidad a escala interrampa**

Los criterios de aceptabilidad en esta escala deben considerar tanto las inestabilidades con control estructural, como la posibilidad de ocurrencia de inestabilidades de tipo circular o rotacional, donde la resistencia del macizo rocoso pasa a ser el factor dominante. Los valores mínimos permisibles pueden ser determinas por medio de un factor de seguridad (FoS) y un límite máximo para la probabilidad de falla (PoF).

- **Criterios de aceptabilidad a escala global**

Los criterios de aceptabilidad para esta escala deben considerar evaluar las inestabilidades que afecten a toda una pared o un porcentaje relevante del rajo. Al igual que para la escala interrampa, el valor mínimo permitido debe estar en función de un FoS. Además, debido a la incertidumbre de la información de entrada en un modelo geotécnico, también es necesario definir un límite máximo para la PoF, el cual puede variar en función de otros factores, como lo es la presencia de infraestructuras críticas en el sector de análisis o la construcción de una pared final.

- **Factor de seguridad (FoS)**

El factor de seguridad (FoS) es una medida determinística adimensional, está basada en la teoría de equilibrio límite y se define como el valor resultante entre las fuerzas resistentes y las fuerzas demandantes (Cerezzo & Figueroa, 2022). En la realidad de un talud, esto implica que el FoS es la relación que existe entre la resistencia cortante disponible en una superficie deslizante y las fuerzas de corte necesarias para mantener el equilibrio (Mucuta Lito et al., 2020).

Bajo este contexto, la teoría sostiene que el talud se mantendrá estable con un FoS igual o mayor a 1, pero en la práctica esto no siempre se cumple y se relaciona directamente a la calidad y precisión

de la información de entrada. Generalmente son aceptables FoS de 1,2 o 1,3 para análisis de estabilidad que abarquen el corto plazo, mientras que taludes que tengan una larga duración el FoS oscila entre 1,4 y 1,5 (Read & Stacey, 2009)

- **Probabilidad de falla (PoF)**

En las últimas décadas el uso de la probabilidad de falla como criterio de aceptabilidad ha tomado importancia y su uso ha sido cada vez más extendido. La PoF es un porcentaje que se define como el número iterativo de análisis con un factor de seguridad inferior a 1.0, con respecto al número total de FoS considerando todos los casos y sensibilizaciones analizadas. La cual es expresada como:

$$Pf = P[FS \leq 1.0]$$

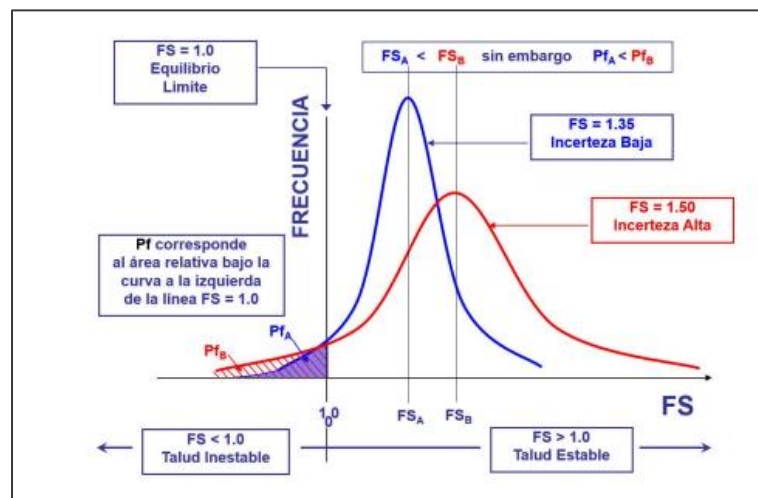


Ilustración 5: Distribución del factor de seguridad y su relación con la probabilidad de falla (GEOCONTROL, 2022).

En la Ilustración 5, se observa la relación existente entre el factor de seguridad y la probabilidad de falla, el número de iteraciones del cálculo del FoS tiene una distribución normal, de esta forma una media del FoS mayor no siempre implica una mejor PoF. En el caso de la curva roja que tiene una media de FoS mayor a la azul, se nota una mayor dispersión de los datos sobre la media. Por otro lado, la curva azul tiene un valor medio menor del FoS además de tener una menor dispersión de los datos alrededor de la media. Esta menor dispersión de datos se traduce como una menor PoF para el caso de la curva azul. Por lo anterior es indispensable que estos criterios trabajen en conjunto para asegurar un buen manejo de la información (GEOCONTROL, 2022).

Un especial atractivo de la PoF es que establece el nivel de confianza del diseño del talud, es decir, la confiabilidad de una estructura está basada en la probabilidad de éxito que tenga. Así, una PoF del 20% refleja una confiabilidad del 80% lo que se traduce en un nivel de confianza requerido para una etapa de diseño y construcción.

2.2.4. Bases de diseño geotécnico

Las bases de diseño son lineamientos esenciales para la construcción de taludes, son exclusivas para cada mina pues dependen de factores como la ubicación de las zonas de mineral, los tipos de rocas, resistencia del macizo rocoso, el ambiente estructural, entre otros. En general, para entregar las bases de diseño se deben definir zonas de trabajo que comparten características de construcción similares, es decir, su comportamiento geotécnico es parecido. Dentro de ellas debe estar especificado los parámetros de construcción del banco como ancho de berma y ángulo cara de banco, incluyendo el ancho de las bermas de desacoples y el ancho nominal de las rampas.

Además, debe incluir el parámetro más importante desde el punto de vista económico que corresponde a los ángulos interrampas (IRA) que tendrá las diferentes paredes de la mina y, por sobre todo especificar la altura interrampa que corresponde a la distancia vertical que existe entre dos rampas. La altura del interrampa indica la cantidad de bancos que deben ser construidos antes de considerar una berma de desacople, en la práctica los planificadores hacen calzar estas bermas de desacoples con rampas de acceso.

2.2.5. Implementación

El trabajo de implementación se basa en la puesta en marcha del diseño de los distintos elementos del talud. Esto requiere el esfuerzo combinado de varias áreas, como Planificación, Operación, Perforación y Tronadura, y Geotecnia, lo cual permite construir el banco. La implementación es un proceso cíclico de constante retroalimentación que comienza con el control de la pared, es decir, con la construcción del banco. Luego, se suele realizar un saneamiento del banco, eliminando inestabilidades que tengan riesgo de caer. Finalmente, es necesario realizar un monitoreo de la pared y una conciliación de los bancos construidos.

- **Control pared**

La construcción del banco de un talud es un proceso crítico desde el punto de vista económico y de seguridad. Este proceso consiste en la perforación de la roca por medio de pozos, donde se coloca explosivo y que, posterior a su detonación, transmite la energía en forma de ondas y gases para fracturar el macizo rocoso. Su principal objetivo es lograr la fragmentación de la roca para lograr un fácil manejo en su transporte.

En los últimos años ha existido una tendencia al aumento de energía para triturar la roca, con el objetivo de disminuir los costos del chancado afectando directamente el estado de las paredes (Read & Stacey, 2009). Desde el punto de vista geotécnico la planificación de las tronaduras debe considerar minimizar la energía de impacto hacia las paredes del talud para así mantenerlo estable y seguro. Para medir el daño sobre las paredes del rajo existen dos métodos que corresponde a los estudios de daño en campo cercano y en campo lejano.

La teoría del daño en campo cercano se basa en que la magnitud del daño producido por la tronadura es proporcional a la energía de la onda de choque generada, ligada a su vez a la velocidad máxima de partícula. Así, la energía será proporcional al cuadrado de la velocidad. Por su parte, la teoría del daño en campo lejano establece la probabilidad de que a grandes distancias la tronadura pueda generar daños por apertura, extensión de fracturas o activación de mecanismos de fallas. De esta manera, permite evaluar las consecuencias de estas ondas sobre obras civiles, contrastándose con estándares internacionales donde se establecen los niveles de vibración permitidos.

Para disminuir el nivel de vibración que impacta al talud, la gran mayoría de las empresas emplean tronaduras controladas en su operación. Estas consisten en generar un plano de corte o cara libre previo a la detonación de la malla de tronadura principal. Esto asegura que no se produzca sobre excavación, además de minimizar el daño producido al macizo rocoso. Existen tres métodos de tronaduras de control que corresponde al buffero amortiguado, recorte y precorte (InspiraCap, 2020).

El buffero amortiguado consiste en modificar la última fila de la tronadura, para limitar la energía hacia la pared final. Se reduce el explosivo, el burden y el espaciamiento. La tronadura de corte se usa para cortar el material en exceso de la cara del banco, dejando una cara más lisa y estable y se

realiza posterior a la tronadura de contorno. Finalmente, el precorte es la técnicas más utilizada en minería superficial ya que sirve para aislar la zona tronada con la roca remanente. Generalmente se realiza con días o milisegundos antes de la tronadura de contorno.

Tanto el precorte como el recorte se utilizan para perfilar el contorno del banco, para obtener superficies sanas, estables y regulares. Se utilizan diámetros de barrenos inferiores a 100 [mm], perforados con un bajo espaciamiento, con baja carga de explosivo y se disparan de forma simultánea. De esta forma se busca generar un mínimo de agrietamiento del macizo rocoso circundante y una fractura a lo largo de la superficie tronada. Esto se logra a través de dos formas: (i) intercalando pozos vacíos entre barrenos cargados y (ii) desacoplando las cargas dentro del barreno (InspiraCap, 2020).

- **Drenaje**

El agua significa, en muchas ocasiones, un peligro para la operación pues influye en el comportamiento del talud, cambiando los esfuerzos efectivos y la presión de poros ejercidas sobre el macizo rocoso. El aumento en la presión de poros reducirá la resistencia al corte de la roca, aumentando la probabilidad de falla, además de generar problemas operacionales como condiciones de saturación y agua estancada dentro del rajo. Esto afecta de varias maneras ya que se pierden accesos a sectores de la área mina, hace necesario el uso de una mayor cantidad de explosivos o de fulminantes con características especiales, incrementa el desgaste de los equipos y cargas ineficientes y genera condiciones de trabajo inseguras.

Las operaciones mineras que excavan por debajo del nivel freático deben contar con algún plan de drenaje. La magnitud de agua que debe ser drenada dependerá de 3 factores: (i) características hidrogeológicas del macizo rocoso, (ii) la profundidad de la excavación y (iii) la resistencia de los materiales que componen el talud.

Existen operaciones donde la tasa de evaporación es suficiente para mantener la presión de poros y nivel de agua en condiciones óptimas para el trabajo. Sin embargo, en la gran mayoría de las operaciones minera es necesario tener pozos con sistemas de bombeo de agua hacia el exterior de la mina, pudiendo ser localizados fuera o dentro del rajo.

El plan de drenaje en minería debe considerar la extracción tanto de agua subterráneas como superficiales, ya que estas pueden crear variados problemas al proyecto como, por ejemplo, la

erosión de taludes o el incremento de la presión hidráulica en las fracturas para el caso de aguas superficiales. Mientras que para aguas subterráneas puede disminuir la resistencia de la roca o la estabilidad del talud.

- **Monitoreo**

El entorno complejo donde se desarrolla la minería hace que los modelos que representan las zonas mineras estén basados en información incompleta. La confianza en los modelos está limitada principalmente al presupuesto disponible y la tecnología utilizada. A pesar de los avances tecnológicos que han simplificado este proceso aún existe una incertidumbre asociada (Read & Stacey, 2009).

Luego de la implementación de los diseños de construcción es necesario monitorear las condiciones reales del rajo, validando la geología, geometría y comportamiento de los taludes. El monitoreo está definido como una forma de conocer el comportamiento de los taludes de un rajo y hace referencia a la deformación, características intrínsecas del macizo rocoso, esfuerzos y la presencia de agua subterránea. El monitoreo es una herramienta fundamental para la evaluación del desempeño de la construcción y ayuda a minimizar los riesgos de accidentabilidad.

Los principales objetivos del monitoreo se basan en: (i) mantener la seguridad y proteger al personal y equipos, (ii) dar alarmas tempranas ante zonas potencialmente inestables, (iii) identificar mecanismos de inestabilidad que ayuden a general un plan de acción y (iv) evaluar el desempeño de la construcción del talud (Suárez, 2009).

La legislación chilena, en su artículo primero del Reglamento de Seguridad Minera, obliga a las empresas mineras a “proteger la vida e integridad de las personas” por lo que los instrumentos de monitoreo vienen a suplir esta necesidad de resguardar la seguridad en la operación (Chile, 2004).

En términos generales los instrumentos de monitoreo pueden ser clasificados en términos de su temporalidad o precisión. El primero hace referencia a la periodicidad de la toma los datos, pudiendo ser en tiempo real, horas, días o incluso semanas. Mientras que la precisión dependerá de la unidad mínima que sea capaz de medir, existiendo instrumentos de monitoreo que miden magnitudes de milímetros, centímetros o metros.

La instrumentación tiene por objetivo monitorear el comportamiento de un pared o talud de la mina a través del tiempo. Para lograr una buena instrumentación es necesario planear un programa

de monitoreo. El procedimiento comienza con la selección del tipo de medición en función de precisión y temporalidad requerida, luego se escoge el instrumento que se adapte mejor a la realidad del rajo. Una vez que se tiene clara la ubicación, número y profundidad de los pozos se debe determinar la metodología de la lectura de las mediciones y escoger la forma más conveniente de manejar y presentar los datos obtenidos.

- **Conciliación de taludes**

El banco es el elemento principal de un talud ya que su geometría afecta en la capacidad de contención de eventos de caída de roca, así como también controlan el diseño de las rampas y por ende el diseño general del rajo. Por lo anterior, la evaluación sistemática del desempeño de los bancos es relevante en el desarrollo y estabilidad de la mina. La conciliación de taludes surge entonces como una práctica operacional asociada a una metodología de full control, justificada para la construcción de taludes altos y más verticales, que requiere mayor control y precisión (Scherpenisse, 2020).

De esta forma, la conciliación de taludes se define como la concordancia del diseño planificado sobre lo que está implementado en terreno. Es considerada como un método más de monitoreo ya que su principal objetivo es identificar desviaciones que permitan generar planes de acción tempranos lo que es esencial para evitar accidentes y mantener la estabilidad de la mina (Albornoz et al., 2020).

La conciliación de taludes se realiza en el resultado del banco, es decir, luego de la tronadura o del saneamiento del banco, según la necesidad operativa de cada faena. Con esto no solo se evalúa el cumplimiento y calidad del diseño, sino también el rendimiento de las tronaduras. El análisis de la estadística de la información permitirá encontrar la causa de los sectores con bajo cumplimiento y tomar medidas correctivas en el corto o largo plazo.

Históricamente, la mayoría de las operaciones mineras realizaban la conciliación de taludes de forma manual, lo que tomaba varios días poder realizarse. Hoy existen en el mercado numerosos softwares que ayudan a simplificar y acelerar este proceso como el G-Conciliation de Geoblast o el software SICT (Sistema Integrado de Control de Taludes) de Timining.

El funcionamiento de los softwares es similar y se basan en analizar la topografía real del rajo y compararla con el diseño propuesto. En el caso del software SICT para obtener los parámetros

geométricos conciliados de la topografía, se generan nodos que se adaptan a distintos puntos de la topografía y que luego son linealizados para obtener los parámetros geométricos. La Ilustración 6 muestra un esquema del funcionamiento básico del software.

La lógica que hay detrás de estos softwares se sustenta en el análisis geométrico a través de un factor de diseño, este se basa en diferentes ponderaciones de distintas combinaciones de los parámetros de diseño del rajo (ancho y alto de la berma, ángulo cara de banco, línea de programa y/o ángulo interrampa). Además, un factor de condición que busca evaluar la calidad y consecuencia del daño producido en el banco por tronadura, remates o saneamientos.

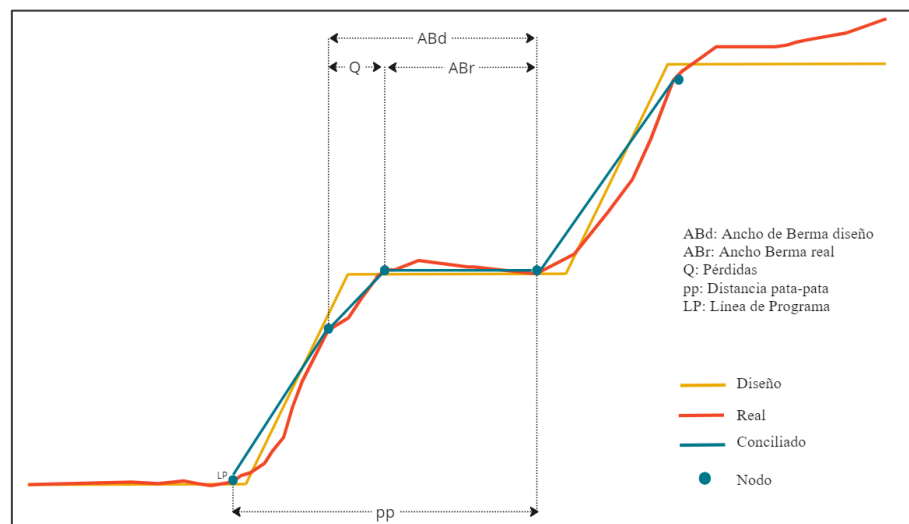


Ilustración 6: Esquematización del funcionamiento de un software de conciliación de taludes (Gerencia Mina, 2019).

Los rangos o tolerancias que cada factor debe cumplir es un elemento que las empresas deben determinar de manera individual, ya que depende de la realidad que cada terreno experimente. No lograr el factor de diseño puede indicar que el diseño no está sustentado o las prácticas operacionales no consideran las características geotécnicas o la competencia del macizo rocoso. Por su parte, no lograr el factor de condición pueden relacionarse a un modelo geotécnico que no está ajustado a la realidad del rajo. Finalmente, un alto cumplimiento de ambos factores permite implementar o considerar una optimización en el diseño.

2.3. Conciliación de taludes en Esperanza Sur

La conciliación de taludes en ESS es un proceso fundamental para el análisis posterior de los bancos, no solo porque muestra los resultados de la implementación del diseño, sino que además

permite obtener tendencias del comportamiento en el cumplimiento de los parámetros de diseño en el tiempo. Esto permite tomar medidas tempranas ante desviaciones en la construcción, viendo oportunidades de mejoras si el talud lo permite o corrigiendo el diseño si los resultados son malos (Albornoz et al., 2020).

En ESS, la conciliación de taludes se realiza a través del software SICT de Timining, el cual basa su funcionamiento en la evaluación geométrica del rajo a partir del factor de diseño (FD). El FD en Centinela evalúa tres parámetros del banco, siendo estos el ancho de berma, el ángulo cara de banco y la línea de programa. Cada parámetro aporta al FD una ponderación diferente según su relevancia definida a nivel corporativo: el ancho de berma cuenta con el mayor peso con un 60% de la ponderación, el ángulo cara de banco aporta un 30% y la línea de programa con un 10%.

En 2019, debido a las peticiones del GRB (Geotechnical Review Board), Antofagasta Minerals implementó una estandarización de los criterios del diseño banco-berma, dando como resultado una nueva metodología de trabajo para la conciliación de taludes. En esta, se determina que el ancho de berma de diseño (ABd) estará compuesto por la suma de un ancho de berma requerido (ABR) y las pérdidas de berma (PB) (ver Ilustración 7).

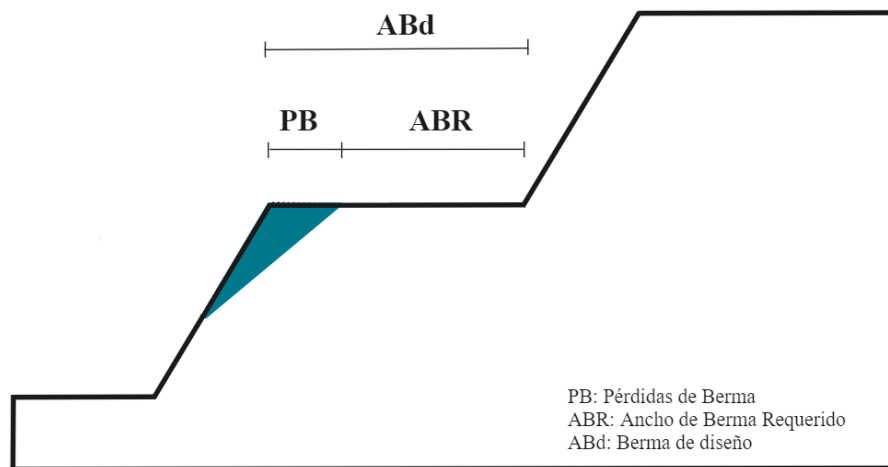


Ilustración 7: Esquema de ancho de berma requerida y perdidas de berma

Las PB están gobernadas por los fallamientos con control estructural, la calidad del macizo rocoso y la implementación de la tronadura la cual, a su vez, dependen de la resistencia de los sets de joint presentes en el banco. Por su parte, el ABR nace con el fin de asegurar un mínimo cumplimiento necesario para contener una caída de roca o un evento de derrame, es decir, es el valor mínimo que

debe tener una berma en terreno para asegurar un cierto porcentaje de retención de rocas del banco inmediatamente superior (Albornoz et al., 2020).

La metodología para obtener el ancho de berma requerido (ABR) considera dos métodos de cálculo que corresponden al lago de derrame (LD) y al criterio de tabulación de ODOT. El LD calcula la berma en función del volumen medio de inestabilidades, mientras que el criterio de ODOT es una tabulación que relaciona ángulo cara de banco con la altura del banco. De esta forma el ABR quedará definido por el máximo valor entregado por ambos métodos. En rajo ESS la metodología que entrega el máximo valor de ABR está dado por el criterio de ODOT.

El criterio de ODOT fue desarrollado por el Departamento de Transporte de Oregón como un método de identificar los anchos de bermas necesarias en carreteras civiles para contener eventos de caídas de rocas. Está basado en el estudio realizado por Ritchie en 1963 que identifica las características de la caída de roca en relación con la altura del talud y el plano por el que cae, así determina la distancia de impacto esperada desde la base del talud (Pierson et al., 2001).

La base de estudio de Ritchie para calcular el ancho de berma considera que una roca que cae en un plano vertical tenderá a caer en caída libre y, por lo tanto, su distancia horizontal de impacto será menor que una roca que cae por un plano inclinado. Una de las principales limitantes de este estudio radica en que no considera el área de retención de la roca, solo el área de impacto, por lo que el ancho de berma puede no ser necesario para retener una caída de roca (Pierson et al., 2001)

De esta forma el criterio de ODOT modifica el estudio de Ritchie y tabula la berma necesaria para contener una caída de roca según la altura del banco y el ángulo cara de banco, entregando además la opción de porcentaje de retención esperada (ver Anexo 7.1). Al igual que Ritchie, el ABR para ángulos más verticales requiere de menos berma para contener la caída de una roca.

3. METODOLOGÍA

La elaboración de la metodología tiene por meta encontrar los principales factores que provocan al incumplimiento de los anchos de bermas del rajo. Para esto se comienza con una revisión estadística general del rajo, para luego sectorizar e identificar los puntos sensibles, luego se realiza una revisión de parámetros estructurales y de tronadura. La Ilustración 8 muestra de forma general, los puntos clave de la metodología a realizar.

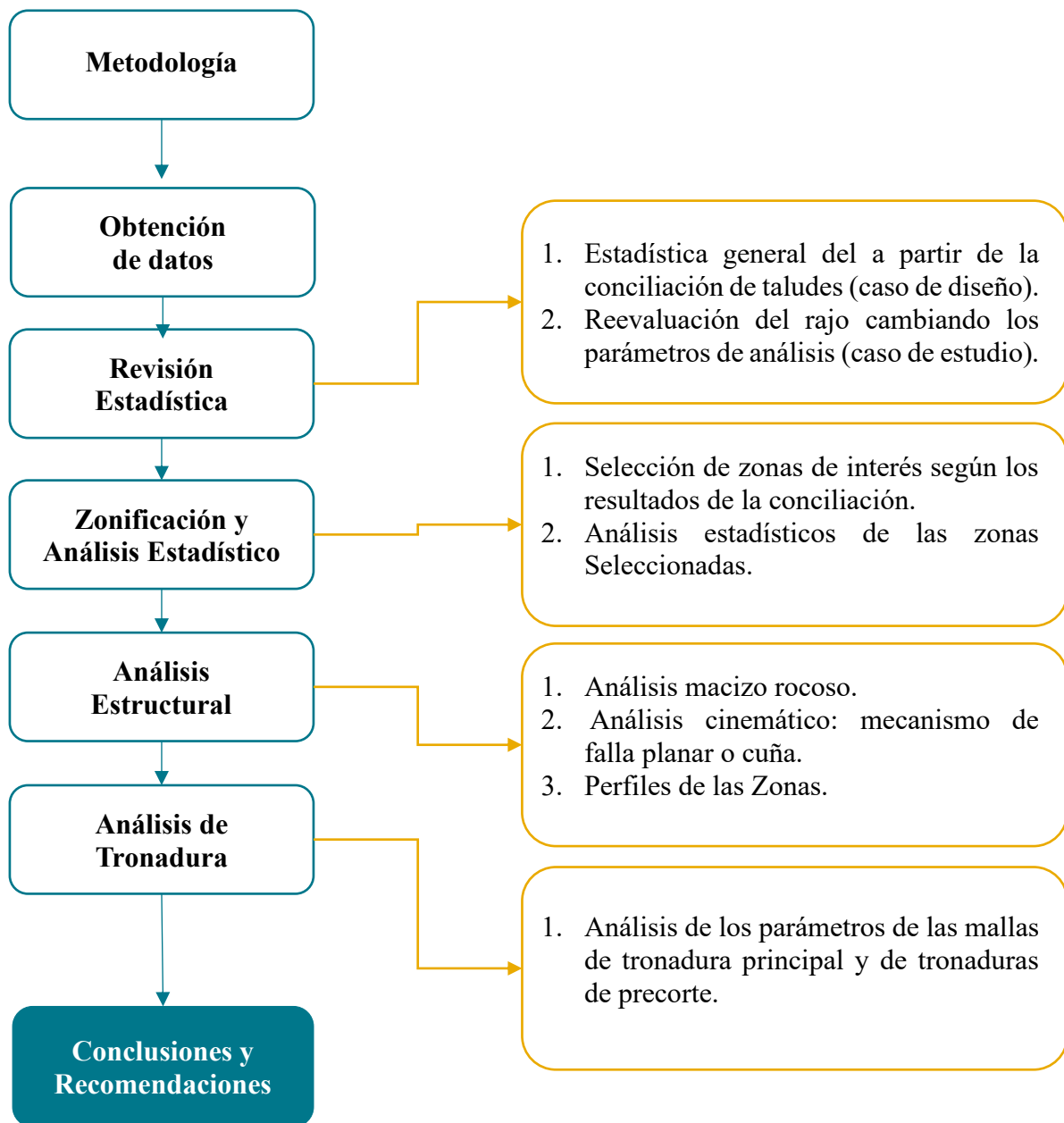


Ilustración 8: Metodología empleada para la realización de la memoria.

3.1. Recopilación de información

La recopilación de información del rajo ESS se puede delimitar en tres áreas de trabajo. La primera corresponde a la base de datos proporcionada por Minera Centinela sobre la conciliación de taludes y entrega diversos parámetros como el ancho de berma (AB), el ángulo cara de banco (ACB), la línea de programa (LP), el ángulo interrampa (IRA), entre otros. Este trabajo de memoria se centra en analizar el AB y el ACB, debido a su mayor influencia en el cálculo del factor de diseño (FD) con 60% y 30% respectivamente.

Las tolerancias de trabajo determinadas por Antofagasta Minerals están diseñadas para satisfacer el apetito de riesgo geotécnico de la compañía y están definidas para cumplir con los objetivos del factor de diseño y el ancho de berma. Para el FD, la tolerancia del banco conciliado establece como mínimo aceptable un **70%** de cumplimiento, mientras que para el ancho de berma este es de un **80%** con respecto al ancho de berma requerido.

La segunda área es aquella que se encarga de la información perteneciente a la visualización del rajo y las estructuras presentes en él. Con esto se pretende obtener capas de información que permitan establecer las principales estructuras o inestabilidades existentes, además de obtener conocimiento sobre los perfiles de análisis para los sectores seleccionados en el apartado posterior. Lo anterior busca determinar las pérdidas de berma y evaluar si los mecanismos de falla están incidiendo de manera importante en ellas.

La recopilación final de datos se realiza desde el área de tronadura. En este caso, el análisis considera la información proveniente del diseño del rajo Esperanza Sur. Este paso es fundamental debido a la no existencia de una base de datos actualizada para las tronaduras reales de terreno ni estudios de campo cercano o lejanos dentro de los análisis del rajo ESS que permitan dimensionar el daño acumulado del rajo.

3.2. Revisión estadística rajo ESS

La revisión estadística se realizó a partir de la información proveniente de la conciliación de taludes histórica correspondiente a la ventana de tiempo entre inicios de 2022 y mayo del 2023 y tiene por objetivo encontrar una tendencia en el comportamiento de AB y ACB. La configuración del diseño de banco se muestra en la Tabla 1. Se debe considerar que, producto de la definición del ancho de

berma de diseño (ver sección 2.3), el rajo presenta un ancho de berma requerido constante pues el ángulo cara de banco es constante para todo el rajo.

Tabla 1: Parámetros de diseño del banco en Rajo Esperanza Sur.

	Datos
Altura de banco diseño	16 [m]
Ángulo cara de banco diseño	80°
Ancho de berma requerido	7 [m]
Bermas de desacoples	25 [m]

El análisis estadístico se realizó en dos secciones: el *caso de diseño* que compara la información con respecto a los valores de diseño del rajo y un *caso de estudio* que considera la información y la estadística de los datos concretos. El caso de diseño se inició con la limpieza de la base de datos, debiéndose eliminar del análisis aquellos datos que están incompletos o que no tienen sentido como pueden ser, por ejemplo, números con valores negativos.

Luego se debe determinar el porcentaje de bancos construidos que corresponden a cada dominio estructural y a cada fase de avance, para después calcular el percentil 80 y establecer el valor predominante en el conjunto de datos. En este caso el percentil 80 de los datos considera el valor por el cual el 80% de los datos está sobre dicho valor. Así, se calcula el porcentaje de cumplimiento diferenciado por dominios estructurales (DOM) del AB y el ACB en el terreno según la Ecuación 1 y Ecuación 2, respectivamente.

$$\% \text{ Cumplimiento AB} = \frac{N^{\circ} AB \geq ABR}{\text{Total de datos}} \quad (1)$$

$$\% \text{ Cumplimiento ACB} = \frac{N^{\circ} ACB \geq 80^{\circ} (\pm 3^{\circ})}{\text{Total de datos}} \quad (2)$$

En el caso de estudio, la revisión estadística se basa en reevaluar los datos en sectores de bajo cumplimiento del ACB. Si bien AMSA no especifica un valor mínimo para este parámetro, este estudio considera un valor de 80% como margen inferior para un cumplimiento aceptable. De esta

manera, en aquellos sectores donde el ACB sea menor que el valor objetivo, se plantea reevaluar el cumplimiento del AB y ACB considerando el percentil 80 calculado en el caso real, es decir, se tendrá en cuenta este valor para obtener un nuevo ABR según la tabulación ODOT (Ver Anexo 7.1). Con este nuevo parámetro se calcular nuevamente el porcentaje de cumplimiento del ancho de berma para identificar el rendimiento del rajo con las nuevas condiciones de análisis.

3.3. Zonificación y análisis estadístico

La elección de las zonas de interés para este estudio se realiza mediante la observación de la composición del rajo utilizando el software de visualización Vulcan, que permite comprender la distribución del rajo Esperanza Sur. En este caso se consideran las líneas de la conciliación de taludes (Ver Ilustración 9) que muestran el cumplimiento del ancho de berma real, siendo de color rojo las zonas de no cumplimiento y de color verde aquellas con cumplimiento.

La selección de las zonas relevantes toma en cuenta la estadística general junto con su visualización. Para ello se establecen dos condiciones (a y b) y dos consideraciones (c y d) planteadas a continuación:

- a. Las zonas de incumplimiento están centralizadas en uno de los dominios estructurales o en una de las fases con mayor construcción.
- b. La existencia de dos o más bancos continuos dentro de una orientación similar que tengan un cumplimiento del ancho de berma menor al ancho de berma requerido.
- c. Aquellas zonas donde no exista conciliación se consideran como una zona sensible y se asume que incumplen el ancho de berma.
- d. Serán zonas críticas aquellas que, ante un eventual riesgo geotécnico, interfieran en la operación.

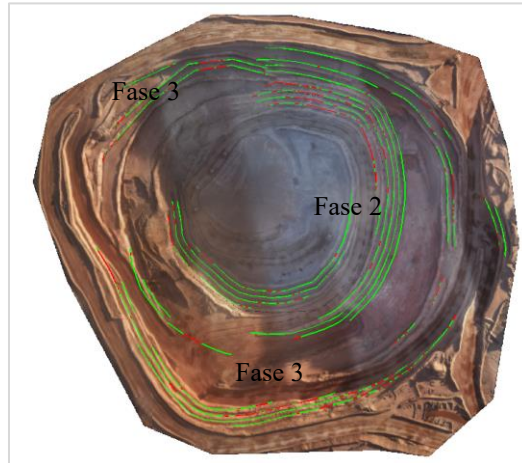


Ilustración 9: Conciliación de taludes rajo ESS. En verde las zonas de cumplimiento de ancho de berma y en rojo las zonas de incumplimiento de ancho de berma.

Una vez seleccionadas las zonas relevantes del rajo, se presentan como puntos sensibles desde la perspectiva geotécnica y se realiza nuevamente un análisis estadístico de la información de conciliación de taludes siguiendo el apartado 3.1, esta vez considerando solamente los datos que están inmersos en los sectores escogidos. De igual manera, los análisis que se presentan en los puntos posteriores de la metodología se aplican en aquellas zonas de interés dentro del rajo.

3.4. Análisis estructural y calidad del macizo rocoso

Para el desarrollo de este apartado se establecen dos análisis a realizar: uno cualitativo correspondiente al macizo rocoso y otro cuantitativo correspondiente al análisis estructural. Para la caracterización del macizo rocoso se considera la información proveniente del modelo de bloques de GSI entregado por Minera Centinela (ver Ilustración 10). A partir de él se determina la calidad del macizo rocoso en los sectores escogidos en el apartado 3.3 según se muestra en la gráfica de consideraciones del índice de GSI del Anexo 7.3.

Para el análisis estructural es necesario conocer las bases de diseño presentadas en la Ilustración 11, donde se aprecian los dominios estructurales que configuran el rajo. ESS tiene 5 dominios estructurales y cada uno de ellos está definido por las orientaciones preferentes de las principales familias de discontinuidades o set de joint (Ver punto 2.2.1), las que se pueden revisar en el Anexo 7.2.

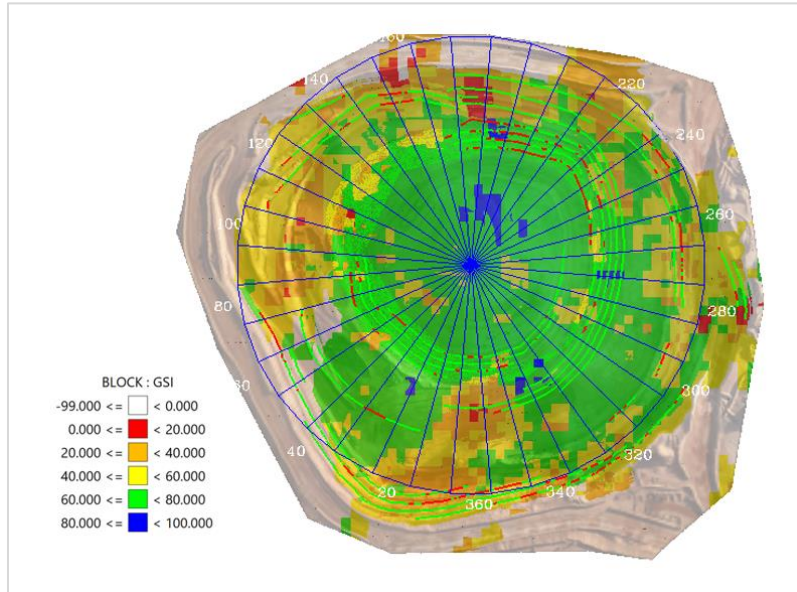


Ilustración 10: Rajo Esperanza Sur y modelo de bloques de GSI.

El análisis estructural de las zonas seleccionadas se realiza a través del software DIPS de Rocscience, utilizando información proveniente del mapeo de banco de inestabilidades realizado por Minera Centinela. Así, se identifican los principales mecanismos de fallas y se realizan los análisis cinemáticos para falla plana y falla cuña por ser estos de principal interés para este estudio.

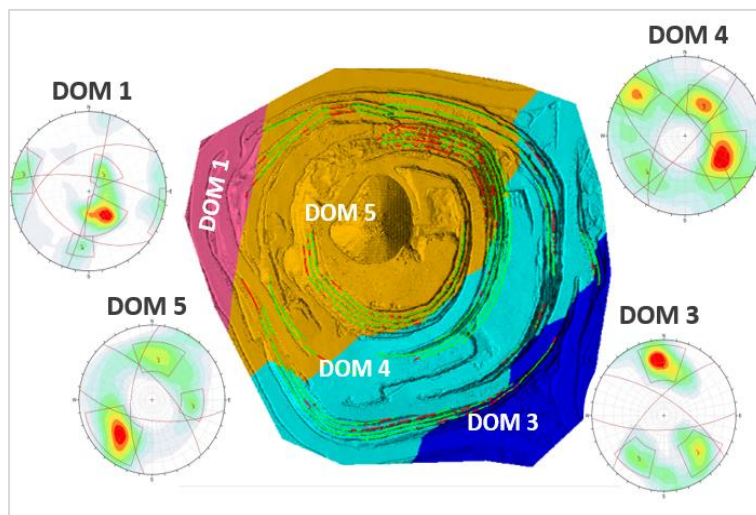


Ilustración 11: Dominios estructural rajo Esperanza sur y principales set de joint que definen cada dominio.

Al cargar las inestabilidades en la plataforma de DIPS se deben identificar concentraciones de polos y determinar orientaciones preferentes. Para ello se deben realizar “ventanas” que agrupan los polos de los set predominantes y determina un polo promedio para posteriores análisis cinemáticos. Para

el análisis cinemático de falla plana y falla cuña es necesario determinar tres parámetros del talud: Dip, Dip Direction y el ángulo de fricción. El Dip corresponde al valor del ángulo del talud, es decir, el ángulo cara de banco, el Dip Direction se establece como el punto medio de las orientaciones establecidas por los polígonos seleccionados en el punto 3.3. y el ángulo de fricción representativo del talud de ESS es de 30° según las bases de diseño de Minera Centinela.

Finalmente, para las zonas seleccionadas se identifican las pérdidas de bermas a través de los perfiles entregados por Minera Centinela, a través de Enaex. Con esto se busca analizar y cuantificar los descrestes de los bancos para encontrar una relación con los resultados obtenidos desde el análisis estructural e identificar las zonas y mecanismos de falla presentes en las zonas seleccionadas.

3.5. Análisis de tronadura

El análisis de las tronaduras se basa en la información obtenida de dos fuentes principales: la base de datos del diseño de las tronaduras principales y la información de las tronaduras de precorte, correspondientes a las mallas utilizadas en los polígonos seleccionados en el apartado 3.2. Para las mallas de diseño de tronadura principal, se analizarán los parámetros de factor de carga, tonelaje, tipo de secuencia, existencia y anticipación del precorte, y cumplimiento del ancho de berma.

Por otro lado, para las tronaduras de precorte, se evaluarán los parámetros de espaciamiento, tipo de explosivo, offset, diámetro de perforación, longitud de carga y factor de carga. Este análisis permitirá obtener una comprensión detallada de las características y efectividad de las tronaduras, facilitando la optimización de los diseños y la mejora en la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.

.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para obtener una correlación del incumplimiento de los anchos de berma en el rajo Esperanza Sur se realizó un análisis estadístico que comprende la información de los perfiles de banco de todo el rajo. Esto permitió, a su vez, realizar un análisis cuantitativo con el objetivo de encontrar factores estructurales y de tronadura que se presentasen como influencia en el incumplimiento del ancho de berma.

4.1. Revisión estadística rajo ESS

La distribución porcentual de los datos dentro del rajo se muestra en la Tabla 2. Es posible observar que los DOM 04 y DOM 05 presentan el mayor porcentaje de los datos, con un 42% y un 55% respectivamente. Esto se debe a que son los dominios estructurales con mayor construcción de bancos y ocupan la mayor parte del área del rajo. También se aprecia la distribución de estos mismos dominios entre las Fases 02 y 03. Así, se observa que la Fase 02 concentra un 42% de los datos del DOM 04 y un 79% de los datos del DOM 05. En contraste, la distribución de datos en el DOM 03 se encuentra el 100% de sus datos en Fase 03 representan sólo el 3% de la información total y resulta poco relevante para el análisis general de esta memoria.

Tabla 2: Distribución de datos en el rajo según dominio estructural.

	DOM 03	DOM 04	DOM 05
Número de Datos	72	936	1218
Peso del total Construido	3%	42%	55%
Datos Fase 02	0%	42%	79%
Datos Fase 03	100%	58%	21%

En la Tabla 3 se muestran el percentil y el porcentaje de cumplimiento de los parámetros de diseño de la mina. En el caso de los DOM 04 y DOM 05 se observa que el percentil del AB es de 7.2 [m] y 6.8 [m] respectivamente, valores cercanos al ancho de berma de diseño, mientras que para el DOM 03 el valor es de 4.4 [m]. Los porcentajes de cumplimiento del ancho de berma son de 83% y 79% para los dominios DOM 04 y DOM 05 respectivamente. Sin embargo, para el caso del DOM 03 el cumplimiento del ancho de berma es de apenas un 50%.

Tabla 3: análisis estadístico para el caso de diseño por dominio estructural del rajo ESS.

	DOM 03	DOM 04	DOM 05
Percentil 80 AB [m]	4.4	7.2	6.8
Percentil 80 ACB	66.2°	71°	74°
% de Cumplimiento AB	50%	83%	79%
% de Cumplimiento ACB	14%	30%	24%

Para el caso de estudio se considera reevaluar la estadística en aquellas situaciones donde el porcentaje de cumplimiento del ángulo cara de banco no supere el 80%. Según lo obtenido en la Tabla 3, los tres dominios estructurales están bajo este porcentaje, lo que significa redefinir el valor del ancho de berma requerido (ABR) (ver apartado 3.1) según el percentil 80 del ángulo cara de banco. Esto se puede apreciar en la Tabla 4, donde se muestran los nuevos valores del ABR para el DOM 03, DOM 04 y DOM 05 los cuales corresponden a 9,2 [m], 8,4 [m] y 8,0 [m] con porcentajes de cumplimiento de 28%, 68% y 68% respectivamente.

Tabla 4: Revisión estadística para el caso de estudio por dominio estructural del rajo ESS.

	DOM03	DOM04	DOM05
Ángulo cara de banco	66°	71°	74°
Ancho de berma requerido	9,2	8,4	8.0
% de Cumplimiento ABR	28%	68%	68%
% de Cumplimiento ACB	81%	81%	80%

En la Tabla 5 se observa el resumen comparativo entre el análisis estadístico, que contiene los resultados de los datos de diseño, y el caso de estudio. En ella se puede apreciar que la disminución en el ángulo cara de banco genera un aumento del ancho de berma requerido. Este aumento en el ABR establece un mínimo de cumplimiento mayor que el caso de diseño, lo que provoca que el cumplimiento de los parámetros de diseño, específicamente del ancho de berma, sea considerablemente menor al 80% requerido por el diseño mina.

Tabla 5: Resumen de la revisión estadística para el caso de diseño y de estudio.

	DOM03		DOM04		DOM05	
	Diseño	Estudio	Diseño	Estudio	Diseño	Estudio
Ángulo cara de banco	80°	66°	80°	71°	80°	74°
Ancho de berma requerido	7.0	9,2	7,0	8,4	7,0	8,0
% de Cumplimiento ABR	50%	28%	83%	68%	79%	68%
% de Cumplimiento ACB	14%	81%	30%	81%	24%	80%

4.2. Zonificación y análisis estadístico

Realizado el análisis estadístico del rajo ESS, se procede a identificar las zonas de riesgo geotécnico según las consideración y alcances del apartado 3.3. De esta forma, se seleccionaron dos sectores (Ver Ilustración 12). Ambos pertenecen al dominio estructural 05 y se consideran especialmente críticos debido a que representan un riesgo a la operación, ya que están ubicados sobre una rampa de acceso. En la Tabla 6 se puede ver la orientación, cota y cantidad de bancos conectados de los sectores seleccionados que se les denominarán polígonos.

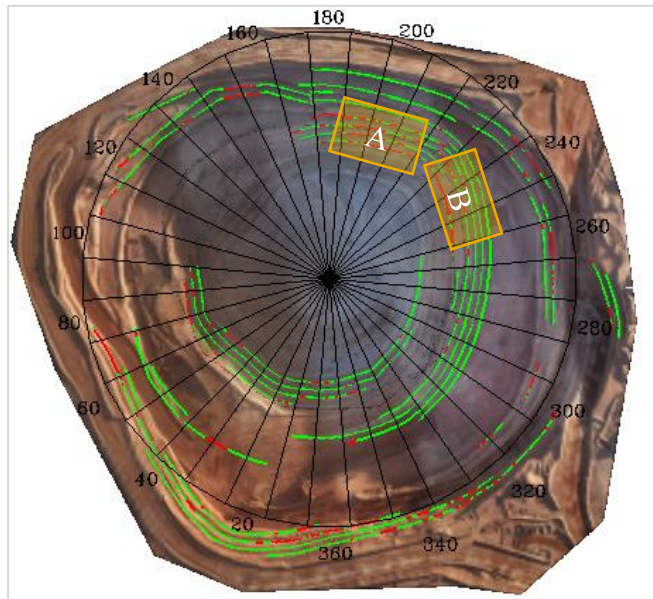


Ilustración 12: Zonificación de los polígonos seleccionados en Esperanza Sur.

Tabla 6: Ubicación de los polígonos seleccionados.

Polígono	Dip Dir	Cotas	Bancos
A	190 - 220	2216 – 2168	4 bancos
B	225 - 245	2216 – 2184	3 bancos

La distribución de datos respecto a los polígonos se muestra en la Tabla 7. El percentil 80 de los datos para el ancho de berma de los polígonos A y B resulta en 3,2 [m] y 5,1 [m] respectivamente, lo que es considerablemente menor que el valor de diseño de 7 [m]. De la misma forma, el percentil 80 del ángulo cara de banco para los polígonos A y B resulta en 64° y 74° versus los 80° del valor de diseño.

Los porcentajes de cumplimiento para el ancho de berma entrega los valores de 35% y 63% para los polígonos A y B respectivamente esto implica que ninguno de los dos polígonos cumple con el objetivo AMSA, mientras que el porcentaje de cumplimiento para el ángulo cara de banco para los polígonos es de 48% y 62% también menor al 80% objetivo determinado para esta memoria.

Tabla 7: Revisión Estadística para los polígonos A y B.

	Polígono	
	A	B
Datos	153	150
Percentil 80 AB [m]	3,2	5,1
Percentil 80 ACB	64°	74°
% Cumplimiento AB	35%	63%
% Cumplimiento ACB	48%	62%

El caso de estudio considera los dos polígonos para su reanálisis, debido a que sus porcentajes de cumplimientos no logran el mínimo objetivo de 80%. Los resultados de este reanálisis son plasmados en la Tabla 8, notándose que la disminución del ángulo cara de banco provoca el aumento del ancho de berma requerido, traduciéndose en la considerable disminución de los porcentajes de cumplimiento del ancho de berma.

Tabla 8: Revisión Estadística de los polígonos para el caso de estudio.

	Polígono	
	A	B
Ancho de berma requerido	9,5	8,0
Ángulo Cara de Banco	64	73
% Cumplimiento AB	16%	48%
% Cumplimiento ACB	80%	91%

El resumen de la revisión estadística para el caso de diseño y de estudio de los polígonos se observa en la tabla 9. El aumento del ancho de berma requerido provocado por la disminución del ángulo cara de banco genera, a su vez, disminuciones considerables para el porcentaje de cumplimiento del ancho de berma, aunque para el caso de diseño de ambos polígonos este porcentaje logra cumplir el 80% mínimo requerido.

Tabla 9: Resumen de la revisión estadística para el caso de diseño y de estudio de los polígonos.

	Polígono			
	A		B	
	Diseño	Estudio	Diseño	Estudio
Ancho de berma requerido	7	9,5	7	8,0
Ángulo Cara de Banco	80	64	80	73
% Cumplimiento AB	35%	16%	63%	48%
% Cumplimiento ACB	48%	80%	62%	91%

4.3. Análisis estructural

4.3.1. Macizo Rocosó

La calidad del macizo rocoso en Centinela se representa mediante un modelo de bloques que establece el comportamiento del parámetro GSI de la roca. En la Ilustración 13 se observa que las zonas correspondientes al polígono A y B están en sectores de GSI favorable (color verde) con un rango de valor que entorna los 60 a 80, lo que indica que el macizo rocoso tiene una calidad de

regular a muy buena y una condición de fractura que fluctúa entre las categorías “fracturada” y “muy fracturada”, según la tabla para el cálculo del GSI (ver Anexo 7.3).

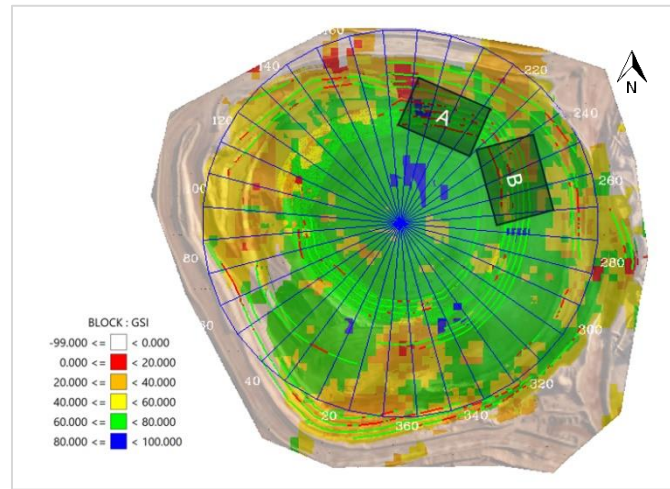


Ilustración 13: Caracterización del macizo rocoso mediante parámetro de GSI y delimitación de polígonos de análisis A y B.

4.3.2. Análisis Cinemático

Antes de realizar el análisis estructural es necesario reconocer el modelo estructural que rodea a los polígonos A y B, correspondiendo ambas zonas al dominio estructural 5. En este dominio estructural se reconoce la presencia de tres familias de discontinuidades, las que tienen orientación (Dip/Dip Dir) *JS1:70/048*, *JS2:65/187* y *JS3:60/275* según el análisis geotécnico de Centinela (Anexo 7.2).

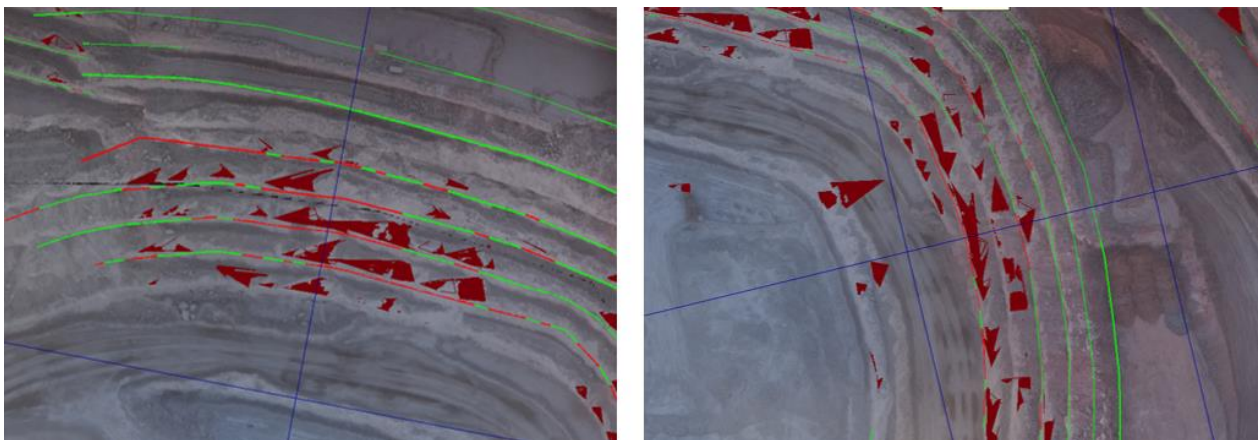


Ilustración 14: Inestabilidades cargadas de los polígonos A (izquierda) y B (derecha).

The figure displays four polar plots arranged in a 2x2 grid, each showing wind rose and density concentration data for a specific location. The plots are labeled 'Wind Rose' and 'Density Concentration'.

Top-Left Plot (Location 1):

- Wind Rose:** Shows wind direction and frequency. The dominant wind direction is from the North-Northwest (NNW).
- Density Concentration:** Shows the distribution of density concentration. The highest concentration is in the NNW quadrant.
- Color Scale:** Density Concentration ranges from 0.00 to 1.00.

Top-Right Plot (Location 2):

- Wind Rose:** Shows wind direction and frequency. The dominant wind direction is from the North-Northwest (NNW).
- Density Concentration:** Shows the distribution of density concentration. The highest concentration is in the NNW quadrant.
- Color Scale:** Density Concentration ranges from 0.00 to 1.00.

Bottom-Left Plot (Location 3):

- Wind Rose:** Shows wind direction and frequency. The dominant wind direction is from the North-Northwest (NNW).
- Density Concentration:** Shows the distribution of density concentration. The highest concentration is in the NNW quadrant.
- Color Scale:** Density Concentration ranges from 0.00 to 1.00.

Bottom-Right Plot (Location 4):

- Wind Rose:** Shows wind direction and frequency. The dominant wind direction is from the North-Northwest (NNW).
- Density Concentration:** Shows the distribution of density concentration. The highest concentration is in the NNW quadrant.
- Color Scale:** Density Concentration ranges from 0.00 to 1.00.

La Ilustración 16 muestra la definición de las agrupaciones de familias de discontinuidades presentes para el polígono A y B a través de la creación de las ventanas en torno a la concentración de polos. En el caso del polígono A se identifican cinco set de orientaciones, de las cuales la familia 1, 2 y 3 son las orientaciones principales y las familias 4 y 5 secundarias. En el caso del polígono B, se observa seis set de discontinuidades, de las cuales la familia 1 y 4 corresponden a las orientaciones principales y la familia 2, 3, 5 y 6 corresponden a las secundarias.

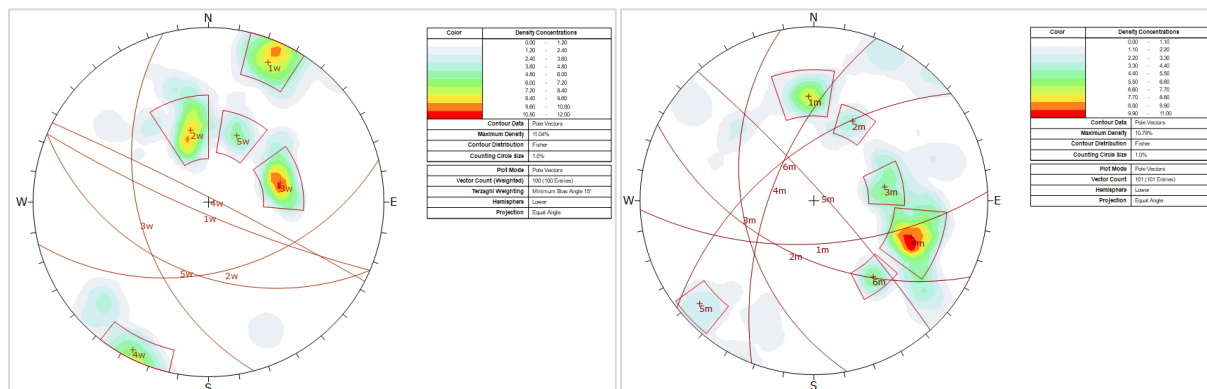


Ilustración 16: Concentración de polos y definición de ventanas polígono A (izquierda) y polígono B

La orientación de cada set definido para el polígono A se muestra en la Tabla 10. Se observa que ninguna de las inestabilidades del banco coincide con los set de discontinuidades presentes en el dominio estructural 5, es decir, las inestabilidades mapeadas para el polígono A corresponden a set estructurales nuevos. Esto puede generar un foco de interés adicional para el análisis por presentar nuevas posibilidades de fallamiento y, por tanto, nuevas necesidades de saneamiento y monitoreo para el banco en cuestión.

Tabla 10: Orientación de las inestabilidades polígono A.

Inestabilidad	Dip	Dip Dir
S1	82	203
S2	46	166
S3	46	255
S4	87	027
S5	45	203

Tabla 11: Orientación de las inestabilidades polígono B.

Inestabilidad	Dip	Dip Dir
S1	62	177
S2	54	206
S3	45	259
S4	62	291
S5	83	048
S6	58	322

En la Tabla 11 se observan las orientaciones (Dip/Dip Dir) de los sets de inestabilidades identificadas para el polígono B. En estas se observa que las inestabilidades identificadas como S1 y S5 se correlacionan con los set de discontinuidades JS2 (65/187) y JS2 (70/048) respectivamente del dominio estructural 5. Además, se observa que existen cuatro sets de inestabilidades (S2, S3, S4 y S6) que no coinciden con los set pertenecientes al dominio estructural 05. Sin embargo, se observa que el S5 y S3 del polígono A se asemeja al S5 y S3 respectivamente del polígono B, esto indica que podrían pertenecer a familias de discontinuidades que se repiten en los dos sectores de la pared.

Para realizar el análisis cinemático es necesario definir el Dip del talud, que corresponde al ángulo cara de banco por lo que su valor es de 80° . El Dip Direction está dado por la selección del polígono estudiado según el punto 4.2 y el cual corresponde al punto medio mostrado en la Tabla 6, es decir, los valores para el polígono A es de 205° y para el polígono B es de 235° . Finalmente, el ángulo de fricción es de 30° y está definido por Centinela.

que contienen la información de pérdida de bermas y el ancho de berma obtenido en terreno. De P2 a P14 corresponde al polígono A y de P17 a P27 al polígono B.

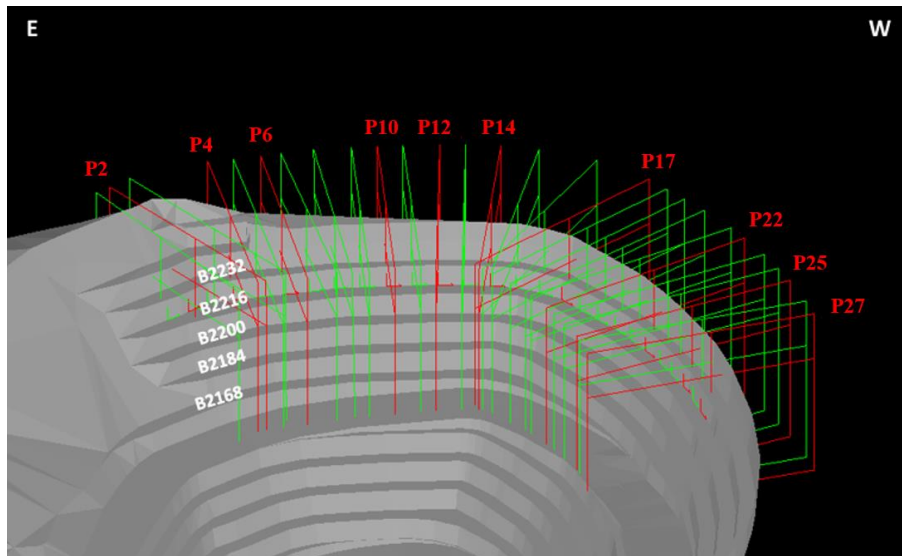


Ilustración 18: Perfiles en las zonas seleccionadas (Compañía Minera Centinela, 2024).

En la Ilustración 19 se observa los perfiles realizados al polígono A para el banco 2200, en ella se muestra el perfil de diseño y la topografía real del terreno. Los perfiles 6 y 10 muestran pérdidas de bermas considerables, observándose una discordancia mayor entre la berma de diseño y la topografía. Estos perfiles corresponden a planos generados por inestabilidades que no permitirían una correcta contención en caso de derrames o caídas de roca porque no presentan una berma en sí, sino más bien una continuidad topográfica con la pata del banco ubicado más arriba.

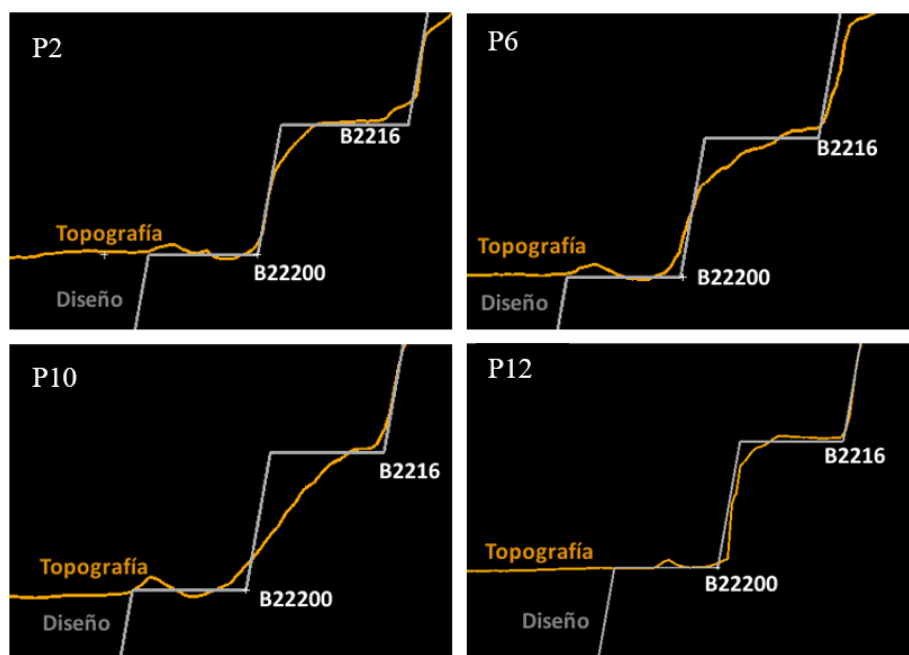


Ilustración 19: Perfiles polígono A banco 2200 (Compañía Minera Centinela, 2024).

En la Tabla 12 se muestran los resultados de las pérdidas de bermas (PB) y anchos de berma (AB) para los perfiles en los cuatro bancos analizados (Ver Anexo 7.4 y Anexo 7.5 para las fotos de perfiles de los otros bancos). Se observa que para el perfil 6 las pérdidas de bermas alcanzan los 8,5 metros, además, el incumplimiento de la berma para el mismo perfil está presente en los bancos 2200, 2184 y 2168 lo que genera una conexión de bancos. Por otro lado, el perfil 10 tiene incumplimiento en el banco 2200 y 2168 alcanzando perdidas de berma de 8.9 metros.

Tabla 12: Perdidas de bermas (PB) y anchos de berma (AB) según los perfiles para el polígono A.

	2216		2200		2184		2168	
Perfil	PB	AB	PB	AB	PB	AB	PB	AB
P2	5	8,2	4,2	8,4	3	8,2	4,5	6,5
P4	1,7	11,5	-	-	-	-	-	-
P6	5	8,2	8,5	4,2	8	3,2	4,6	6,4
P10	2,7	10,5	8,9	3,7	2,7	8,5	7,8	3,2
P12	1	12,2	3,3	9,3	-	-	-	-
P14	0	13,2	4,2	8,4	5	6,2	2,6	8,4

En la Ilustración 20 se contemplan los perfiles del polígono B para el banco 2200. En el perfil 22 se observa que las pérdidas dejan una berma sumamente reducida. De esta misma manera, el perfil 27 se observa que la pata de la topografía no alcanza al diseño lo que implica la inexistencia de un plano pseudo horizontal al cual denominar berma, es más, se observa una continuación de un plano de caída desde el banco superior. En ambos perfiles, se observa el incumplimiento de bermas posiblemente a la existencia de inestabilidades. lo que implica un foco de atención.

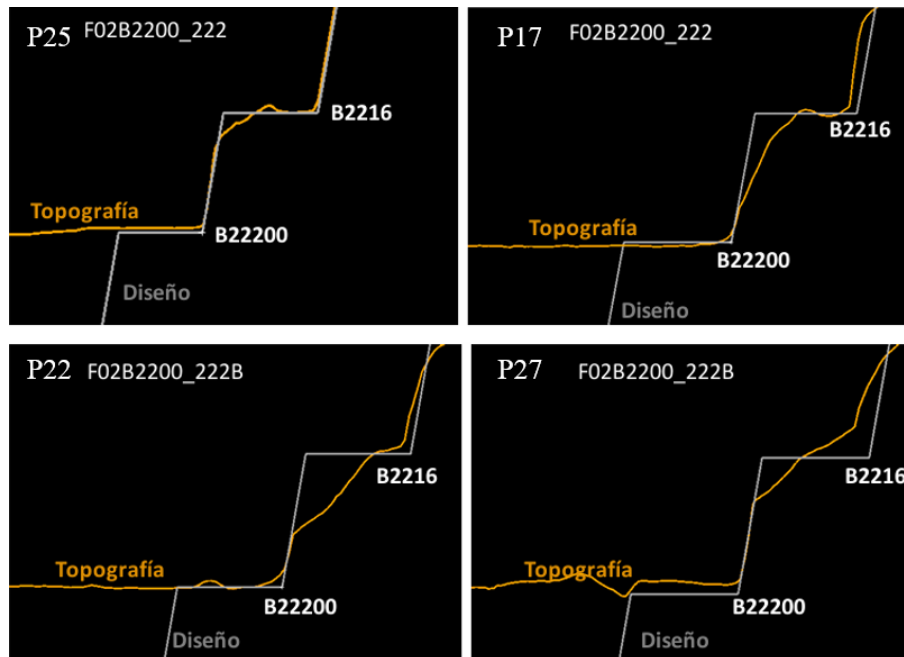


Ilustración 20: Perfiles polígono B banco 2200 (Compañía Minera Centinela, 2024).

En la Tabla 13 se observa las pérdidas de bermas y anchos de bermas para los perfiles del polígono B de tres bancos. Se observa que el perfil 22 en el banco 2200 no logra el ancho mínimo de berma. También se observa que el perfil 27 para el banco 2200 los datos arrojan una berma de 8,1 metros que no corresponde con una berma formada, sino más bien con las intersecciones de la topografía con la pared del banco 2216 y la berma de diseño del banco 22200, dificultando la contención del material que pueda caer por el talud del rajo. Esto se produce por el no cumplimiento de la pata del banco generando una falsa creación de banco y dificultando la detección temprana de zonas de riesgo para deslizamientos o caída de roca.

Tabla 13: Perdidas de bermas (PB) y anchos de berma (AB) según los perfiles para el polígono B.

	2216		2200		2184	
Perfil	PB	AB	PB	AB	PB	AB
17	2,5	10,7	5	7,6	1,2	10
22	1,1	12,1	8	4,6	0,95	10,25
25	1,64	11,6	4,2	8,4	2,7	8,5
27	2,3	10,9	4,5	8,1	2,2	9

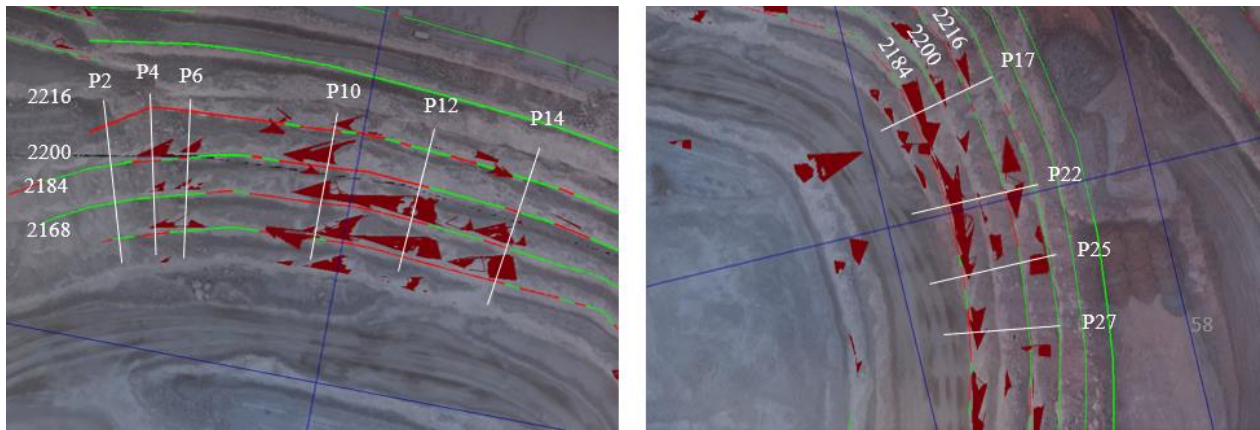


Ilustración 21: Inestabilidades descargadas y perfiles de los polígonos A (Izquierda) y B (derecha).

En la Ilustración 21 se observan las inestabilidades mapeadas que descargaron material en los bancos según los perfiles realizados por Enaex. Es posible ver que las inestabilidades en el perfil 12 forman principalmente mecanismos de falla en cuña, con los bancos 2184 y 2168 presentando inestabilidades paralelas. En el perfil 10 se observan principalmente mecanismos de falla plana en los bancos 2168, 2184 y 2200. De la misma manera, para el polígono B se observa que en el perfil 22 se forman principalmente mecanismos de falla plana.

4.4. Análisis de tronaduras

El análisis de tronadura analiza las mallas de tronadura que están ubicadas en las zonas correspondientes al polígono A y B, lo que se plasma en la Tabla 14 donde se observa la cantidad de mallas de tronadura por banco para ambos polígonos. En el polígono A se estudian 4 bancos, lo que se traduce a un total de 8 mallas de tronadura. Por otro lado, en el polígono B se enfoca en 3 bancos con un total de 5 mallas.

Tabla 14: Cantidad de mallas de tronadura por banco en polígono A y B.

Banco	A	B
2216	3	2
2200	1	2
2184	2	1
2168	2	-
Total	8	5

Dentro de los parámetros analizados en este apartado se consideran dos fuentes: una proveniente de la malla de tronadura y la otra correspondiente a la información de las tronaduras de precorte en la zona. En la Tabla 15 se observa la información de las mallas de tronadura para el polígono A y se indica si se ubica en un sector que cumple con el ancho de berma. Se observa que solo tres mallas pertenecen a sectores con cumplimiento geotécnico. Además, no se evidencia una relación directa entre los parámetros de diseño de la tronadura y el cumplimiento del ancho de berma.

Tabla 15: Información de las mallas de tronadura polígono A.

	Tonelaje total [Kton]	Factor de Carga [g/ton]	Tipo de Secuencia	Precorte	Anticipación Precorte [día]	Cumple
B2216 – M1	62	254	Fila a Fila	Si	1	Si
B2216 – M2	277	347	EN V	Si	4	No
B2216 – M3	268	261	S/I	Si	6	Si
B2200 – M4	445	339	EN V	No	N/A	No
B2184 – M5	17	298	Fila a Fila	Si	0	No
B2184 – M6	362	281	EN V	Si	0	Si
B2168 – M7	190	247	Fila a Fila	Si	3	No
B2168 – M8	180	200	EN V	Si	0	No

De la misma manera la Tabla 16 muestra las mallas de tronadura del polígono B. Se observa que dos mallas corresponden a zonas de cumplimiento y una malla se encuentra en un sector sin conciliación de taludes. Se observa que la M5 está en una zona de no cumplimiento, teniendo el

tonelaje total más alto; sin embargo, el factor de carga más alto está en una zona no conciliada. Por lo tanto, con la información recopilada, no se evidencia una relación directa entre los parámetros de diseño de la tronadura y el cumplimiento del ancho de berma.

Tabla 16: Información de las mallas de tronadura polígono B.

	Ton total [Kton]	Factor de Carga [g/ton]	Tipo de Secuencia	Precorte	Anticipación Precorte [día]	Cumple
B2216 – M1	341	267	En V	Si	1	No
B2216 – M2	480	235	En V	Si	2	Si
B2200 – M3	234	338	En V	Si	8	S/C
B2184 – M4	165	280	En V	Si	3	Si
B2184 – M5	639	304	Fila a Fila	Si	3	No

La información sobre los parámetros de las tronaduras de precorte para las mallas del polígono A se presenta en la Tabla 17. Se evidencia que, en el banco 2216, las mallas M1 y M3 cumplen con el ancho de berma, mientras que M2 no lo hace. A pesar de que M2 y M3 comparten parámetros idénticos, sus resultados difieren. Por otro lado, en el banco 2184, a pesar de tener los mismos parámetros de espaciamiento, offset y longitud de carga, se observan discrepancias en el cumplimiento. Finalmente, en el banco 2168, sus parámetros son idénticos y ninguna de las dos mallas cumple con el ancho de berma. Esto sugiere que no existe una tendencia clara entre los parámetros de tronadura proporcionados y el incumplimiento de la berma.

Tabla 17: Información de precorte para las tronaduras del polígono A.

	Espaciamiento [m]	Tipo Explosivo	Diámetro de perforación [in]	Longitud de carga [m]	FC [g/ton]	Offset [m]	Cumple
B2216 – M1	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12,5	0,34	2	Si
B2216 – M2	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,42	2	No
B2216 - M3	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,42	2	Si

B2200 – M4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	No
B2184 – M5	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,32	2	No
B2184 – M6	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,32	2	Si
B2168 – M7	1,2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,53	3	No
B2168 – M8	1,2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,53	3	No

Finalmente, en la Tabla 18 se presentan los parámetros de las tronaduras de precorte para el polígono A. Al igual que en otros precortes del polígono A, Se observa que tanto para el banco 2216 y 2184 existen malla de precorte con cumplimiento y sin cumplimiento de ancho de berma a pesar de tener parámetros similares. Esto sugiere que la tendencia del cumplimiento de la berma podría estar relacionada a otros factores no considerados en esta memoria.

Tabla 18: Información de precorte para las tronaduras del polígono B.

	Espaciamiento [m]	Tipo Explosivo	Diámetro de perforación [in]	Longitud de carga [m]	FC [g/ton]	Offset [m]	Cumple
B2216 - M1	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12,5	0,34	2	No
B2216 - M2	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12,5	0,34	2	Si
B2200 - M3	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,32	1,5	S/C
B2184 - M4	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	13,5	0,14	1,5	Si
B2184 - M5	2	Enaline_1 1/4" x 12 m	6 1/2	12	0,32	2	No

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo de investigación ha abordado de manera exhaustiva los objetivos planteados al inicio del estudio. A lo largo de los capítulos previos, se han analizado y discutido diversos aspectos relacionados con la influencia de los factores geotécnicos y de tronadura en el cumplimiento de los parámetros de ancho de berma y ángulo cara de banco. A continuación, se presenta una tabla resumen que detalla el cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos, facilitando una visión clara y concisa de los logros alcanzados. Las conclusiones derivadas de cada uno de ellos se detallan a continuación.

Tabla 19: Resumen del logro de los objetivos trabajados.

Objetivo	Estado	Descripción
General: Evaluar el impacto de los factores geotécnicos y de las tronaduras de contorno	Logrado	Se cumple la evaluación del impacto de los factores geotécnicos a través de la identificación de mecanismos de fallas plana y cuña en las zonas de interés que afectan el cumplimiento del ancho de berma. Por otro lado, para la evaluación de los factores de tronadura de contorno no se encuentra una tendencia en los parámetros analizados.
Específico: Identificar orientaciones de banco que forman mecanismos de falla	Logrado	A través de la identificación de los polígonos estudiados, se presentan mecanismos de fallas con una orientación promedio de Dip Direction de 205 y 235.
Específico: Analizar la relación entre el cumplimiento real del ancho de berma y ángulo cara de banco y el comportamiento de	Logrado	Los perfiles de realizado a los polígono indican la relación existente entre los parámetros de ancho de berma y ángulo cara de banco a través de la identificación de las pérdidas de bermas y el resultado del banco.

los mecanismos de fallas
presentes

Específico: Evaluar la	Logrado	Se analizan los parámetros de tronadura, sin
relación entre la de tronadura		embargo, no se aprecia una relación directa entre
de contorno y el cumplimiento		estos y el cumplimiento del ancho de berma.
del ancho de berma		

Específico: Confirmar la	Logrado	A través de la estadística real del rajo, se obtiene que
validez del parámetro de		el ángulo de cara de banco es menor que el valor de
ángulo cara de banco		diseño y, por tanto, su porcentaje de cumplimiento es
		bajo. Esto implica que el diseño propuesto no se
		logra y se hace necesario reevaluarlo.

A partir de la conciliación de taludes de Centinela, se obtiene que el rajo está construido en tres dominios estructurales, correspondientes a los dominios 03, 04 y 05. El porcentaje de cumplimiento en el caso del diseño para el dominio 03, en términos de ancho de berma (AB) y ángulo de cara de banco (ACB), es del 50% y 24% respectivamente. Ambos valores se encuentran por debajo del objetivo del 80% (para AB entregado por AMSA y para ACB determinado en esta memoria). Esto indica dos posibles causas: primero, que los valores propuestos para el diseño del rajo en el dominio estructural 03 no están sustentados, por lo que es necesario reevaluar el diseño en su totalidad; o segundo, que las prácticas operacionales están interfiriendo en el cumplimiento. Considerando que este dominio representa solo el 3% de la construcción total del rajo, no es estadísticamente significativo, pero es un foco de atención que podría traer problemas en fases posteriores.

El análisis estadístico para el caso de diseño realizado en los dominios 04 y 05 indica que el porcentaje de cumplimiento del AB cumple con el objetivo planteado por Antofagasta Minerals S.A. del 80%, con valores de 83% y 79%, respectivamente. Sin embargo, el porcentaje de cumplimiento del ACB muestra un bajo cumplimiento en los dos dominios estructurales, con un 14% y 30%, respectivamente. Estos valores no alcanzan el porcentaje aceptado propuesto por esta memoria del 80%. Debido a la estrecha relación del AB con el ACB, es posible que este bajo cumplimiento implique que las bermas obtenidas en terreno no sean suficientes para retener una

caída de roca, ya que se necesitan bermas más grandes a ángulos más pequeños (Tabulación ODOT), lo que implica un riesgo para la operación y la seguridad de las personas.

El caso de estudio para los tres dominios indica que las bermas mínimas necesarias para contener la caída de material o roca deben ser mayores, ya que el ángulo de cara de banco es menor. Los ángulos de cara de banco de los dominios estructurales 03, 04 y 05 alcanzan los 66° , 71° y 74° , respectivamente. De esta forma, los anchos de berma requeridos según los ángulos cara de banco obtenidos en terreno son de 9,2 m, 8,4 m y 8,0 m en los dominios estructurales 03, 04 y 05, respectivamente. Esto implica que el cumplimiento del ancho de berma, dada esta nueva situación, sea mucho menor en los tres dominios. Esto representa un foco de atención geotécnico, ya que la contención de las bermas en realidad es menor de lo que inicialmente indica la estadística de diseño.

Dado lo anterior se recomienda generar un plan de acción que permita cumplir con los ángulos caras de banco de los talud que puede considerar una reevaluación el diseño banco-berma planteado en las bases de diseño de Minera Centinela. Además de identificar con mayor precisión las zonas específicas de incumplimiento.

Por su parte, la estadística de diseño de las zonas seleccionadas en el apartado 4.2 indican que los polígonos A y B no cumplen con el porcentaje de cumplimiento de ancho de berma (35% y 63%) y de ángulo cara de banco (48% y 64%). De esta forma, al realizar la estadística de estudio se obtiene que el ángulo cara de banco es de 64° y 73° por tanto el ancho de berma requerido es de 9,5 [m] y 8,0 [m] para el polígono A y B respectivamente por sobre los 7 [m] del diseño. Esto indica que ambos polígonos son zonas de riesgo geotécnico, debido a que su principal función de contención de material está siendo reducida.

En cuanto a los resultado del análisis estructural de los polígonos A y B se tiene que no existe influencia del macizo rocoso en el incumplimiento de los anchos de bermas debido a que se encuentra en sectores de buen GSI. A su vez el análisis cinemático y el análisis de las pérdidas de bermas indican que los mecanismos de falla cuña están mermando el cumplimiento de las bermas para el polígono A existiendo una conexión de incumplimiento de ancho de berma de tres bancos. Por otro lado, en el polígono B existe presencia de fallas planas que afecta el cumplimiento de los anchos de bermas.

En el análisis de tronadura para el polígono A, se observa que la malla principal no muestra una tendencia clara entre los parámetros seleccionados y el ancho de berma. De manera similar, las tronaduras de precorte presentan resultados mixtos de cumplimiento incluso dentro del mismo banco de análisis. Esto sugiere que los parámetros analizados (espaciamiento, tipo de explosivo, diámetro de pozo, factor de carga, offset) no presentan una correlación directa con el cumplimiento del ancho de berma.

El análisis de tronadura para el polígono B arroja resultados similares: en la malla principal de tronaduras, no se identifica una tendencia que asocie el cumplimiento del ancho de berma con los parámetros de la tronadura. Asimismo, las tronaduras de precorte en este polígono también muestran resultados mixtos para un mismo banco a pesar de tener parámetros similares.

Estos hallazgos sugieren que, tanto en los polígonos A como B, existen factores adicionales que influyen en el cumplimiento de los anchos de berma, como la geología local o la orientación del talud. Esta última variable cobra importancia al considerar que el análisis estructural indica la presencia de varios conjuntos de discontinuidades en el rajo, lo que podría favorecer la pérdida de bermas a pesar de la implementación de tronaduras de precorte.

Se recomienda, por tanto, reevaluar el diseño de banco-berma para los polígonos A y B, considerando una reducción del ángulo cara de banco, tomando en cuenta la influencia del control estructural presente y su posible repetición aguas abajo. Esta disminución en los ángulos caras de banco debe ser complementada con una reducción en el ángulo interrampa para preservar la geometría y lograr bermas más amplias. Para ello, es crucial evaluar la viabilidad económica de la disminución del ángulo interrampa. Además, se sugiere llevar a cabo tronaduras controladas en estos sectores, junto con estudios de campo lejano y de campo cercano para evaluar el impacto energético de las tronaduras en la pared de los bancos construidos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz, G., Gallardo, M., Almarza, C., Fernandez, C., & Diaz, M. (2020). *Guía Corporativa: Definición Criterios de Diseño Banco—Berma*. Antofagasta Minerals S.A.
- Antofagasta Minerals S.A. (2023). *Antofagasta Minerals*. AMSA. <https://www.aminerals.cl/home>
- Caiceo, N. I. (2019). *Metodología para Evaluar el Riesgo de Caída de Rocas en Mina Rajo División Andina—CODELCO* [Tesis Pregrado]. Universidad de Santiago de Chile.
- Cerezzo, G., & Figueroa, L. (2022). *Criterios de Diseño Open Pit*. Antofagasta Minerals S.A.
- Chauca, M. L. (2021). *Mejora del Beneficio Económico Incrementando el Ángulo Interrampa y Aplicando Voladura Controlada de Rocas en una Mina a Tajo Abierto* [Tesis Pregrado]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Compañía Minera Centinela. (2024). *Antecedentes Geométricos—Estructurales Esperanza Sur Fase 02*.
- Decreto 132 Aprueba Reglamento de Seguridad Minera (2004). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=221064>
- GEOCONTROL. (2022). *Criterios de diseño Open Pit*. Antofagasta Minerals S.A.
- Gerencia de P&D. (2019). *Geología 2020*. Compañía Minera Centinela.
- Gerencia Mina. (2019). *Criterios de Aceptabilidad: Conciliación Geotécnica—AMSA*. Antofagasta Minerals S.A.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning & design* (3rd Edición, Vol. 1). CRC Press.
- InspiraCap. (2020). *Curso Introductorio a la Ingeniería de Voladuras I Capítulo II: Diseño de Mallas de Voladura y Cargas Explosivas en Minería Superficial. - Diseño de Voladura Controlada y Precorte*. Capacity.
- Macciotta, R., Creighton, A., & Martin, D. (2020). *Design Acceptance Criteria for Operating Open-Pit Slopes: An Update*. 19. <https://doi.org/10.1080/19236026.2020.1826830>
- Magri, J. R. (2014). *Efectos de la Incorporación de Tecnologías Autónomas en el Diseño y la Planificación Minera* [Tesis Pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131395>
- Medina Bustamante, J. A. (2021). *Evaluación Económica del Impacto de la Altura de Banco en el Diseño y Valor Económico del Pit Final* [Tesis Pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio UdeC. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/6520>

- Minería Chilena. (2014, abril 9). *Avance de la geotecnia en procesos mineros*. Minería Chilena. <https://www.mch.cl/reportajes/avance-de-la-geotecnia-en-procesos-mineros/>
- Minería Chilena. (2019). *Camiones Autónomos permitirán mayor productividad en Rajo Esperanza Sur de Centinela* (18). 39(459). https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2019/09/MCH-459-Sept_digital.pdf
- Morales, J. I. (2020). *Aumento de Vida Útil de los Neumáticos para la Flota de Transporte de Minera Centinela* [Tesis Pregrado]. Universidad de Chile.
- Mucuta Lito, H. V., Cartaya Pires, M., & Watson Quesada, R. L. (2020). Evaluación de estabilidad en taludes del yacimiento Castellano mediante el cálculo del factor de seguridad. *Minería y Geología*, 36(4), 441-450.
- Muhr, R., & Perelló, J. (2009, noviembre 22). *Exploración y Descubrimiento en el Distrito Centinela: Historia y Lecciones*. [Presentación en congreso]. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago. https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/12993_v4_S11_033.pdf
- Pierson, L., Gullixson, F., & Chassie, R. (2001). *Rockfall Catchment Area Design Guide* (FHWA-OR-RD-02-04m; p. 92). Oregon Department of Transportation.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design* (1er edición). CRC Press.
- Retamal, R. (2019). *Geología de Sub-Superficie del Llano de Caracoles y Yacimiento Encuentro, Distrito Minero Centinela, Región de Antofagasta, Chile* [Tesis Pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio UdeC. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/667>
- Sanhueza, M. A. (2017). *Metodología de Análisis a Escala Banco Berma para la Determinación de Parámetros de Diseño aplicado a Mina La Alumbra Provincia de Catamarca, Argentina* [Tesis Pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio UdeC. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3148>
- Scherpenisse, C. (2020, mayo 8). *Conciliación Geotécnica y Software G-Conciliation*. [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=uSIXk3Txwg0&ab_channel=GeoblastS.A
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos, Tomo I: Análisis Geotécnico* (Vol. 1). Universidad Industrial de Santander UIS.
- Superintendencia de Geotecnia. (2023). *Presentación Geotecnia DMC*. Compañía Minera Centinela.

Tecnología Minera. (2023, octubre). *Desafíos de la automatización en la explotación minera*.

Tecnología Minera. <https://tecnologiaminera.com/noticia/desafios-de-la-automatizacion-en-la-explotacion-minera-1697550238>

WPUSER. (2023, mayo 9). *La esperanza del primero*. MV COMUNICACIONES.

<https://www.mvcomunicaciones.cl/2023/05/09/la-esperanza-del-primero/>

7. ANEXOS

7.1. Tabulación ODOT

Tabla 20: Tabulación ODOT: Anchos de berma requeridos según la altura del banco, ángulo cara de banco y su porcentaje de retención.

Ángulo cara de banco diseño	Porcentaje de retención	H = 15m	H = 16m	H = 30m
80°	80%	6.2	7.0	11.9
75°	80%	6.9	7.9	14.3
70°	80%	7.9	8.6	12.8
65°	80%	9.0	9.3	11.3
80°	75%	5.7	6.4	10.6
75°	75%	6.4	7.3	12.6
70°	75%	7.4	8.0	11.4
65°	75%	8.5	8.7	10.1
80°	85%	6.9	7.8	12.9
75°	85%	7.7	8.8	15.6
70°	85%	8.8	9.5	14.1
65°	85%	9.9	10.2	12.5

7.2. Orientación dominios estructurales

Tabla 21: Dip/Dip Dir de los Set de Joint de los dominios estructurales presentes en Esperanza Sur.

Dominio	Tipo	Id	Dip	DipDir
1	joint	JS1	37	326
		JS2	84	265
		JS3	83	098
3	joint	JS1	71	168
		JS2	63	196

		JS3	45	311
		JS4	77	320
		JS5	81	354
		JS6	70	038
4	joint	JS1	55	298
		JS2	50	210
		JS3	75	132
		JS4	60	050
5	joint	JS1	60	054
		JS2	52	217
		JS3	53	290

7.3. Índice de GSI

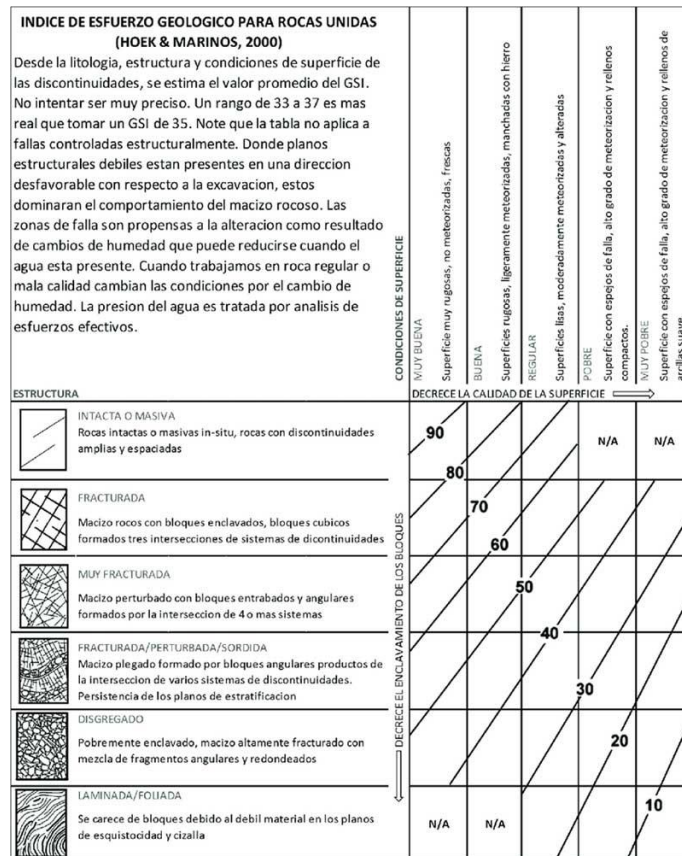


Ilustración 22: Caracterización GSI para Macizo Rocoso.

7.4. Perfiles polígono A

7.4.1. Banco 2168

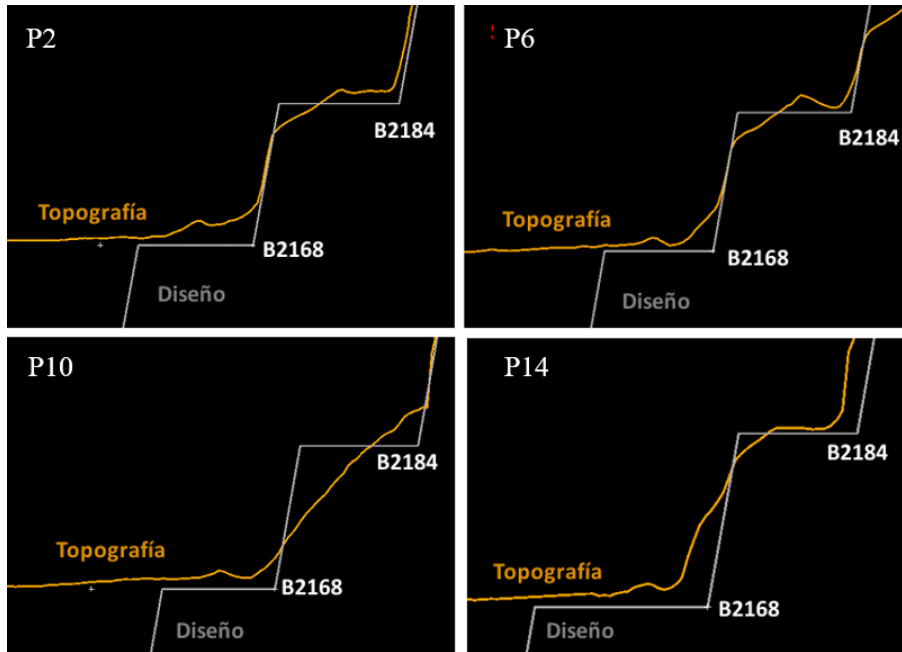


Ilustración 23: Perfiles Banco 2168

7.4.2. Banco 2186

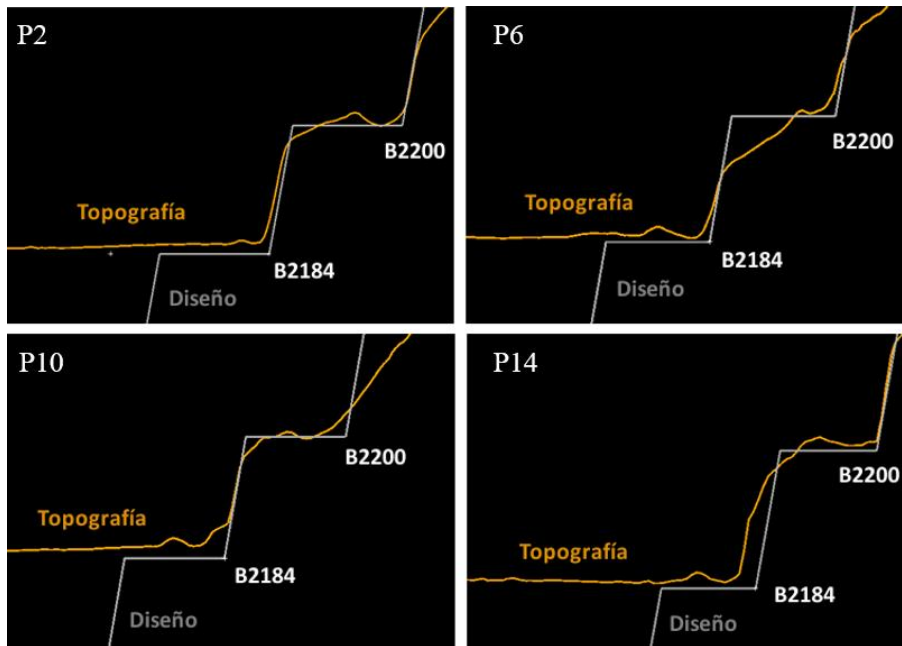


Ilustración 24: Perfiles Banco 2186

7.4.3. Banco 2216

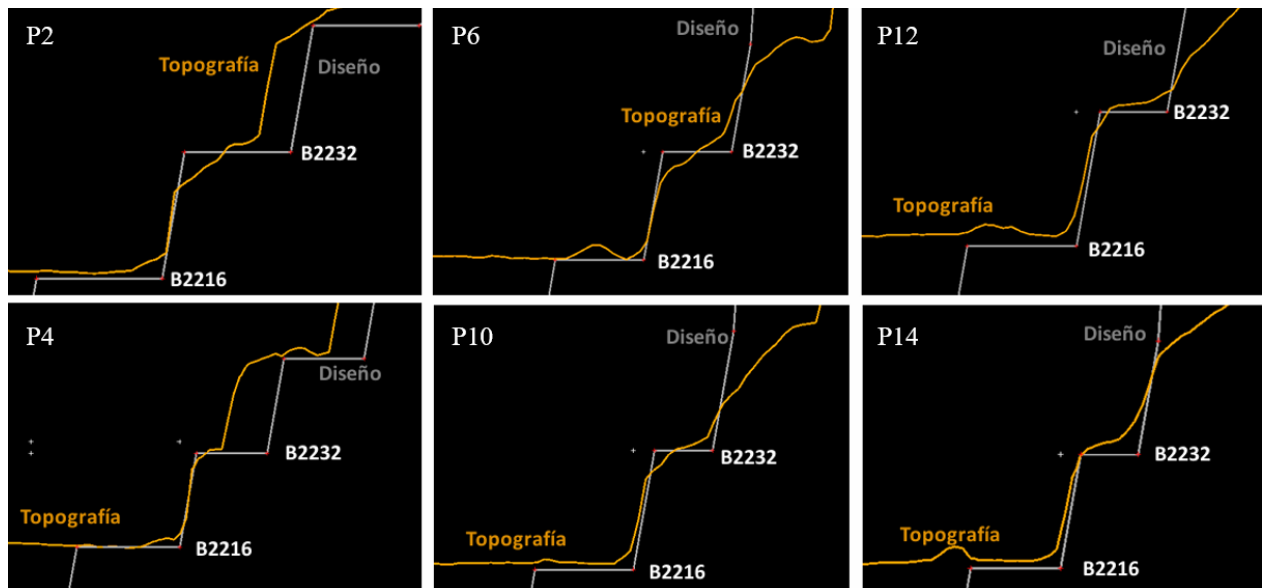


Ilustración 25: Perfiles Banco 2216.

7.5. Perfiles polígono B

7.5.1. Banco 2184

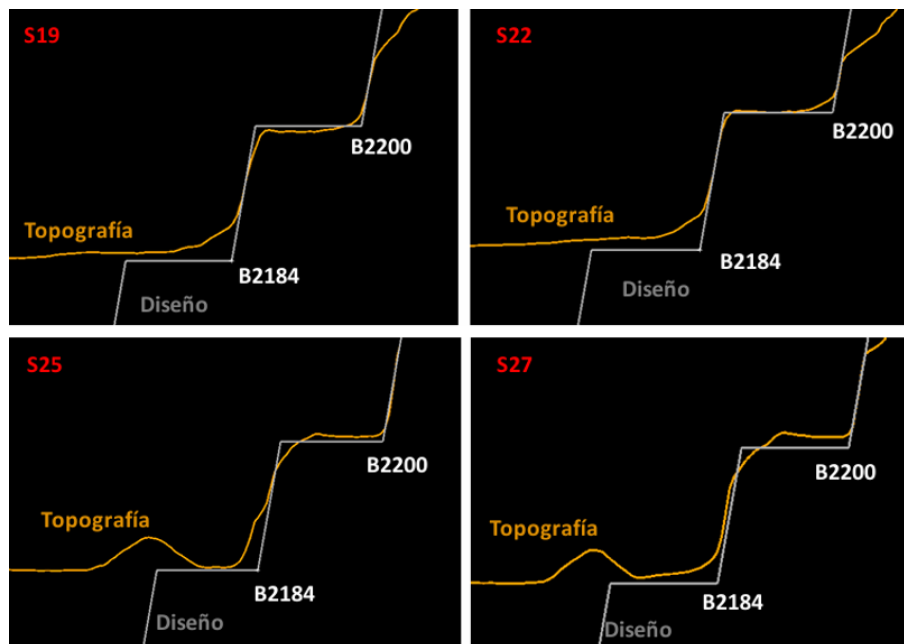


Ilustración 26: Banco 2184 polígono B.

7.5.2. Banco 2216

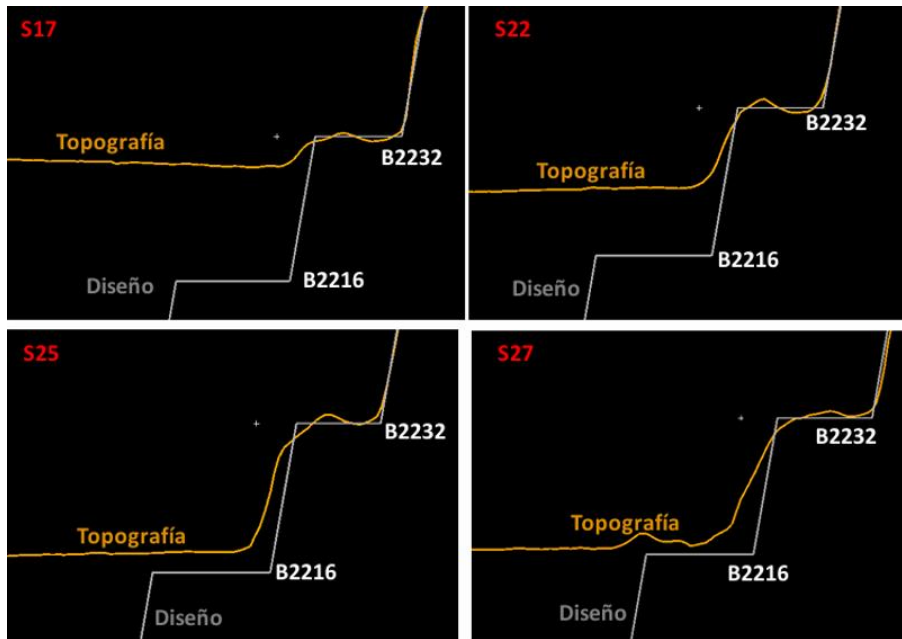


Ilustración 27: Banco 2184 polígono B.