

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Aplicación de bancos verticales mediante modelos DFN en la
optimización de una mina a tajo abierto en el sur del Perú**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Juan Diego Tarazona Alfaro

 [0009-0006-7991-0120](https://orcid.org/0009-0006-7991-0120)

Asesor

MSc. José Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Tarazona Alfaro [1]
Referencia/Reference	[1] J. Tarazona Alfaro, “ <i>Aplicación de bancos verticales mediante modelos DFN en la optimización de una mina a tajo abierto en el sur del Perú</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Tarazona, 2025)
Referencia/Reference	Tarazona, J. (2025). <i>Aplicación de bancos verticales mediante modelos DFN en la optimización de una mina a tajo abierto en el sur del Perú</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico con mucho amor y cariño a mi amada esposa Paola Alegría, quien me acompaña en cada paso y me alienta a seguir adelante, a mi madre Marisol Alfaro, quien con su preocupación y experiencia hizo de mí una persona de bien y un profesional de éxito, a mi padre Juan Tarazona por creer siempre en mí y enseñarme con el ejemplo que el esfuerzo siempre rendirá frutos.

A mi hermano Piero Tarazona por significar el motivo principal de volverme un ejemplo y hacer las cosas bien.

Finalmente, le dedico este logro a mis abuelos Efraín y Yolanda quienes Dios me da la dicha de tener en vida para disfrutar mis logros y poder dedicárselo.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, mi esposa y a mi familia por ser la principal inspiración en la culminación de mi Tesis.

Agradecimiento especial a la UM Constancia, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y crecer en el sector minero en base a mi experiencia y logros.

A Adán Urquiza, quien con sus consejos y experiencia guiaron mi camino profesional, siendo un líder para mí y un gran amigo, quien contribuye a mi desarrollo profesional, creyendo en mi potencial para desarrollarme como parte de su equipo, dándome la confianza de asumir retos y responsabilidades, los cuales hoy en día me motivan a seguir creciendo como profesional.

A mi querida alma mater la Universidad Nacional de Ingeniería, y especialmente a mis asesores de tesis, el Ing. José Antonio Corimanya y el Ing. Eder Salazar, quienes me han venido guiando y aconsejando con sus experimentadas observaciones a lo largo de esta investigación.

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo principal evaluar la aplicación de los bancos verticales mediante los modelos de redes de fracturas discretas (DFN, Discrete Fracture Network) para contribuir a la optimización geotécnica aumentando el ángulo interrampa y logrando una optimización operativa del Tajo Pampacancha. El estudio se fundamenta en la necesidad de mejorar la estabilidad de taludes y maximizar la eficiencia del diseño minero, considerando la geometría del tajo, las condiciones estructurales del macizo rocoso y los parámetros geotécnicos que influyen en su comportamiento.

La metodología empleada corresponde a un enfoque cuantitativo, de nivel explicativo y aplicado, basado en la obtención, procesamiento y modelación numérica de datos geotécnicos. Se desarrolló un modelo DFN bidimensional a partir del mapeo estructural y los resultados de ensayos de laboratorio y campo, integrando información sobre orientación, espaciamiento, persistencia y densidad de fracturas. Con el uso del software de RocScience RS2, se logró simular múltiples escenarios considerando ángulos cara de banco más agresivos hasta los bancos verticales (90°), en los cuales se evaluó el comportamiento, factor de seguridad, deformaciones y mecanismos de falla.

Los resultados obtenidos nos muestran que aplicar estos bancos verticales en un sector del Tajo Pampacancha permiten optimizar las reservas, generando una mayor recuperación de mineral con leyes favorables para la operación, a su vez permite continuar con la profundización del tajo manteniendo las condiciones de estabilidad.

Asimismo, se comprobó que el uso de modelos DFN proporciona una representación más realista del comportamiento del macizo fracturado.

En conclusión, la implementación de bancos verticales basada en los modelos DFN constituye una estrategia viable para la optimización integral del tajo, contribuyendo a un equilibrio entre seguridad, economía y eficiencia operativa en la minería moderna.

Palabras clave — Tajo abierto, modelo DFN, análisis de estabilidad, criterios estructurales, mecanismos de falla.

Abstract

The main objective of this thesis is to evaluate the application of vertical banks using discrete fracture network (DFN) models to contribute to geotechnical optimization by increasing the inter-ramp angle and achieving operational optimization of the Pampacancha pit. The study is based on the need to improve slope stability and maximize mining design efficiency, considering the geometry of the pit, the structural conditions of the rock mass, and the geotechnical parameters that influence its behavior.

The methodology used corresponds to a quantitative, explanatory, and applied approach based on the collection, processing, and numerical modeling of geotechnical data. A two-dimensional DFN model was developed from structural mapping and the results of laboratory and field tests, integrating information on fracture orientation, spacing, persistence, and density. Using RocScience RS2 software, multiple scenarios were simulated, considering more aggressive bench face angles up to vertical benches (90°), in which behavior, safety factor, deformations, and failure mechanisms were evaluated.

The results obtained show that applying these vertical benches in a sector of the Pampacancha pit allows for the optimization of reserves, generating greater ore recovery with favorable grades for the operation, while also allowing for the continuation of pit deepening while maintaining stability conditions.

Likewise, it was verified that the use of DFN models provides a more realistic representation of the behavior of the fractured massif.

In conclusion, the implementation of vertical benches based on DFN models is a viable strategy for the comprehensive optimization of the pit, contributing to a balance between safety, economy, and operational efficiency in modern mining.

Keywords — Open pit, DFN model, stability analysis, structural criteria, failure mechanisms.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de Investigación	1
1.2.1 Formulación del problema	2
1.3 Objetivos del estudio	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis general	3
1.4.2 Hipótesis específicas.....	3
1.5 Antecedentes referenciales	3
1.5.1 Antecedentes Internacionales	3
1.5.2 Antecedentes nacionales	4
1.5.3 Antecedentes UNI	5
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	7
2.1 Marco teórico	7
2.1.1 Minería a cielo abierto	7
2.1.2 Modelos DFN	8
2.1.3 Bancos verticales	9
2.1.4 Análisis estructural	10
2.1.5 Análisis cinemático.....	11
2.1.6 Estabilidad física escala de bancos.....	12
2.1.7 Análisis de estabilidad a escala interrampa.....	13

2.1.8	Análisis de estabilidad física tensodeformacional.....	15
2.1.9	Altura de banco.....	16
2.1.10	Factor de seguridad.....	16
2.1.11	Resistencia al corte.....	17
2.1.12	Angulo de talud.....	17
2.1.13	Estabilidad de un talud.....	18
2.2	Marco conceptual.....	19
2.2.1	Optimización.....	19
2.2.2	Fallas.....	19
2.2.3	Mapeo.....	19
2.2.4	Estereogramas.....	20
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....		21
3.1	Recolección de datos.....	21
3.1.1	Tipo de investigación.....	21
3.1.2	Diseño de la Investigación.....	22
3.1.3	Población y muestra.....	22
3.1.4	Técnicas de recolección de información.....	23
3.1.5	Instrumentos de recolección de información.....	23
3.1.6	Técnicas de análisis e interpretación de datos.....	23
3.2	Procesamiento de la Información.....	23
3.2.1	Ubicación.....	23
3.2.2	Acceso.....	24
3.2.3	Aspecto geológico.....	25
3.2.4	Geología estructural.....	29
3.2.5	Modelo geológico.....	33
3.2.6	Nivel de agua subterránea.....	34
3.3	Operaciones unidad minera Constancia.....	34
3.3.1	Perforación.....	35

3.3.2	Malla de perforación y parámetros	35
3.3.3	Voladura.....	36
3.3.4	Carguío	37
3.3.5	Acarreo	38
3.3.6	Equipos auxiliares	38
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	40
4.1	Litología tajo Pampacancha	40
4.2	Alteraciones tajo Pampacancha	40
4.3	Fallas principales tajo Pampacancha	41
4.4	Fallas a escala local tajo Pampacancha.....	42
4.5	Registros geotécnicos	43
4.6	Mapeos geotécnicos	43
4.7	Análisis estructural	44
4.8	Análisis cinemático.....	46
4.9	Análisis de estabilidad.....	50
4.9.1	Análisis de estabilidad escala banco	50
4.10	Análisis de estabilidad física tensodeformacional.....	55
4.11	Análisis de estabilidad física escala interrampa.....	55
4.12	Ejecución de los bancos proyectados analizados.....	56
4.13	Planos predictivos	57
4.14	Seguimiento y control de bancos pilotos	59
4.15	Monitoreo	59
4.16	Seguimiento de campo.....	60
4.17	Full control	61
4.18	Antes y después.....	62
4.19	Contrastación de la hipótesis	62
	Conclusiones	65
	Recomendaciones	67

Referencias bibliográficas	68
Anexos	72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de Consistencia.....	6
Tabla 2 : Acceso desde la ciudad de lima en avión.....	24
Tabla 3 : Resumen de orientación aproximada de las fallas mayores en el tajo Pampacancha.....	32
Tabla 4 : Dominios litológicos en el tajo Pampacancha.....	33
Tabla 5 : Parámetros de perforación.....	35
Tabla 6 : Parámetros de voladura.....	37
Tabla 7 : Propiedades de resistencia de las estructuras mayores.....	51
Tabla 8 : Propiedades de resistencia de las estructuras por litología.	51
Tabla 9 : Datos del antes y después de la aplicación de bancos verticales.....	62
Tabla 10: Datos RMR obtenidos de las estaciones de mapeo geotécnico.	63

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Minería a cielo abierto.....	7
Figura 2 : Modelo DFN (Discrete Fracture Network)	8
Figura 3 : Bancos verticales en un tajo	9
Figura 4 : Geometrías y cinemáticas de microfracturas.	10
Figura 5 : Tipos de fallamiento en taludes de roca.....	11
Figura 6 : Banco – berma	13
Figura 7 : Escala Interrampa.....	14
Figura 8 : Ubicación de Unidad Minera Constancia – Hudbay	24
Figura 9 : Plano geológico regional del área de Andahuaylas – Yauri.....	26
Figura 10: Plano geológico local	29
Figura 11: Geología regional del tajo Pampacancha.....	30
Figura 12: Fallas locales del tajo Pampacancha	31
Figura 13: Fallas locales del tajo Pampacancha	32
Figura 14: Unidades litológicas del tajo Pampacancha	33
Figura 15: Piezometría de agua subterránea en el tajo Pampacancha	34
Figura 16: Vista en planta de las litologías.....	40
Figura 17: Vista en planta de las alteraciones.....	41
Figura 18: Vista en planta de las fallas principales.....	42
Figura 19: Vista en planta de las fallas principales.....	43
Figura 20: Mapeo geotécnico.....	44
Figura 21: Mapeo geotécnico.....	44
Figura 22: Análisis de roseta de direcciones.....	45
Figura 23: Distribución estructural explícita en la sección de AZ 225° (anisotrópico)	46
Figura 24: Análisis cinemático de mecanismo de falla planar.	47
Figura 25: Análisis cinemático del mecanismo de falla por cuña.....	48
Figura 26: Análisis cinemático del mecanismo de falla por flexión.	49

Figura 27: Análisis cinemático del mecanismo de falla por volteo.	50
Figura 28: Análisis cinemático del mecanismo de falla por volteo.	51
Figura 29: Análisis de estabilidad física de la máxima cuña (FoS 1.9).	52
Figura 30: Análisis estadístico del factor de seguridad FoS > 1.6	52
Figura 31: Análisis de estabilidad de la máxima cuña en función de la altura del banco .	53
Figura 32: Análisis determinístico de la cuña máxima.	53
Figura 33: Análisis determinístico de la cuña máxima.	54
Figura 34: Proyección estructural del sector de bancos pilotos.	54
Figura 35: Análisis tensodeformacional a escala banco considerando múltiples escenarios .	55
Figura 36: Análisis de estabilidad física escala interampa (SRF 1.69).	56
Figura 37: Ejecución vs diseño de los bancos pilotos (IRA 57°).	57
Figura 38: Vista Isométrico de los bancos pilotos en el tajo Pampacancha.	58
Figura 39: Plano predictivo del NV 4155.	58
Figura 40: Plano predictivo del NV 4140.	59
Figura 41: Monitoreo geotécnico de los bancos pilotos.	60
Figura 42: Vista panorámica banco piloto nivel 4125.	60
Figura 43: Bancos pilotos ejecutados de BFA 75° y BFA 90°.	61
Figura 44: Full control de los bancos pilotos de 75° y 90°.	61

Introducción

En la presente tesis se explicará en detalle la propuesta, diseño, ejecución y control de los bancos pilotos en una mina de tajo abierto al sur del Perú; los cuales, se plantearon como pilotos para conocer el comportamiento del macizo rocoso con ángulos de 90° y 75° de BFA considerando IRA de 57° .

Adicional a ello, se debe considerar que, al lograr los objetivos planteados con respecto a la optimización del tajo, podremos tener más información del comportamiento del macizo rocoso considerando ángulos más agresivos que van desde los 75° hasta los 90° , permitiendo así la extracción de un mayor tonelaje en reservas durante la vida de la mina. Estas optimizaciones principalmente se centran en zonas con mayor concentración de leyes altas, así como sectores que estructuralmente reúnen las condiciones de estabilidad en base a las simulaciones.

Es importante considerar el equilibrio entre la rentabilidad, producción y seguridad, manteniendo los altos estándares de la empresa. Tener una buena rentabilidad por el incremento en la recuperación de mineral extraído es el escenario ideal, el cual debe soportarse en una operación segura con taludes estables, por lo cual la importancia de este análisis para la toma de decisiones futura de la mina.

En conclusión, esta tesis tiene como finalidad demostrar la aplicación del modelo DFN en la optimización del diseño de bancos verticales en una mina a tajo abierto al sur del Perú, integrando el análisis estructural, numérico y operativo en una metodología que equilibra la estabilidad del macizo con la maximización del rendimiento minero.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El presente estudio busca la optimización de una mina a tajo abierto en el sur del Perú mediante la aplicación de bancos verticales considerando los modelos DFN. La problemática principal de esta mina es que los ángulos de los taludes son conservadores y no permiten la mayor recuperación de mineral, restándole vida útil. Por ende, se recolecto toda la información a detalle en campo mediante el modelamiento geotécnico en base a los mapeos geotécnicos y a la información histórica. Con un modelo geotécnico robusto es posible tener modelos DFN que representen al macizo rocoso considerando sus características principales.

Estos modelos son de vital importancia para tener una representación realista del comportamiento del macizo rocoso, así como los mecanismos de falla mediante los análisis cinemáticos realizados. Con toda esta información es posible realizar un análisis de estabilidad física tensodeformacional considerando los modelos DFN, permitiéndonos una representación de la realidad y poder tomar decisiones en función a ángulos más agresivos (bancos verticales).

1.2 Descripción del problema de Investigación

En las minas a tajo abierto, se pueden presentar diferentes retos y desafíos técnicos, entre los principales se encuentra la optimización de los taludes, los cuales implican un desafío de alto nivel técnico y gran impacto económico en la rentabilidad del negocio. La mayoría de las minas presenta diseños conservadores y convencionales, con ángulos de talud que varían entre los 60° a 70°, dependiendo de las condiciones geológicas y estructurales. En muchos de estos diseños se generan pérdidas de mineral y mayor tonelaje de desmonte, debido a que se prioriza la seguridad. La seguridad no es negociable para ninguna empresa, sin embargo, el problema radica en no buscar un equilibrio entre eficiencia operativa y seguridad, lo que permitirá desarrollar soluciones técnicas de optimización.

Para la mayoría de las minas, el problema principal radica en la falta de información geotécnica a detalle, la cual permite realizar análisis a mayor profundidad y con mayor precisión en los resultados. La optimización de los taludes de las minas a tajo abierto son un reto técnico debido a que en la mayoría de los casos el proceso de minado es más rápido que los procesos de análisis y de optimización.

En el caso de esta mina a tajo abierto, el problema principal era la vida útil la cual se veía limitada a 1 año por el diseño conservador con ángulos de 60° a 65° de talud. Se solicitó a varias casas consultoras de ingeniería realizar estudios geotécnicos para la optimización de los ángulos, sin embargo, los resultados no eran alentadores para la empresa. Así mismo, los factores de seguridad resultantes de sus análisis eran cercanos a 1, demostrando un talud de alto riesgo en equilibrio límite.

La presente tesis trata de representar la realidad, considerando los modelos DFN en la aplicación de bancos verticales para la optimización de la mina a tajo abierto.

1.2.1 Formulación del problema

¿Cuáles son las causas y consecuencias de continuar el proceso de minado con un diseño conservador con ángulos entre 60° y 65° de talud?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Aplicación de bancos verticales mediante modelos DFN en la optimización de las reservas de una mina a tajo abierto en el sur del Perú – 2025.

1.3.2 Objetivos específicos

O.E.1:

Realizar el análisis estructural mediante modelos DFN para la representación del macizo rocoso, considerando sus características principales como orientación, espaciamiento y persistencia.

O.E.2:

Realizar el análisis cinemático para la evaluación de los mecanismos de falla que permitan tomar controles.

O.E.3:

Realizar el análisis de estabilidad física tensodeformacional a escala banco e interrampa mediante modelos DFN para la optimización de los ángulos IRA de una mina a tajo abierto – 2025.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La aplicación de bancos verticales mediante modelos DFN influirá en la optimización de las reservas de una mina a tajo abierto en el sur del Perú – 2025.

1.4.2 Hipótesis específicas

H.E.1:

El análisis estructural mediante modelos DFN representará el macizo rocoso, considerando sus características principales como orientación, espaciamiento y persistencia.

H.E.2:

El análisis cinemático mediante permitirá evaluar los mecanismos de falla para la toma de controles.

H.E.3:

El análisis de estabilidad física tensodeformacional a escala de banco e interrampa mediante modelos DFN impactará positivamente en la optimización de los ángulos IRA, el cual generará un incremento de las reservas a futuro de una mina a tajo abierto – 2025.

1.5 Antecedentes referenciales

1.5.1 Antecedentes Internacionales

Montiel, E., et al. (2022). En su artículo “Using DFN Logic in Open Pit Stability Analysis for calibration and predictive calculation including defined persistence discontinuities.”. Santiago, Chile. Explica las ventajas de realizar los análisis de estabilidad mediante métodos numéricos para evaluar los modos de falla relacionados al macizo rocoso y las discontinuidades.

De manera particular, explica que los modelos DFN permiten determinar con mayor precisión los mecanismos de falla, principalmente aquellos que se encuentran en zonas de influencia de fallas geológicas.

Schulz, K. (2019). En su tesis “Construcción de modelos de redes de fracturas discretas (DFN) a escala fase, para el análisis de estabilidad y geometrías de inestabilidades estructurales en el rajo Don Luis, Codelco División Andina, Región de Valparaíso, Chile.”. Viña del Mar, Chile. Propone construir un modelo DFN utilizando el software FracMan 7.7, a escala Fase de explotación minera, que represente las características de las discontinuidades mayores e intermedias, permitiendo tener un mayor conocimiento de la geometría interna del macizo rocoso y sus mecanismos de falla.

Valerio, et al. (2021). En su investigación “Improving bench desing through discrete fracture network analysis.”. Presenta un análisis comparativo entre métodos cinemáticos y un modelo basado en redes de fracturas discretas (DFN) para el diseño de los taludes de una mina a tajo abierto.

Explica dos casos de estudio en la mina Bingham Canyon Mine (EE. UU.), los cuales presentan mecanismos de falla planares y tipo cuña, y los que a su vez son caracterizados mediante modelos DFN.

SRK Consulting. (2006). En su artículo “Considerations in the Optimization of bench Face Angle and Berm Width Geometries for Open Pit Mines.”. Ontario, Canadá. Analiza el ángulo cara de banco y ancho de berma relacionado al mecanismo de falla tipo cuña, caída de rocas y volumen de material.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Catari, P., et al. (2025). En su tesis “Optimización del diseño de talud en minería superficial mediante el método de elementos finitos– 2025.”. Moquegua, Perú. Propone desarrollar un diseño final para el Talud Noroeste de la Mina Cuajone (Perú) utilizando el cálculo del Factor de Seguridad mediante métodos de elementos finitos, indicando que este método permite una evaluación más precisa y exacta de la estabilidad del talud.

En esta investigación caracterizan geológica y geotécnicamente al talud mediante los mapeos de campo, análisis de datos y ensayos de laboratorio. Adicionalmente se genera un modelo 3D mediante el software Phase2 para simular las condiciones actuales de los taludes, realizando análisis de estabilidad en diferentes escenarios de cargas y disturbancias.

Córdova, D. (1976). En su estudio “Estudio de estabilidad de taludes en minas a cielo abierto.”. Revisa los procedimientos y técnicas básicas para evaluar la estabilidad de taludes en minas a tajo abierto en el Perú, considerando la identificación y representación de discontinuidades, análisis de factores de seguridad y consideraciones geotécnicas del macizo rocoso.

Presenta un aporte significativo sobre la estabilidad de taludes y las metodologías existentes.

Gutiérrez, G. (2022). En su tesis “Propuesta de evaluación de estabilidad y optimización de parámetros de diseño geotécnico de taludes en tajo abierto.”. Arequipa, Perú. Desarrolla una metodología para optimizar los parámetros de diseño geotécnico de taludes en minas de tajo abierto en el Perú.

Presenta un planteamiento de la caracterización del macizo rocoso mediante la representación de dominios geotécnicos, análisis cinemático y de equilibrio límite para determinar ángulos cara de banco (BFA), ángulos interrampa (IRA) y talud global (OSA).

1.5.3 Antecedentes UNI

Roca, M. (2000). En su tesis “Análisis de estabilidad de taludes a través del método esfuerzo – deformación.”. Lima, Perú. Desarrolla una metodología basada en el comportamiento esfuerzo – deformación de un material para evaluar el grado de estabilidad de un talud, factor de seguridad del macizo rocoso.

Este método se basa en esfuerzos, desplazamientos y deformaciones proporcionados por el análisis numérico a través de elementos finitos. Se analizan diferentes tipos de taludes, identificando los modos de falla principales en cada problema de inestabilidad

Tabla 1

Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGIA
<p>Problema general</p> <p>¿Cuáles son las causas y consecuencias de continuar el proceso de minado con un diseño conservador con ángulos entre 60° y 65° de talud?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Aplicación de bancos verticales mediante modelos DFN en la optimización de las reservas de una mina a tajo abierto en el sur del Perú – 2025.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>La aplicación de bancos verticales mediante modelos DFN influirá en la optimización de las reservas de una mina a tajo abierto en el sur del Perú – 2025.</p>	<p>V.I.: Bancos verticales con modelo DFN. V.D.: Angulo de talud</p>		<p>Tipo: Cuantitativa Nivel: explicativo, Hernández, R. (2023) Diseño: Experimental de forma preexperimental, Arias (2006) Población: constituida por todos los bancos del tajo Pampacancha. Muestra: los bancos pilotos al N-E del tajo Pampacancha con ángulos de 90° y 75°). Técnicas: Análisis documental y Fichaje Instrumentos: Reportes e informes y fichas de investigación. Análisis e interpretación de datos: Depuración, clasificación, clasificación e interpretación en tablas y gráficos estadísticos.</p>
<p>Problemas específicos</p> <p>P.E.1: ¿De qué manera la inadecuada interpretación geotécnica puede incidir negativamente en los procesos de optimización de las reservas de una mina a tajo abierto?</p> <p>P.E.2: ¿De qué manera la falta de análisis de los mecanismos de falla puede impactar negativamente en la operación?</p> <p>P.E.3: ¿Cómo los análisis de estabilidad física sin considerar modelos DFN puede incidir negativamente en la interpretación de resultados para la optimización de las reservas de una mina a tajo abierto?</p>	<p>Objetivo específico</p> <p>O.E.1: Realizar el análisis estructural mediante modelos DFN para la representación del macizo rocoso, considerando sus características principales como orientación, espaciamiento y persistencia.</p> <p>O.E.2: Realizar el análisis cinemático para la evaluación de los mecanismos de falla que permitan tomar controles.</p> <p>O.E.3: Realizar el análisis de estabilidad física tensodeformacional a escala banco e interrampa mediante modelos DFN para la optimización de los ángulos IRA de una mina a tajo abierto – 2025</p>	<p>Hipótesis específicas</p> <p>H.E.1: El análisis estructural mediante modelos DFN representará el macizo rocoso, considerando sus características principales como orientación, espaciamiento y persistencia.</p> <p>H.E.2: El análisis cinemático mediante permitirá evaluar los mecanismos de falla para la toma de controles.</p> <p>H.E.3: El análisis de estabilidad física tensodeformacional a escala de banco e interrampa mediante modelos DFN impactará positivamente en la optimización de los ángulos IRA, el cual generará un incremento de las reservas a futuro de una mina a tajo abierto – 2025.</p>	<p>V.I.: Modelo DFN. V.D.: Representación del macizo rocoso</p> <p>V.I.: Mecanismos de falla V.D.: Controles</p> <p>V.I.: Bancos verticales con modelo DFN. V.D.: Angulo de talud</p>	<p>Lineamientos estructurales, mapeos geotécnicos, estereogramas, modo de fallas</p>	

Nota: Elaboración propia.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Minería a cielo abierto

También conocida como minería a cielo abierto, es un método de minería en el que se extraen minerales de un pozo abierto en el suelo. Es el método de extracción de minerales más utilizado en el mundo y no requiere minería ni túneles. Este método se utiliza cuando los depósitos minerales se encuentran relativamente cerca de la superficie de la tierra. Las minas a cielo abierto a veces se denominan “canteras” cuando producen materiales de construcción y piedras naturales. Así mismo sus ventajas de la minería a cielo abierto son de fácil manejo para producción en masa, bajos costos de cierre, posibilidad de extraer selectivamente ciertos tipos de minerales, no existen riesgos de seguridad que puedan acompañar a las obras de sin restricciones de máquinas, menores costos de inversión y operación. (Anglo American, 2025).

Figura 1

Minería a cielo abierto



Nota: (Rojas, 2021)

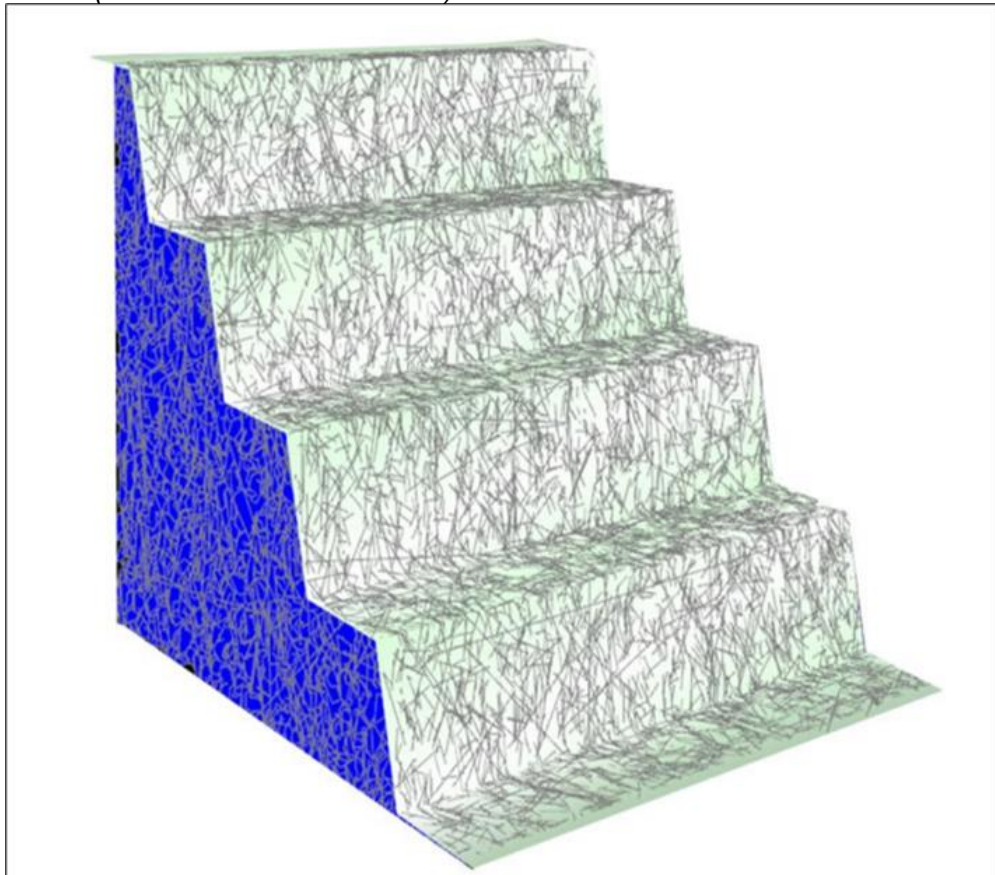
2.1.2 Modelos DFN

Un modelo DFN (red de fracturas discretas) es un modelo tridimensional que simula estocásticamente una población conectada de fracturas individuales. Un elemento clave de su desarrollo y del carácter estocástico de los modelos es la vinculación de los parámetros geométricos de las discontinuidades con distribuciones de probabilidad.

Los modelos DFN tienen una amplia gama de aplicaciones en diferentes industrias, desde su uso en hidrogeología para determinar la dirección del flujo de agua subterránea en un macizo rocoso, hasta su uso en plantas de energía nuclear para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas por residuos nucleares, así como en la industria petrolera y todas las áreas relacionadas con la integridad estructural del macizo rocoso y la ingeniería de rocas (Schulz, 2019).

Figura 2

Modelo DFN (Discrete Fracture Network)



Nota: (Schulz, 2019)

2.1.3 Bancos verticales

En la minería a cielo abierto, las labores se denominan niveles verticales de la mina. Estos suelen estar espaciados a intervalos dependiendo del tamaño de las máquinas utilizadas. Muchas canteras no utilizan contrafuertes porque tienden a ser poco profundos.

La mayoría de las paredes de los pozos suelen excavarse en un ángulo menos vertical para evitar y minimizar los daños y el riesgo de caída de rocas. Esto depende de la meteorización y del tipo de roca, así como del número de debilidades estructurales en la roca, tales como fallas, cizallas, diaclasas o foliaciones.

Las paredes están escalonadas. La parte inclinada del muro se llama masa, la parte plana del escalón se llama banco o berma. Los escalones en las paredes evitan que las piedras se escurran por toda la superficie de la misma. En algunos casos, se requiere soporte de tierra adicional y se utilizan anclajes de roca, anclajes de cable y hormigón proyectado. (libre text, s.f).

Figura 3

Bancos verticales en un tajo



Nota: Libre texto (s.f)

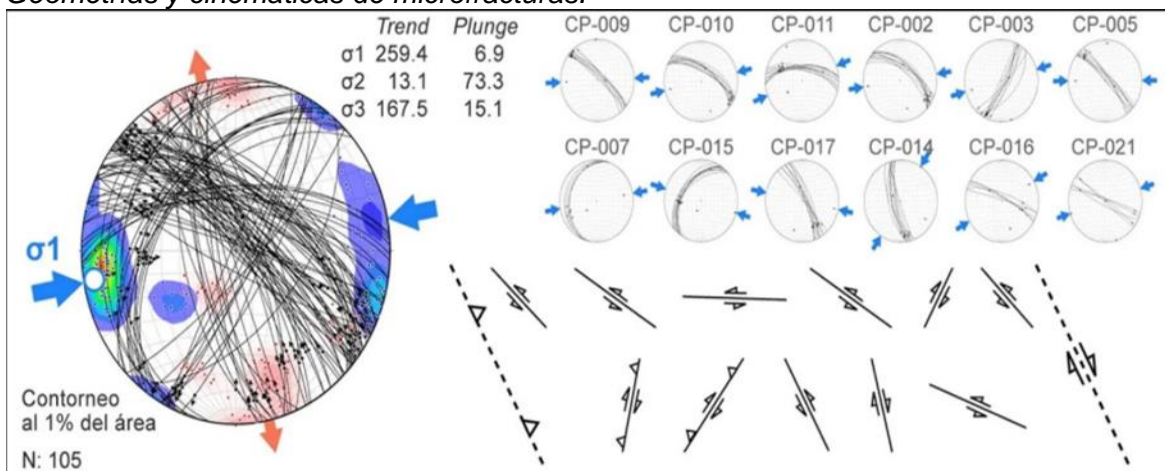
2.1.4 Análisis estructural

El análisis estructural tiene como objetivo determinar las trayectorias y la cinemática de los cambios tectónicos en su extensión real utilizando vectores de movimiento con un cierto grado de precisión. Esto permite la interpretación de un estado de paleoesfuerzo que podría corresponder a un punto específico en el tiempo. Además de medir capas y fracturas, es necesario considerar microestructuras mesoscópicas, como las de un afloramiento. Las microestructuras más comunes son ranuras, fracturas de Riedel y fibras de recristalización.

La mejor manera de realizar un análisis estructural es siempre la más objetiva: obtener información completa y bien fundamentada del terreno. En un plano de falla, buscamos estructuras escalonadas que presenten cizallamiento, comenzando con fracturas de Riedel o sus respectivos escalones. El rumbo, la inclinación y la pendiente se miden con una brújula, ya sea en la propia superficie de la falla o en las fracturas de Riedel. Además, dependiendo de la forma en que las fracturas de Riedel cortan el plano de falla, es esencial determinar la cinemática primaria y secundaria del movimiento tectónico. (Ayala, 2023).

Figura 4

Geometrías y cinemáticas de microfracturas.



Nota: (Ayala, 2023).

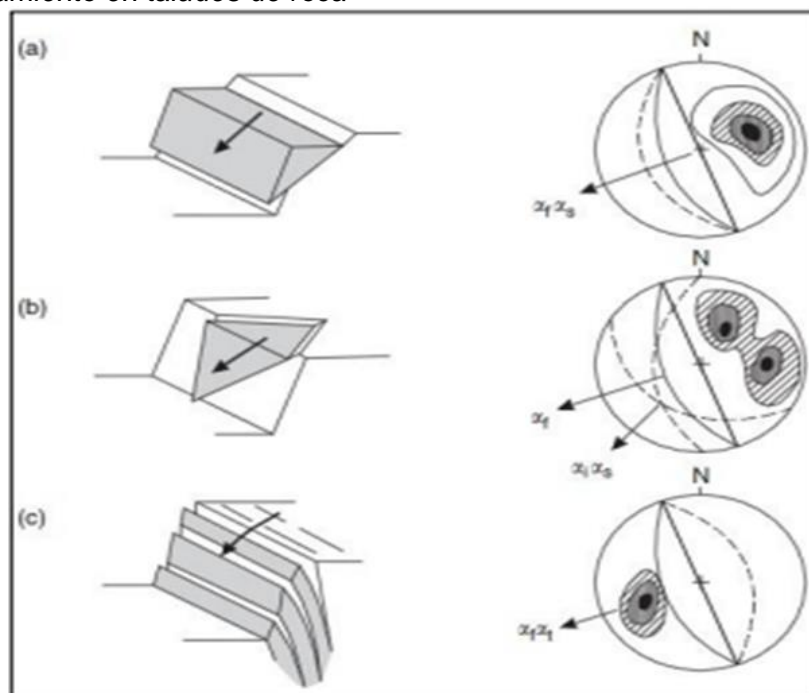
2.1.5 Análisis cinemático

La falla del control estructural ocurre debido al movimiento a lo largo de las discontinuidades geológicas existentes. Los tres mecanismos básicos de falla controlada estructuralmente en taludes rocosos son: falla plana, falla en cuña y vuelco o toppling

- Una falla planar ocurre cuando una discontinuidad geológica, como la estratificación, buza en forma paralela hacia la cara del talud y su buzamiento es mucho mayor que el ángulo de fricción.
- El fallamiento en cuña ocurre cuando un bloque de roca se desliza a través de la intersección de al menos dos discontinuidades, las cuales buzanan hacia la cara del talud den un ángulo oblicuo hacia la cara del corte, formando un bloque en forma de cuña.
- Un vuelco o toppling se puede considerar exclusivamente de medios rocosos, condicionados por la disposición estructural de los estratos hacia el interior del talud y un sistema de discontinuidades bien desarrollado (Santos, Gabulle y Gutiérrez, 2012).

Figura 5

Tipos de fallamiento en taludes de roca



Nota: (Santos, Gabulle y Gutiérrez, 2012).

2.1.6 Estabilidad física escala de bancos

El análisis de estabilidad a escala banco es una de los pilares principales en las evaluaciones geotécnicas que se realizan en la minería a tajo abierto, debido a que permite analizar el comportamiento del macizo rocoso en cada banco de manera individual. Su finalidad es determinar si las condiciones geológicas y geométricas del macizo rocoso permiten mantener la estabilidad local del banco durante y después de las operaciones de minado (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2017).

A diferencia del análisis de estabilidad a escala global, que considera todo el conjunto de bancos desde el más profundo hasta la superficie, el análisis a escala banco se enfoca en los mecanismos de falla local que pueden presentarse en el macizo rocoso entre dos bermas consecutivas. Dichos mecanismos están controlados principalmente por las discontinuidades estructurales del macizo, tales como diaclasas, planos de estratificación, foliaciones, fallas o zonas de debilidad, las cuales pueden generar superficies potenciales de deslizamiento o rotura (Hoek & Brown, 2019).

Entre los modos de falla más comunes a escala banco se incluyen:

- Falla planar, cuando una discontinuidad con inclinación desfavorable intersecta la cara del talud, permitiendo el deslizamiento de un bloque a lo largo del plano.
- Falla por cuña, que ocurre cuando dos o más discontinuidades se intersectan y delimitan un bloque con probabilidad de falla hacia la cara libre.
- Falla por volteo o toppling, típica en macizos con discontinuidades subverticales que generan la rotación de los bloques hacia la cara libre.
- Falla circular, frecuente en suelos residuales o materiales parcialmente meteorizados donde las discontinuidades no dominan el comportamiento global del talud (Wyllie & Mah, 2017; Duncan & Wright, 2005).

El análisis de estabilidad a escala banco puede abordarse mediante métodos empíricos, cinemáticos, analíticos y numéricos. La diferencia principal radica en que los métodos cinemáticos, se basan principalmente en proyecciones estereográficas, las cuales permiten identificar las orientaciones de discontinuidades críticas y los modos de falla

posibles en función de la geometría del talud (Hoek & Bray, 1981). Por otro lado, los métodos de equilibrio límite cuantifican el factor de seguridad (FoS) considerando las fuerzas resistentes (cohesión y fricción) y las fuerzas desestabilizadoras (peso, presión de poros, vibraciones, entre otras).

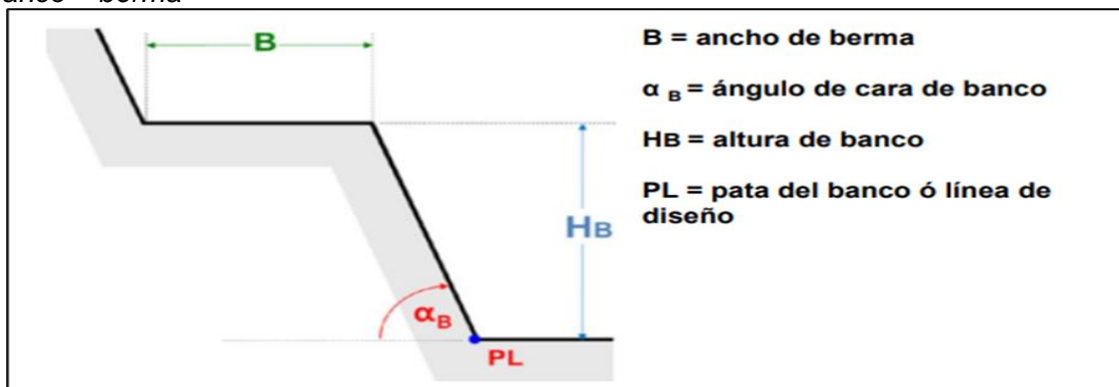
Asimismo, los métodos numéricos basados en el método de los elementos finitos o elementos discretos permiten simular el comportamiento tensodeformacional del macizo rocoso identificando zonas con probabilidad de deformación o desplazamiento.

En la práctica, el análisis de estabilidad a escala banco es determinante para definir ángulos de talud, alturas de banco y anchos de berma.

En conclusión, el análisis de estabilidad a escala banco forma parte de un componente esencial para garantizar la seguridad operativa, la eficiencia económica y la sostenibilidad del diseño de taludes en la minería a tajo abierto.

Figura 6

Banco – berma



Nota: (Santander, 2019)

2.1.7 Análisis de estabilidad a escala interrampa

El análisis de estabilidad a escala interrampa constituye el nivel intermedio dentro de la evaluación de estabilidad de taludes en tajo abierto, situado entre el análisis de estabilidad a escala banco (local) y el análisis global del talud. Su principal objetivo es evaluar el comportamiento conjunto de varios bancos que conforman una interrampa o sección mayor del talud, considerando las discontinuidades estructurales, las propiedades mecánicas del macizo y las condiciones hidrogeológicas (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2017).

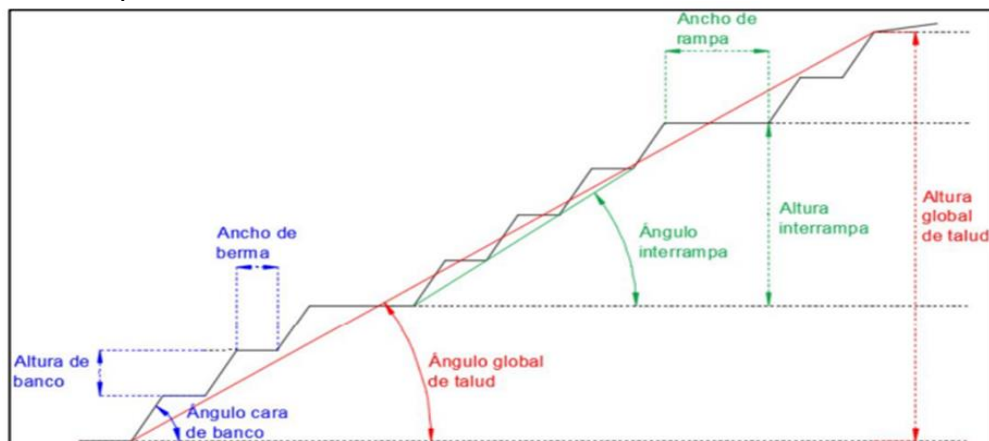
El análisis a escala interrampa busca determinar el factor de seguridad (FS) y los posibles modos de falla que comprometen la estabilidad de un conjunto de bancos, generalmente dentro de alturas entre 30 y 120 metros. En este nivel, las fallas suelen involucrar un volumen de material mayor que las observadas a escala banco, pudiendo abarcar varios niveles de bancos y berma, pero sin llegar a comprometer toda la excavación (Hoek & Brown, 2019; Call, 1987).

Para el estudio de estabilidad a escala interrampa se utilizan tanto métodos analíticos de equilibrio límite como modelos numéricos. Los primeros, como los métodos de Bishop, Janbu o Morgenstern–Price, permiten obtener el factor de seguridad a partir de las condiciones geométricas, tensionales y de resistencia del terreno. Los métodos numéricos permiten analizar el comportamiento tensodeformacional y la distribución de esfuerzos dentro del macizo rocoso, considerando condiciones de saturación, disturbancia y anisotropía (Duncan & Wright, 2005; Hoek, 2007).

En este tipo de análisis, la caracterización geotécnica adquiere especial relevancia, dado que los parámetros de resistencia (cohesión, ángulo de fricción interna) y deformabilidad (módulo elástico, razón de Poisson) deben representar el comportamiento del macizo rocoso a escala interrampa. Asimismo, la orientación y persistencia de las discontinuidades estructurales, la altura total de la interrampa, el ancho de berma y la presencia de presión de poros influyen en el análisis. (Hoek & Brown, 2019).

Figura 7

Escala Interrampa



Nota: “Aplicación del agendamiento directo de bloques como guía para la selección de fases – 2019”

2.1.8 Análisis de estabilidad física tensodeformacional

El análisis de estabilidad tensodeformacional permite comprender el comportamiento del macizo rocoso frente a la acción de cargas estáticas o dinámicas, cambios de nivel freático y condiciones de borde complejas. Este tipo de análisis se basa en los modelos numéricos, con el objetivo de evaluar las distribuciones de esfuerzos y deformaciones que se desarrollan dentro de un macizo rocoso y su influencia en la estabilidad global o local de la estructura (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996; Das & Sobhan, 2018).

En este contexto, la estabilidad tensodeformacional se evalúa considerando la interacción entre las tensiones efectivas (σ'), las deformaciones unitarias (ϵ) y los criterios de resistencia al corte del material. De acuerdo con la teoría clásica de Terzaghi (1943), las tensiones efectivas se expresan como $\sigma' = \sigma - u$, donde σ representa la tensión total y u la presión intersticial o de poros. Este principio constituye la base para comprender los fenómenos de falla por corte del macizo rocoso.

Para determinar los estados límite de estabilidad, se utilizan criterios de resistencia como el criterio de Mohr–Coulomb, que relaciona la resistencia al corte (τ) con la cohesión (c), el ángulo de fricción interna (ϕ) y la tensión efectiva normal (σ'), expresado como: $\tau = c + \sigma' \cdot \tan\phi$. Este criterio permite definir la envolvente de falla del material (Duncan & Wright, 2005; Budhu, 2020).

En la actualidad, el análisis tensodeformacional se realiza mediante métodos numéricos avanzados, principalmente el método de los elementos finitos y el método de los elementos discretos, los cuales permiten modelar el comportamiento de los materiales de un modelo geotécnico. Estos enfoques permiten obtener la distribución de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos considerando la interacción entre las estructuras y el macizo rocoso (Duncan & Chang, 1970; Coduto, Yeung & Kitch, 2011).

En conclusión, el análisis de estabilidad tensodeformacional permite integrar la resistencia al corte y la deformación del macizo rocoso dentro de un marco de equilibrio límite, proporcionando una visión integral de su comportamiento geotécnico.

2.1.9 Altura de banco

La altura de banco es la distancia vertical comprendida entre dos bermas consecutivas en un talud. Constituye una de las variables geométricas fundamentales del diseño de taludes, ya que influye directamente en la estabilidad estructural, operatividad minera y su seguridad (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2017).

2.1.10 Factor de seguridad

El factor de seguridad (FS) es un índice cuantitativo que expresa la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes que tienden a provocar el fallamiento. En términos generales, representa una medida del margen de estabilidad o confiabilidad de una estructura o talud frente a las fuerzas a las que está sometido (Duncan & Wright, 2005; Hoek & Bray, 1981).

Matemáticamente, el factor de seguridad se define como:

$$FS = \frac{\textit{Resistencia disponible}}{\textit{Esfuerzo actuante}}$$

De modo que:

- Si $FS > 1$, la estructura se considera estable, ya que las fuerzas resistentes superan a las desestabilizadoras.
- Si $FS = 1$, el sistema se encuentra en equilibrio límite o estado crítico.
- Si $FS < 1$, la estructura es inestable y se espera que falle.

En geotecnia, el factor de seguridad se emplea ampliamente para evaluar la estabilidad de taludes, comparando la resistencia al corte del macizo rocoso con el esfuerzo cortante bajo las condiciones de carga consideradas. En el caso de taludes, el FS se obtiene mediante métodos de equilibrio límite (como los de Bishop, Janbu, Morgenstern–Price o Spencer) o mediante modelos numéricos tensodeformacionales (FEM, DEM, FDM), que simulan el comportamiento del macizo ante diferentes condiciones de carga y drenaje (Duncan & Wright, 2005; Hoek, 2007).

2.1.11 Resistencia al corte

La resistencia al corte es la capacidad del macizo rocoso para oponerse a los esfuerzos cortantes que tienden a producir su deformación o falla. Representa una de las propiedades mecánicas más importantes en geotecnia, ya que controla la estabilidad de taludes (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996; Das & Sobhan, 2018).

De acuerdo con la teoría clásica de Mohr–Coulomb, la resistencia al corte (τ) de un material geotécnico puede expresarse como:

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi$$

Donde:

c = Cohesión del material

σ' = Tensión normal efectiva actuante sobre el plano de falla

φ = Ángulo de fricción interna del material

Esta relación indica que la resistencia al corte de un macizo rocoso depende tanto de su composición y estructura interna como del estado de esfuerzos y de la presión de poros.

Según la teoría de Terzaghi (1943), la tensión efectiva se define como $\sigma' = \sigma - u$, donde σ es la tensión total y u la presión de poros, lo que implica que el agua intersticial reduce la resistencia efectiva del terreno (Terzaghi et al., 1996).

En geotecnia, la resistencia al corte se determina mediante ensayos de laboratorio como el triaxial consolidado drenado (CD), no drenado (CU) o corte directo, y mediante ensayos in situ de penetración (SPT o CPT). Los resultados se interpretan para obtener los parámetros c y φ , que luego se emplean en los análisis de estabilidad (Budhu, 2020)

2.1.12 Ángulo de talud

El ángulo de talud es el ángulo formado entre la superficie inclinada de un talud y la horizontal, siendo uno de los parámetros geométricos más importantes en el diseño geotécnico. Este ángulo define la pendiente del talud y, por tanto, influye directamente en su estabilidad, seguridad y eficiencia operativa (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2017).

El ángulo de talud determina la relación entre la altura del talud y la longitud de su base, afectando la distribución de esfuerzos y la posibilidad de deslizamientos. En términos generales, a mayor ángulo de talud, es probable tener una mayor recuperación del tonelaje de mineral pero también mayor riesgo de inestabilidad (Duncan & Wright, 2005; Hoek & Brown, 2019).

En tajo abierto, se distinguen tres tipos principales de ángulos de talud:

- **Ángulo de banco:**

Inclinación de un solo banco o nivel entre dos bermas.

- **Ángulo interrampa:**

Inclinación promedio de varios bancos consecutivos dentro de una sección del talud.

- **Ángulo global:**

Inclinación general del talud completo, desde la base hasta el borde superior del tajo.

2.1.13 Estabilidad de un talud

La estabilidad de un talud se define como la capacidad del macizo rocoso para mantener su equilibrio ante la acción de las fuerzas internas y externas que tienden a producir su desplazamiento o falla. Un talud se considera estable cuando las fuerzas resistentes (cohesión, fricción) son mayores que las fuerzas desestabilizadoras (peso, presión de poros, vibraciones, factor de sismicidad) que actúan sobre él (Duncan & Wright, 2005; Hoek & Bray, 1981).

La estabilidad de un talud depende principalmente de:

- Las propiedades mecánicas del suelo o roca (cohesión c , ángulo de fricción interna ϕ , densidad y módulo elástico).
- La geometría del talud (altura, ángulo, bermas e interrampas).
- Las condiciones hidrogeológicas (presión de poros, nivel freático, drenaje).
- La orientación y persistencia de discontinuidades estructurales (diaclasas, fallas, foliaciones).

- Las cargas externas, como sismos, voladuras o disturbancia.

El análisis de estabilidad tiene como finalidad determinar el factor de seguridad (FS), que representa la relación entre las fuerzas resistentes y las desestabilizadoras.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Optimización

La optimización es el proceso mediante el cual se busca determinar los parámetros que maximizan o minimizan una función objetivo, bajo un conjunto de restricciones técnicas, operativas o económicas. En el ámbito geotécnico y minero, la optimización se orienta a lograr diseños estables, seguros y económicamente eficientes, mediante el equilibrio entre factores de seguridad, costos de excavación, geometría

En términos generales, la optimización permite tomar decisiones técnicas y económicas fundamentadas, garantizando que el diseño o el proceso analizado opere dentro de los límites de seguridad y con la máxima eficiencia posible (Hustrulid, Kuchta & Martin, 2013).

2.2.2 Fallas

Una falla es una ruptura o una serie de rupturas en los grandes bloques de roca de la litosfera que provocan una discontinuidad o desplazamiento relativo entre las formaciones rocosas. Este tipo de fractura ocurre cuando la fuerza del movimiento tectónico excede la resistencia del material subyacente. (Raffino, 2023).

2.2.3 Mapeo

El mapeo es el proceso de recopilación, registro y análisis de información geológica y estructural de un macizo rocoso, con el propósito de caracterizar sus condiciones geotécnicas y evaluar su estabilidad frente al proceso de minado. Este procedimiento constituye la base del reconocimiento geotécnico de campo y es esencial para el diseño y la seguridad de taludes (ISRM, 1981; Wyllie & Mah, 2017).

El mapeo geotécnico tiene como objetivo identificar los parámetros estructurales y geomecánicos que controlan el comportamiento del macizo rocoso, tales como:

- Tipo de roca o suelo y grado de meteorización.

- Sistemas de discontinuidades.
- Orientación, espaciamiento, persistencia, rugosidad, relleno y apertura de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Propiedades del material intacto, como resistencia, textura y alteración mineralógica.

Los datos recolectados durante el mapeo permiten elaborar modelos geotécnicos tridimensionales y clasificaciones del macizo rocoso, tales como RMR (Rock Mass Rating), Q-System, o GSI (Geological Strength Index), que se emplean en el análisis de estabilidad y diseño de obras (Bieniawski, 1989; Hoek & Brown, 2019).

2.2.4 Estereogramas

El estereograma es una representación gráfica tridimensional en dos dimensiones, utilizada en geología estructural y geotecnia para analizar la orientación espacial de planos y líneas dentro de un macizo rocoso o una estructura geológica. Su uso principal es el análisis cinemático y estructural de discontinuidades —como fallas, diaclasas, foliaciones y planos de estratificación— con respecto a la orientación de un talud o excavación (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2017).

En geotecnia, los estereogramas son una herramienta esencial para realizar análisis cinemáticos de estabilidad de taludes. A través de ellos, se puede identificar la posibilidad de fallas planares, por cuña o por volteo, al comparar la orientación de las discontinuidades con la dirección y el ángulo del talud. Estos análisis permiten definir si una discontinuidad tiene potencial de deslizamiento o si se encuentra fuera de la zona crítica con probabilidad de fallamiento. (Hoek & Brown, 2019).

Asimismo, los estereogramas se utilizan para agrupar familias de discontinuidades y determinar la distribución estructural del macizo rocoso, información indispensable para la clasificación geomecánica (RMR, Q, GSI) y para el diseño de taludes. En la actualidad, el procesamiento y análisis estereográfico se realiza mediante software especializado, como DIPS, que permiten la automatización de la interpretación estructural.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 *Tipo de investigación*

Enfoque de investigación:

- **Cuantitativa**

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, debido a que busca analizar y evaluar de manera objetiva el comportamiento geotécnico del macizo rocoso frente a la implementación de bancos verticales en el tajo Pampacancha utilizando modelos de redes de fracturas discretas (DFN, Discrete Fracture Network).

Este enfoque se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de ensayos geotécnicos de campo y laboratorio, mapeo estructural, modelación DFN y simulaciones numéricas de estabilidad de taludes. A través del uso de software (RS2), se cuantifican parámetros geométricos, densidades de fracturas, factores de seguridad, esfuerzos y desplazamientos, permitiendo establecer relaciones matemáticas y estadísticas entre las variables que controlan la estabilidad y la optimización geométrica del tajo.

El enfoque cuantitativo permite verificar hipótesis mediante el análisis objetivo de datos medibles, utilizando técnicas de procesamiento, modelación y comparación de resultados para determinar si la aplicación de bancos verticales genera mejoras significativas en la estabilidad local e interrampa.

En resumen, el enfoque cuantitativo aplicado en esta tesis busca explicar el comportamiento del macizo rocoso mediante el análisis estadístico y numérico de variables.

Nivel de investigación:

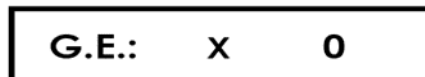
▪ **Explicativa**

En razón a Hernández, R. (2023), investigación será de nivel explicativo, menciona que se enfoca en explorar el motivo de lo sucedido, para identificar la relación de causa y efecto.

3.1.2 Diseño de la Investigación

De acuerdo con Arias (2006), la presente investigación será de diseño experimental, se basa en exponer a sujetos a condiciones específicas. Se manipulará la variable independiente (Aplicación de Bancos verticales mediante modelo DFN) para evaluar su impacto en la variable dependiente (Optimización del tajo Pampacancha) con un control mínimo del grupo.

Se presenta el esquema actual del diseño de investigación, es el siguiente:



G.E. = Grupo Experimental.

X = Estimulo Experimental.

O = Postest del grupo experimental.

3.1.3 Población y muestra

Población:

En razón con Balestrini (2006), población se refiere al conjunto total de elementos que fundamenta en demostrar el estudio. En razón a lo anterior la población estará constituida por todos los bancos del tajo Pampacancha.

Muestra:

Según Balestrini (2006), la muestra es una parte de la población, es decir forman parte del universo estudiado, la muestra estará conformada por los bancos pilotos al N-E del tajo Pampacancha con ángulos de 90° y 75°.

3.1.4 Técnicas de recolección de información

Técnica del análisis documental:

Los datos e informaciones se recopilarán, con de índole imparcial y en relación con la variable dependiente, para demostrar el efecto causado.

Técnica del fichaje:

Se empleará el fichaje, para recolectar toda la información textual relacionado a las variables en estudio.

3.1.5 Instrumentos de recolección de información

Reportes e informes:

Se realizarán y acondicionarán reportes e informes en la aplicación de bancos verticales con modelos DFN.

Fichas de Investigación:

Para el actual estudio de investigación las fichas serán en base a bibliografías, fuentes de información, resúmenes y experiencia.

3.1.6 Técnicas de análisis e interpretación de datos

Será llevada a cabo eliminando datos inexactos y únicos, clasificando los datos con la mejor distribución, organizándolos por categorías y dimensiones y realizando el análisis necesario mediante tablas, tablas de frecuencia y gráficos estadísticos.

Unidad de análisis:

El estudio se realizará en la Mina Hudbay.

Etapas de la investigación

Las etapas de investigación se realizarán de acuerdo a la estructura del plan de tesis.

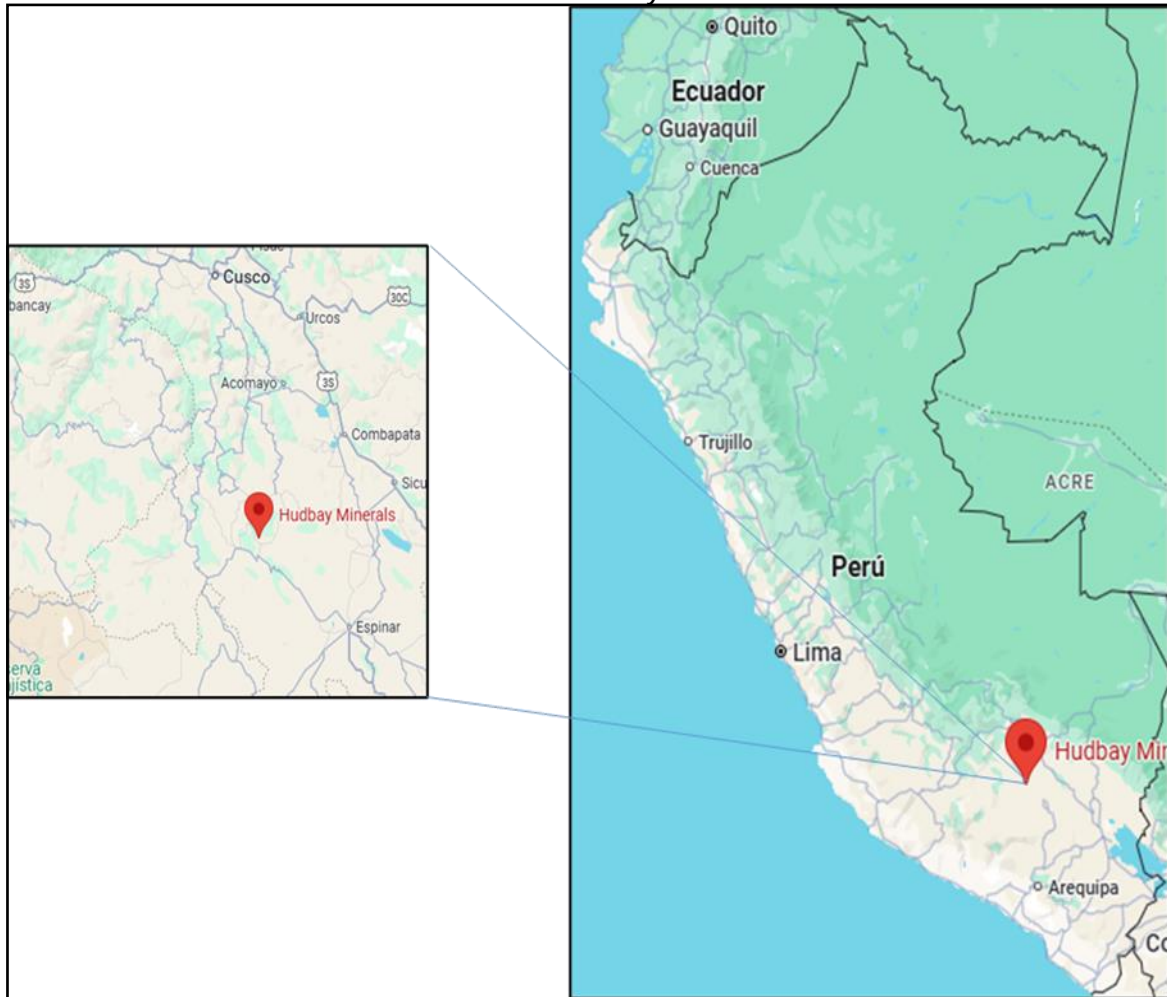
3.2 Procesamiento de la Información

3.2.1 Ubicación

Minera Hudbay está ubicada en los Andes sudorientales, departamento de Cusco, Provincia de Chumbivilcas, Distrito de Chilloroya, a una altitud de 4400 m.s.n.m.

Figura 8

Ubicación de Unidad Minera Constancia – Hudbay



Nota: Google Maps

3.2.2 Acceso

La unidad minera Constancia tiene los siguientes accesos:

Tabla 2

Acceso desde la ciudad de Lima en avión.

RUTAS	TIEMPO APROXIMADO	DISTANCIA
Lima - Cusco – Urcos – Sicuani – Yauri – Velille – Santo Tomas – Livitaca – Unida minera	9 horas	308 km
Lima - Cusco – Urcos – Combapata – Yanaoca – Livitaca – Unidad minera	7 horas	200 km
Lima - Arequipa – Imata – Yauri – Velille – Santo Tomas – Livitaca - Unida minera.	8 horas	358

Nota: (Agreda, 2018).

3.2.3 Aspecto geológico

Geología regional

El yacimiento Constancia se ubica en los andes surorientales del Perú, en los distritos de Velille y Chamaca, provincia de Chumbivilcas, departamento de Cusco.

El área está emplazada en el margen este del Batolito Andahuaylas – Yauri, aproximadamente a 3 km al sureste de la antigua mina Katanga. Las rocas más antiguas, corresponden a una secuencia de areniscas pertenecientes a la Formación Chilloroya del Cretácico Inferior, de grano medio de color blanco, rojo, violeta o gris con intercalaciones de esquistos de color rojizo.

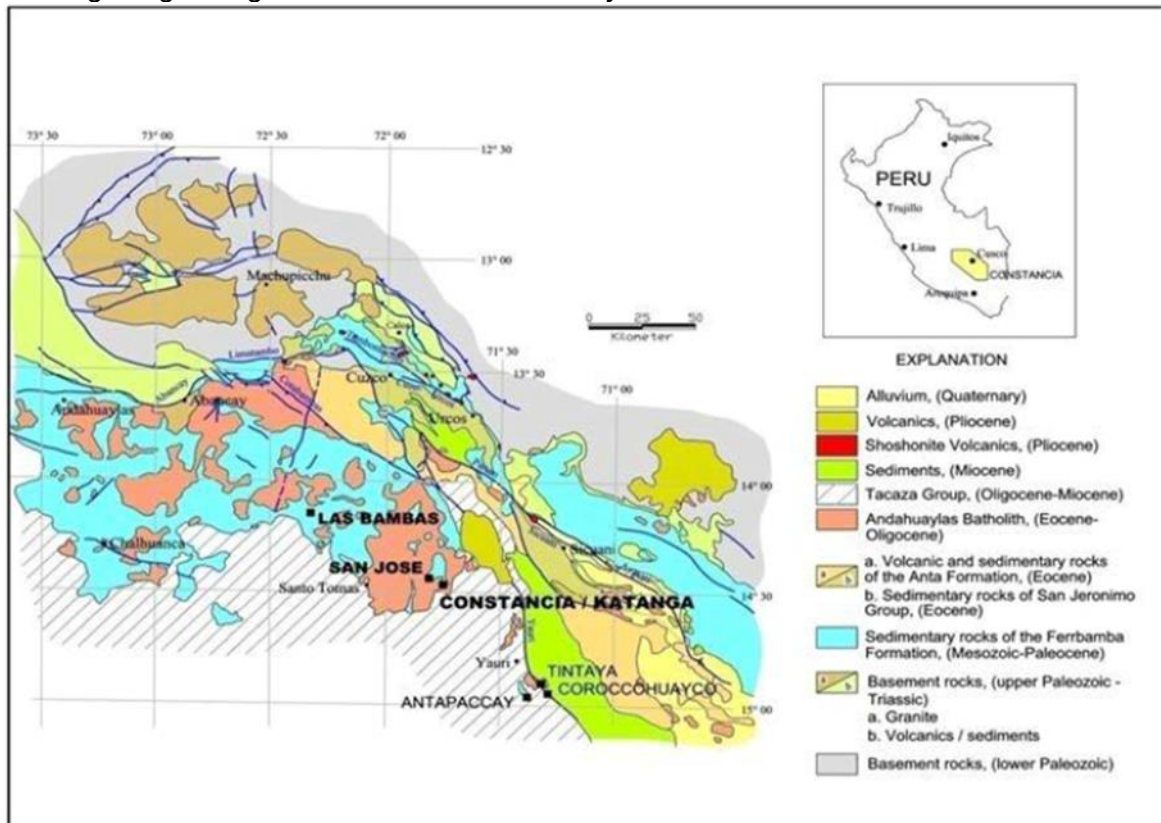
La Formación Arcurquina descansa de manera discordante sobre la Formación Chilloroya y se correlaciona con la Formación Ferrobamba del Cretácico Superior. Estas rocas se encuentran expuestas en un área alargada de norte-sur de 15 km de largo por 5 km de ancho, conformando una secuencia de calizas, calcarenitas y lentes de conglomerados.

El Batolito Andahuaylas – Yauri, presenta una composición diorítica-granodiorítica y con presencia de mantos pequeños, vetas y lentes de skarn de magnetita. Varias intrusiones de roca ígnea monzoníticas, diques o lacolitos intruyen y cortan transversalmente todas las litologías mencionadas líneas arriba. Algunas de las intrusiones de roca ígnea tienen características típicas de yacimientos de cobre porfirítico. Finalmente se observa la cobertura de depósitos cuaternarios diferenciándose de los depósitos glaciales y hacia la parte superior los depósitos aluviales.

El yacimiento Constancia es del tipo Pórfido de Cu-Mo-Au y los tipos de mineralización son los siguientes: Óxidos (Malaquita-Cuprita), Supergeno (Calcocita-Pirita), Mixta (Calcosina-Pirita-Calcopirita) e Hipógena (Calcopirita-Pirita-Molibdenita). (Hudbay, 2025).

Figura 9

Plano geológico regional del área de Andahuaylas – Yauri



Nota: (Hudbay, 2025)

Geología local

Estratigrafía. La unidad estratigráfica más antigua reconocida en el yacimiento Constancia, comprende sedimentos clásticos correspondientes a la Formación Chilloroya, que consiste en una secuencia de areniscas de grano medio blancas, rojas, violetas y grises con intercalaciones de lutitas rojizas. Inmediatamente sobre esta unidad basal se encuentran calizas micríticas grises masivas con pequeñas intercalaciones de lutitas, que afloran esporádicamente alrededor del prospecto y cerca de los contactos con monzonita, a veces como techos colgados.

Esta unidad corresponde a la Formación Arcurquina (conocida localmente como Formación Ferrobamba). Cuando entran en contacto con rocas intrusivas, estas se alteran a mármol o piroxeno, diópsido-granate-magnetita-epidota skarn, con o sin sulfuros. Las calizas y skarns se sumergen suavemente hacia el sureste, lejos de la monzonita principal

en la parte sur de la zona mineralizada de Constancia. Se desconoce el grosor total del paquete sedimentario.

La determinación de la base de esta unidad de roca caliza puede ser importante en Constancia, ya que este contacto potencial parece correlacionarse con el horizonte favorable de Skarn en la antigua mina Tintaya y en otras partes de la región. Este contacto se puede encontrar en profundidad al sur y este del área actualmente perforada, si no es intruido por la monzonita. Se sabe que los sedimentos clásticos subyacentes de la Formación Murco, y posiblemente las partes superiores de la Formación Hualhuani subyacente adicional (conocida localmente como Formación Soraya), que consisten litológicamente en areniscas y limolitas, con horizontes calcáreos y de cuarcita ocasionales, albergan mineralización de cobre en Varios sistemas de cobre dentro del cinturón. En el depósito de quechua de Mitsui, cerca de Tintaya, y también en el depósito de pórfido de cobre de Antillas, cerca de Antabamba (al norte de Constancia), estas rocas son el principal anfitrión de la mineralización de cobre. El mismo estilo de mineralización ocurre en Haqira (10 km al sur de Las Bambas), donde los sedimentos de Murco son el anfitrión de la mayor parte del recurso de óxido de cobre del sistema.

En el Yacimiento Constancia, este tipo de sedimentos clásticos, especialmente la Formación Murco o Chilloroya, que es la roca huésped de la mineralización de óxido de cobre en Haqira, se han identificado en el sector sur de la propiedad, alrededor de la aldea de Chilloroya, donde la exploración reciente de la superficie ha identificado evidencia de mineralización de cobre-oro-molibdeno relacionada con el pórfido asociada con los sedimentos y las rocas de pórfido alteradas. Común a estos sedimentos clásticos es su coloración teñida con hierro, que proviene de la oxidación de pirita diseminada pre-mineralización.

Las morrenas glaciales cubren los márgenes norte y este del depósito de Constancia. Al este, estas morrenas cubren por completo extensiones potencialmente importantes de mineralización de cobre a lo largo de amplias zonas estructurales este-oeste.

Rocas intrusivas. Múltiples fases de monzonita y pórfido monzonítico caracterizan gran parte del área superficial del yacimiento, además de dominar los tipos de roca observados en la perforación hasta la fecha.

Se reconocen al menos cuatro fases principales de intrusión, y la segunda más antigua se asocia con el evento de mineralización principal. De mayor a menor son: Diorita: aunque no es parte del evento intrusivo asociado con la mineralización, el batolito de Andahuaylas-Yauri forma el "basamento intrusivo" del depósito de Constancia.

Pórfido Monzonítico 1 (MP1):

Esta unidad aflora como un gran stock en cerro Constancia, que se extiende hacia el oeste hasta San José. Alberga la mayor parte de la mineralización relacionada con el pórfido. Se caracteriza por abundantes fenocristales de plagioclasa con hornblenda en cristales alargados.

Micro Monzonita Porfirítica (MMP):

Caracterizado por una textura de grano fino con cristales de plagioclasa, biotita y magnetita en la matriz gris claro. Este cuerpo aflora como una población en el sur, pero está más extendido al oeste del depósito, incluida la zona de San José.

Pórfido Monzonítico de Cuarzo (QMP):

Esta unidad se presenta principalmente como diques de tendencia de norte a sur a noroeste con límites fríos oscuros y de grano fino. La plagioclasa abundante con cristales de hornblenda tabulares y bien formados se produce como fenocristales en una matriz verdosa. Estos diques verticales tienen hasta 60 m de ancho. No hay mineralización asociada con los diques.

Pórfido Monzonítico 2 (MP2):

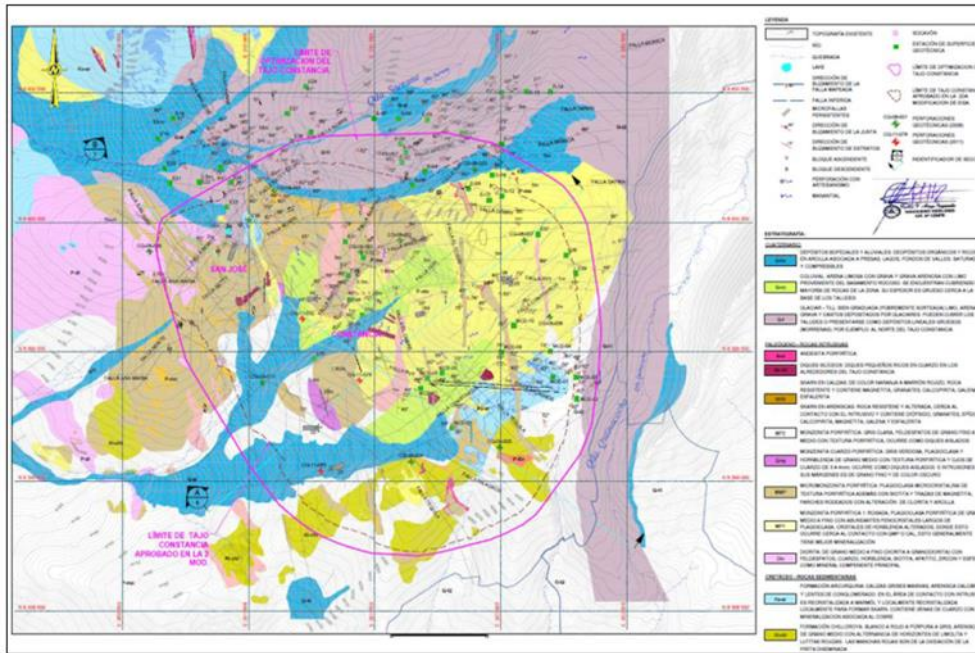
Este pórfido de monzonita similar a un dique aflora entre las zonas de Constancia y San José. Se caracteriza por abundantes fenocristales de plagioclasa sub-redondeados en una matriz blanquecina con poca magnetita y biotita. El pórfido de monzonita se presenta como diques de hasta 150 m de ancho, que golpean de norte a sur con un fuerte descenso hacia el este.

Andesita (AAN):

Roca afanítica gris oscuro con plagioclasa y fenocristales de hornblenda. Esto ocurre principalmente como cuerpos estrechos similares a diques, algunos de ellos cerca de los contactos con el pórfido monzonítico de cuarzo.

Figura 10

Plano geológico local



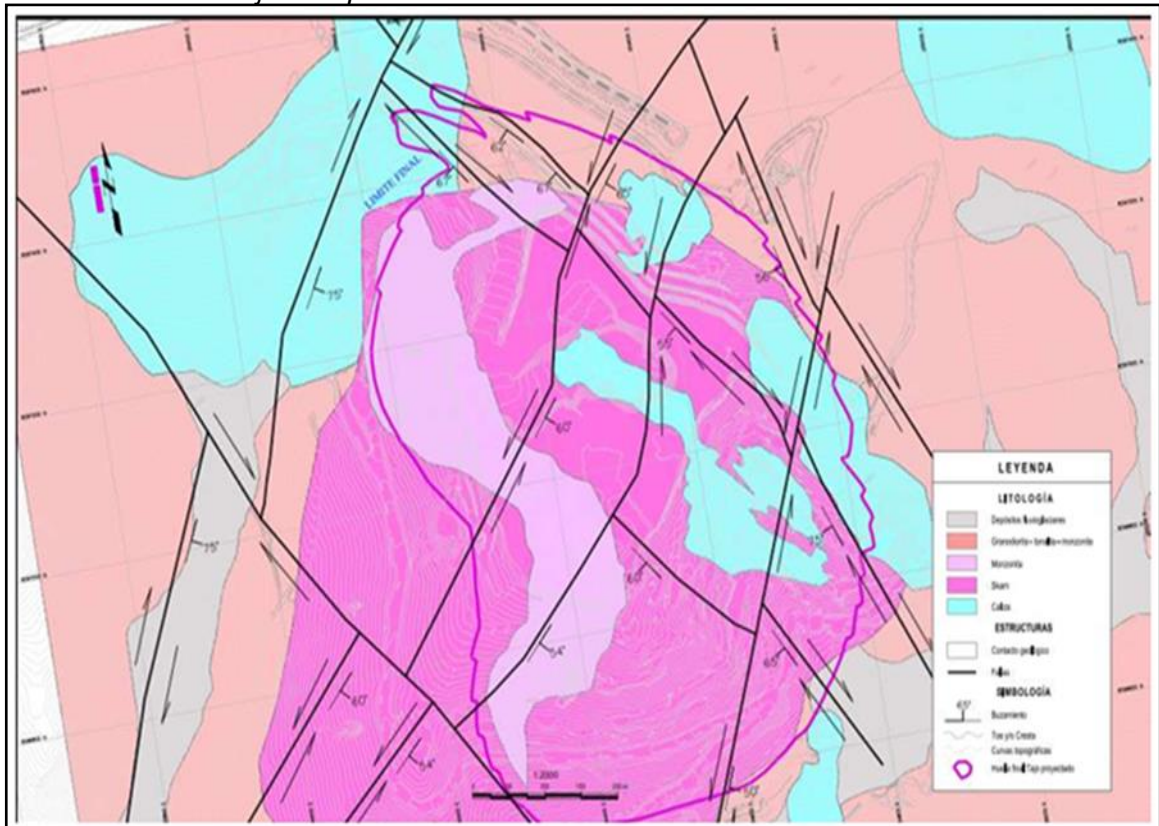
Nota: (Hudbay, 2025)

3.2.4 Geología estructural

En general, el Batolito Andahuaylas Yauri es la litología que predomina dentro del tajo Pampacancha. El área efectiva se encuentra localizada en una zona de amplia dilatación regional y de forma sigmoidal, que fue aprovechada por el Batolito Andahuaylas-Yauri, para su emplazamiento. La zona del yacimiento Constancia está dominada estructuralmente por tres sistemas principales de fallas, los cuales controlaron el emplazamiento del cuerpo de pórfido monzonítico y la mineralización de la zona Katanga-Constancia-Pampacancha. Estos sistemas de fallas también controlan estructuralmente algunas de las principales quebradas, como la del río Chilloroya y las quebradas Sacrane, Casanuma y Huayllachane, que se desarrollaron a lo largo de fallas debido a su comportamiento como zonas de debilidad estructural.

Figura 12

Fallas locales del tajo Pampacancha



Nota: (Hudbay, 2025)

En agosto de 2024, se actualizó el modelo de estructuras en 3D, el cual incluye las principales fallas presentes en el tajo, identificadas como F1 hasta F20, como se ilustra en la Figura 6.

La Tabla 2 presenta un resumen de los sistemas mayores identificados en el área del tajo Pampacancha.

Tabla 3

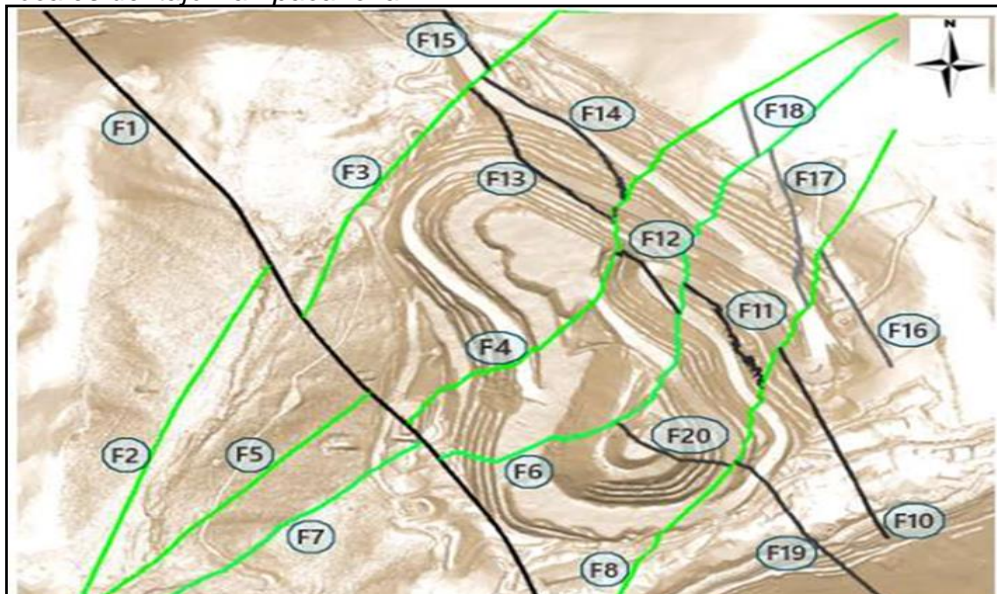
Resumen de orientación aproximada de las fallas mayores en el tajo Pampacancha

Falla	Buzamiento (*)	Dirección de Buzamiento (*)
F1	88	50
F2	75	115
F3	75	122
F4	60	125
F5	60	133
F6	54	135
F7	54	140
F8	50	112
F9	52	140
F10	78	250
F11	55	232
F12	65	238
F13	80	230
F14	65	220
F15	75	240
F16	78	245
F17	56	256
F18	65	257
F19	65	241
F20	60	230

Nota: (Hudbay, 2024)

Figura 13

Fallas locales del tajo Pampacancha



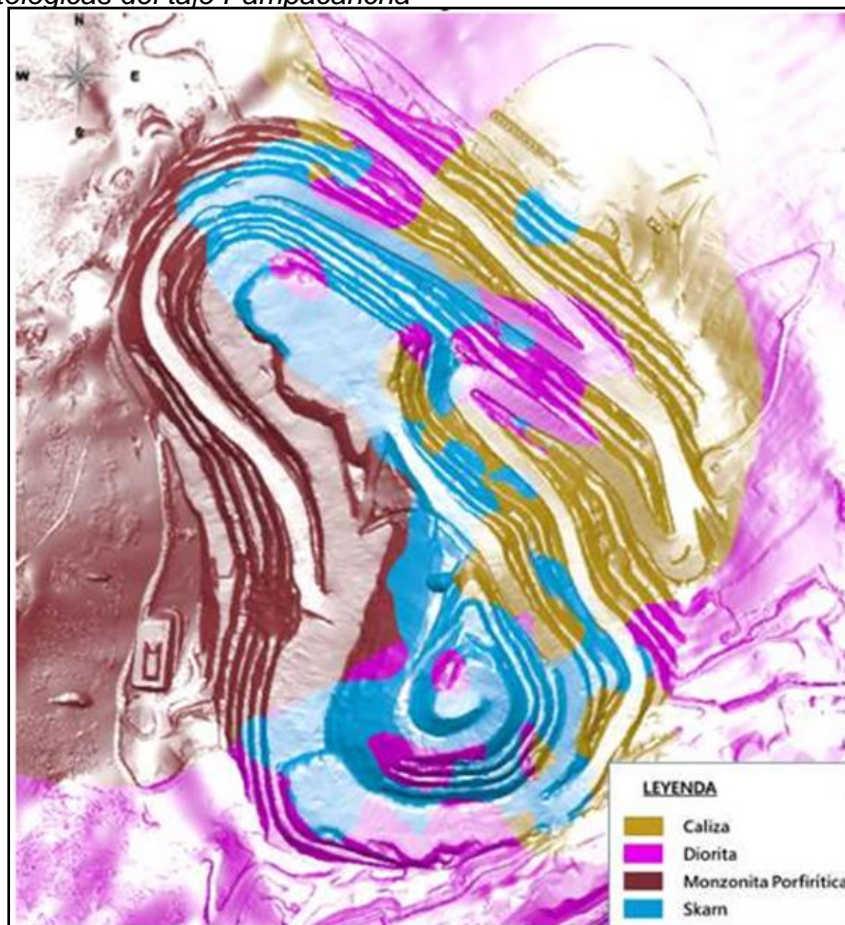
Nota: (Hudbay, 2024)

3.2.5 Modelo geológico

En agosto de 2024, se actualizó el modelo geológico en 3D que presenta las principales unidades litológicas en el tajo Pampacancha: caliza, skarn, Monzonita Porfírica (MP) y diorita, como se ilustra en la Figura 7. Estas unidades sirvieron de base para definir las unidades de macizo rocoso utilizadas en el análisis de estabilidad del tajo.

Figura 14

Unidades litológicas del tajo Pampacancha



Nota: (Hudbay, 2024)

Tabla 4

Dominios litológicos en el tajo Pampacancha

CÓDIGO	LITOLÓGÍA	DESCRIPCIÓN
LMT	Caliza	Roca sedimentaria pre-mineral
DIO	Diorita	Intrusivo pre- mineral
MP2	Monzonita porfírica	Intrusivo post- mineral
SKN	Skarn	Parte sedimentaria e intrusiva del skarn

Nota: (Hudbay, 2024)

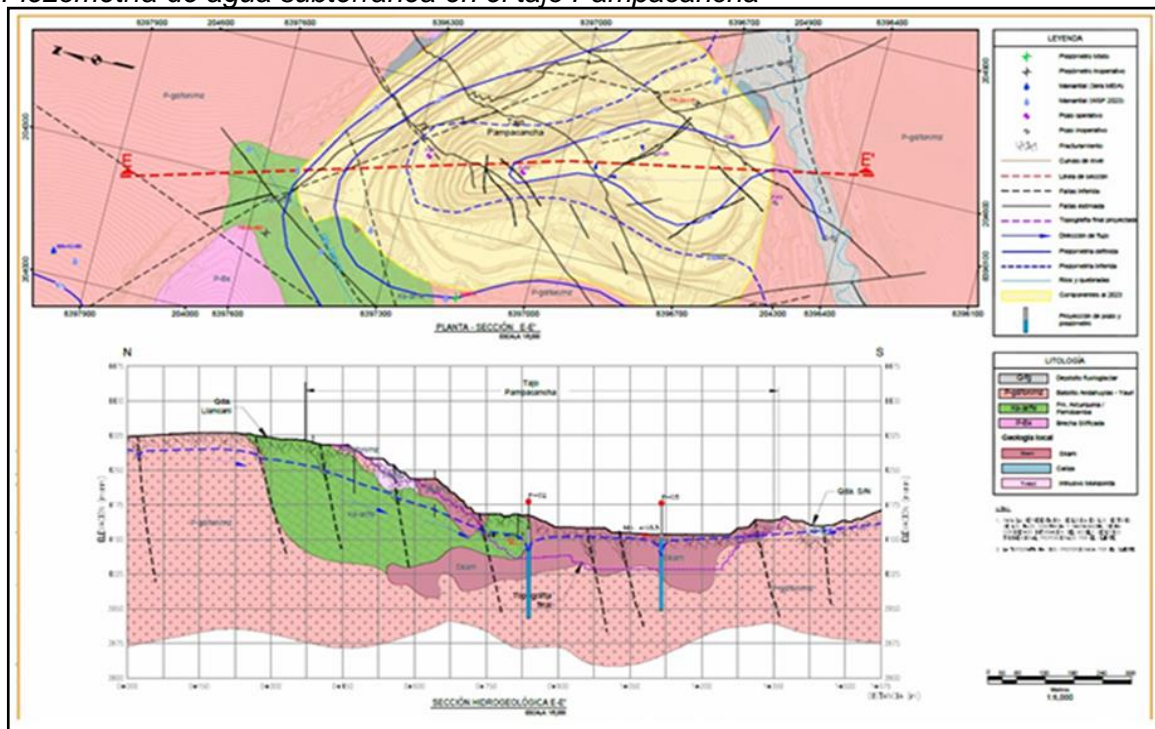
3.2.6 Nivel de agua subterránea

Este estudio ha considerado las evaluaciones hidrogeológicas realizadas por en la Unidad Minera Constanca en mayo 2024, basadas en los registros piezométricos, pozos de desaguado, datos de controles de cuerpos de agua y ríos seleccionados. La Figura 7 muestra la piezometría del agua subterránea correspondiente a la condición diciembre 2024 en el Tajo Pampacancha.

Esta información, junto con los datos del monitoreo de niveles de agua en pozos y datos de piezómetros, ha sido utilizada para estimar niveles freáticos en la evaluación de estabilidad de taludes del tajo.

Figura 15

Piezometría de agua subterránea en el tajo Pampacancha



Nota: (Hudbay, 2024)

3.3 Operaciones unidad minera Constanca

Las operaciones en la UM Constanca están basadas en técnicas de minado convencional de tajo abierto, como el uso de perforación y voladura, palas y camiones mineros. Las principales actividades de producción son: Perforación, voladura, carguío, acarreo y servicios auxiliares.

3.3.1 Perforación

La etapa de perforación se realiza mediante la perforación primaria o de producción y la perforación secundaria o precorte que es utilizada para mantener la estabilidad de los taludes del tajo.

Los parámetros de perforación consideran una altura de banco simple de 15 m, basándose en los diseños geotécnicos de los tajos. La perforación de taladros de producción se realiza con perforadoras rotativas Pit Viper utilizando diámetros de 9 7/8", 10 5/8" y 11", según sea el diseño, y para la perforación en precorte se utiliza una perforadora pequeña (SmartRoc D65) con diámetro de perforación de 5".

3.3.2 Malla de perforación y parámetros

Las mallas de perforación son diseñadas de acuerdo con la caracterización geomecánica de los materiales y los requerimientos de fragmentación de la Planta de Procesos en cuanto a mineral y para desmonte de acuerdo a las necesidades del TMF. En la Tabla 53 se presentan las configuraciones de las mallas de perforación.

La malla de perforación para mineral tiene como objetivo obtener un porcentaje de finos menor a 1" del 47% para lograr el máximo rendimiento de los molinos en la Planta de Procesos.

Tabla 5

Parámetros de perforación

Tajo	Unidad	Unidad	Diseño Mallas de Perforación	
			Mineral	Desmonte
Tajo Constancia	Burden	m	5.5 - 7.0	6.0 - 8.0
	Espaciamiento	m	5.5 - 7.0	6.0 - 8.0
	Altura de banco	m	15.0	
	Sobreperforación	m	0.0 - 1.0	
Tajo Pampacancha	Burden	m	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0
	Espaciamiento	m	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0
	Altura de banco	m	15.0	
	Sobreperforación	m	0.0 - 2.0	

Nota: (Hudbay, 2025)

3.3.3 Voladura

Para ejecutar la voladura se utiliza diferentes tipos de mezclas explosivas que varían de acuerdo con las características y condiciones del macizo rocoso, así como del tipo de material que se requiere fragmentar, estas mezclas explosivas pueden ser: anfo, anfo pesado, emulsión gasificable y emulsión encartuchada, que serán utilizados en diferentes proporciones de acuerdo con las tablas 54 y 55.

Los principales insumos que se utilizan son los siguientes: emulsión a granel, emulsión encartuchada, nitrato de amonio grado ANFO, detonador electrónico, detonador no eléctrico, booster o multiplicador y cordón detonante.

El carguío de las mezclas explosivas a los taladros se realiza mediante camiones fábrica que son de propiedad de las empresas contratistas especialistas en voladuras y los depósitos de nitrato de amonio, explosivos y accesorios (polvorines), se ubican al norte de la Planta de Procesos.

La frecuencia de voladura obedece a la caracterización del macizo rocoso del área de los tajos, y las condiciones operativas del terreno. La frecuencia podría variar dependiendo de factores operativos y/o climáticos en la UM Constancia.

Esta frecuencia y horario puede modificarse debido a factores propios o externos de la operación, tales como requerimientos de la Planta de Procesos, mantenimiento de equipos o clima adverso, como tormentas eléctricas, nevadas entre otros. De darse una modificación de horario, Hudbay cumplirá con los procedimientos respectivos acerca de esta actividad, conforme al artículo 267 del D.S. N° 024-2016-EM y su modificatoria D.S. N° 023-2017-EM.

Asimismo, es importante mencionar que los centros poblados cercanos a la UM Constancia se encuentran fuera del radio de seguridad (500 m) que se requiere para trabajos de voladura a cielo abierto (artículo 267 del D.S. N° 024-2016-EM); y fuera de la distancia mínima estimada (272 m) para el cumplimiento de la Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras (DGAAM 1995).

Tabla 6*Parámetros de voladura*

Parámetros	Unidad	Taladros de producción		Taladros Buffer	Taladros de Pre-corte
		Mineral	Desmante		
Densidad del explosivo	g/cm ³	0.80 - 1.15	0.80 - 1.15	0.80 - 1.15	0.80 - 1.2
Diámetro taladro	Pulgadas (")	9 7/8, 10 5/8, 11	9 7/8, 10 5/8, 11	9 7/8	5
Altura de banco	m	15	15	15	15
Sobre perforación	m	0.00 - 1	0.00 - 1	0.00 - 1	0
Longitud de carga	m	9.2 – 8.9	9.0 - 8.5	4.0 – 5.7	1.0 – 1.0
Carga explosiva	Kg x taladro	775 - 830	690 - 770	300 - 450	12 - 80
Factor de potencia	Kg/ton	0.41-0.71	0.28 - 0.55	0.22 - 0.39	0.02 - 0.08
Tiempo de retardo entre taladros	ms	15 – 200	15 - 200	15 - 200	8 - 200
N° Taladros por proyecto de voladura	Unidad	Hasta 300	Hasta 300	Hasta 100	Hasta 120
N° de voladuras	Frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> - 03 voladuras a la semana (hasta la culminación de la explotación del tajo Pampacancha en el año 2025). - 07 voladuras a la semana (desde el 2026 después de la culminación de la explotación del tajo Pampacancha). - No se considera voladuras simultáneas (al mismo tiempo) con el tajo Pampacancha. No obstante, si se consideran voladuras el mismo día (en diferentes horarios). 			
Horario de voladura	Hora	7:00 horas y 12:30 horas Este cronograma puede modificarse debido a factores propios o externos de la operación. De darse una modificación de horario, Hudbay cumplirá con los procedimientos establecidos.			

Nota: (Hudbay, 2025)

3.3.4 Carguío

El carguío considera como equipos principales 3 palas hidráulicas Hitachi EX 5600-6 de 27 m³ de capacidad, los cuales trabajarán haciendo match con camiones de 227 toneladas. Además, se trabaja con 01 cargador de ruedas 994H de 19 m³ en el tajo Constancia; y 01 cargador de ruedas 994K de 19 m³ en el tajo Pampacancha. Estos cargadores pueden intercambiarse conforme e incluso trabajar en el mismo tajo, de acuerdo con las necesidades de la operación. Asimismo, estos equipos trabajan en el proceso de remanejo en los stocks de mineral.

Los trabajos en el tajo Constancia iniciaron el 2014, luego en el 2021 se procedió a trabajar en paralelo en los tajos Constancia y Pampacancha. Finalmente, desde el año

2026, cuando termine el minado en el tajo Pampacancha, se procederá a trabajar sólo en el tajo Constancia.

Los tajos Constancia y Pampacancha han sido diseñados para tener frentes de carguío con ancho de minado mínimo de 60 m en cada caso.

3.3.5 Acarreo

Durante toda la vida de la mina, mineral y desmonte será transportado por camiones mineros de 227 toneladas de capacidad (CAT 793F o equivalente). El uso de estos camiones minimiza la congestión en las vías, requerimiento de operadores y mano de obra, así como también reduce los costos operativos. Este tipo de camiones requieren un mínimo de 32 m de ancho de vía. Las rutas de acarreo fueron determinadas en orden de optimizar la productividad y las horas de operación para cada año, sin considerar nuevas rutas respecto a lo existente.

3.3.6 Equipos auxiliares

Los equipos más usados en la mina, también incluyen el uso de equipos auxiliares que no son directamente responsables del avance de la producción, pero son necesarios regularmente para el mantenimiento de las vías de acarreo, bancos en la mina, control de pisos en el tajo y en los depósitos de desmonte.

Estos equipos se utilizan y han sido estimados para la vida restante de la mina en función de las productividades y de los requerimientos de los equipos principales de la mina, los cuales se presentan en la Tabla 30 (Constancia y Pampacancha):

- Un máximo de 05 Tractores de Oruga CAT D10T2 Crawler dozers, D10T2 class.
- Un máximo de 02 Tractores de ruedas CAT 824 / 854.
- Un máximo de 02 Motoniveladoras 14H.
- Un máximo de 02 Cisternas de Agua 777G.

En general, los tractores de rueda son usados en el tajo para la limpieza de las zonas alrededor de las palas; los tractores de oruga para nivelación de pisos, empuje de material en tajo y/o depósitos y desbroce de zonas nuevas para minado. Las

motoniveladoras y las cisternas de agua son usados para el mantenimiento de las vías de acarreo y el control de polvo, principalmente

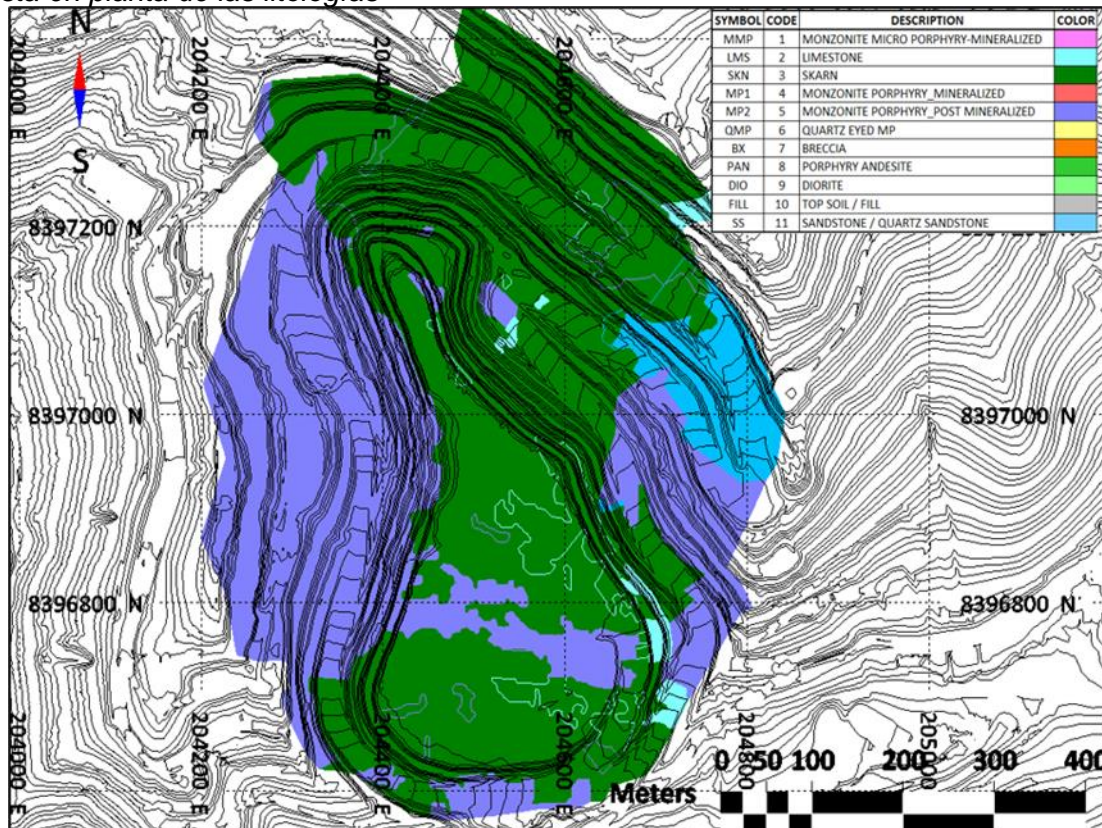
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Litología tajo Pampacancha

En la figura 16 se observa que el tajo Pampacancha es un depósito tipo skarn y satélite del depósito principal (Constancia), que está principalmente compuesto de rocas intrusivas terciarias del Batolito Apurímac y rocas sedimentarias cretácicas de la Formación Arcurquina. Así mismo el modelo geológico simplificado, incluye cinco unidades geológicas principales: Skarn (SKN), Monzonita Porfírica (MP2), Diorita Porfírica (PDI), Diorita (DIO), y Caliza (LMT)

Figura 16

Vista en planta de las litologías



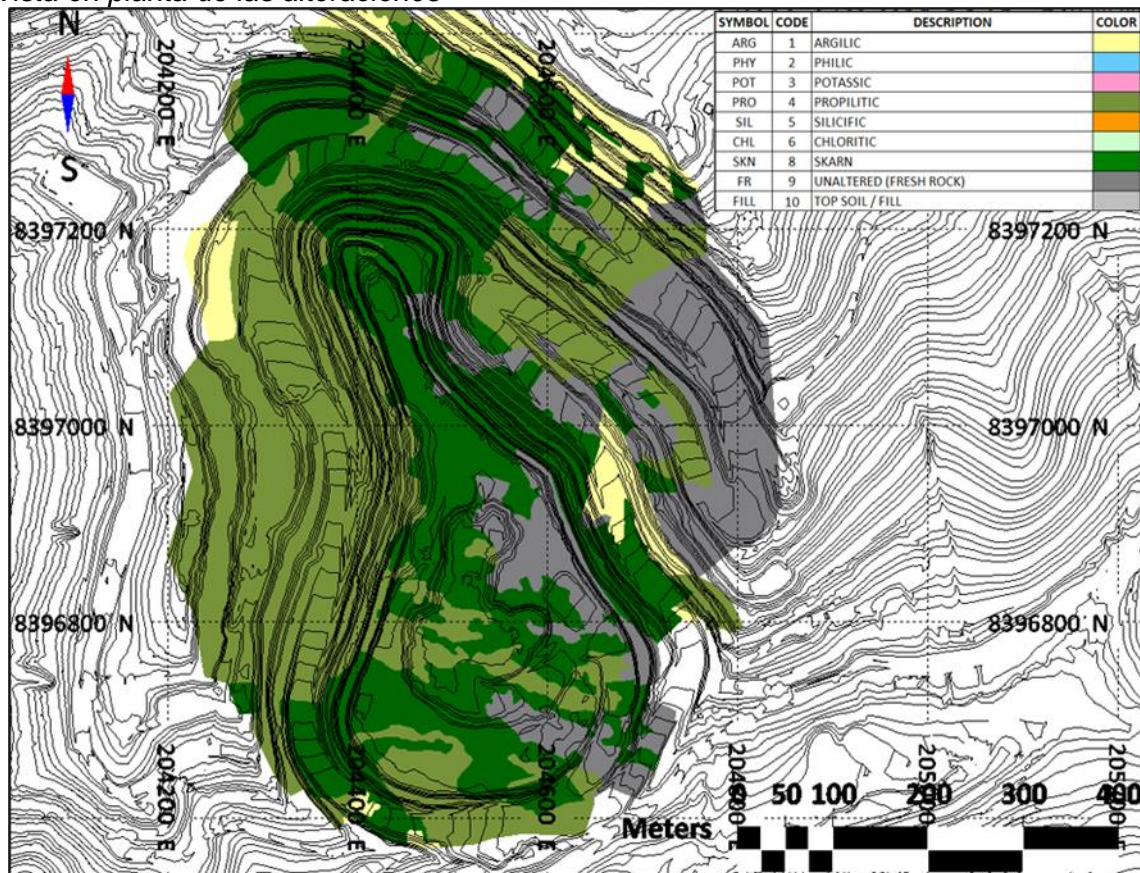
Nota: Elaboración propia

4.2 Alteraciones tajo Pampacancha

En la figura 17 se observa que el tajo Pampacancha presenta alteraciones predominantes tipo Skarn y Propilítico, las cuales se emplazan en los bancos pilotos y en casi todo el tajo.

Figura 17

Vista en planta de las alteraciones



Nota: Elaboración propia

4.3 Fallas principales bajo Pampacancha

En la figura 18 se observa que el tajo Pampacancha tiene 3 tipos de lineamientos estructurales, teniendo en cuenta la longitud y el número de estos para su clasificación.

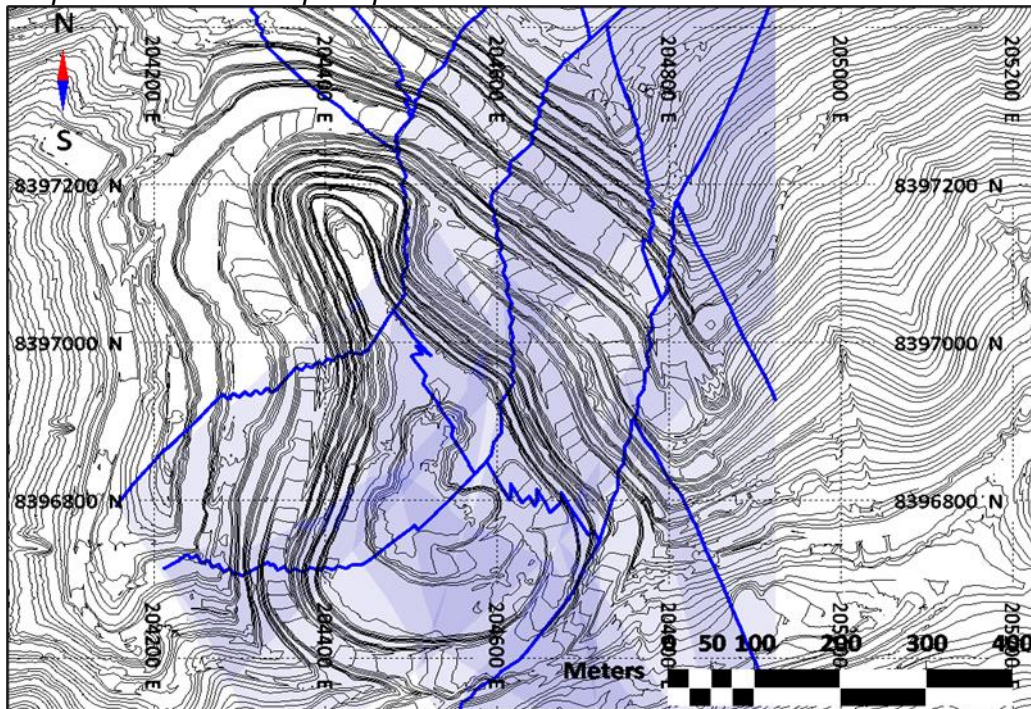
Los lineamientos de primer orden dentro del área local presentan mayor longitud, pues alcanzan de 0.5 a 1km. Asimismo, se identificaron 10 lineamientos de primer dentro del área local con orientaciones preferentes NO – SE y NE – SO.

Los lineamientos de segundo orden presentan longitudes desde 300 m hasta 500m. Asimismo, se identificaron dentro del área local 5 lineamientos con tendencias preferentes NE – SO y NO – SE.

Finalmente se identificaron lineamientos de tercer orden, que presentan longitudes menores a los 300 m.

Figura 18

Vista en planta de las fallas principales



Nota: Elaboración propia

4.4 Fallas a escala local tajo Pampacancha

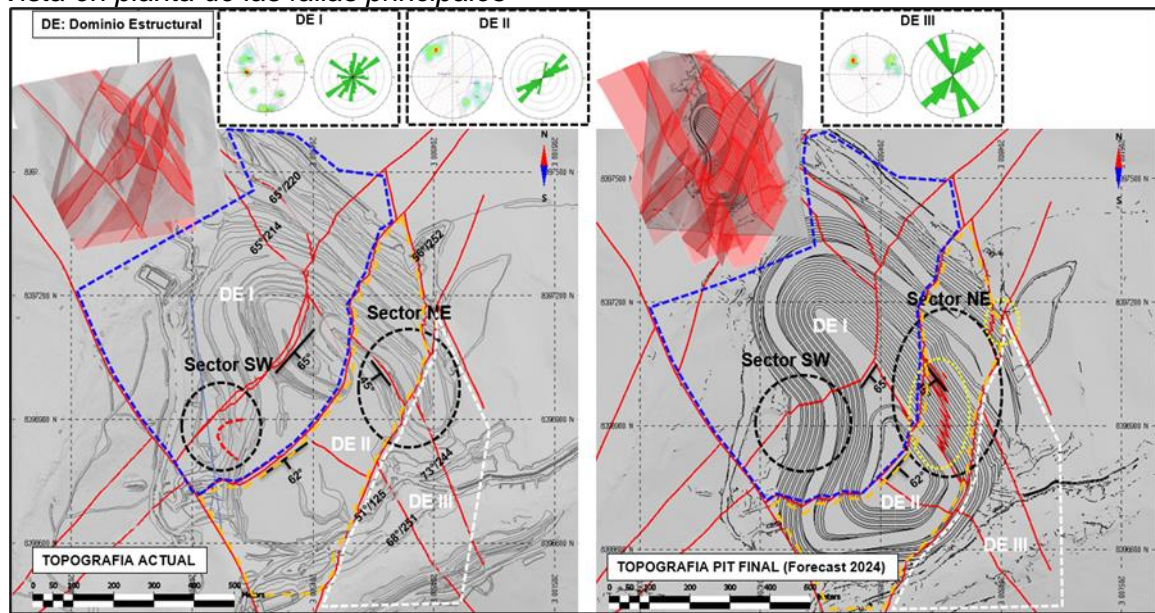
En la figura 19 se observa que las fallas locales originadas en el área del tajo Pampacancha, fueron el resultado de una fuerte deformación del macizo rocoso generada por la acción de esfuerzos tectónicos que fueron aplicados sobre el área desde hace millones de años hasta la actualidad.

Durante el mapeo geológico-estructural realizado en el área efectiva se pudo apreciar rocas moderadamente fracturadas a fuertemente fracturadas, espejos de falla y brechas de falla, los cuales cortan de manera transversal y longitudinal al tajo Pampacancha. Cabe mencionar que la mayoría de las fallas que se encuentran en el área efectiva presentan desplazamiento largos y zonas de brecha de falla; se caracterizan porque sus planos son ondulados y muy persistentes.

Las diaclasas están ligadas a la deformación del macizo rocoso generada por esfuerzos de tracción y compresión, es decir a los sistemas de falla principales.

Figura 19

Vista en planta de las fallas principales



Nota: Elaboración propia

4.5 Registros geotécnicos

Se tiene como registros geotécnicos los mapeos y logueos, los cuales evidencian la caracterización de manera cuantitativa los índices de calidad del macizo rocoso y las condiciones estructurales.

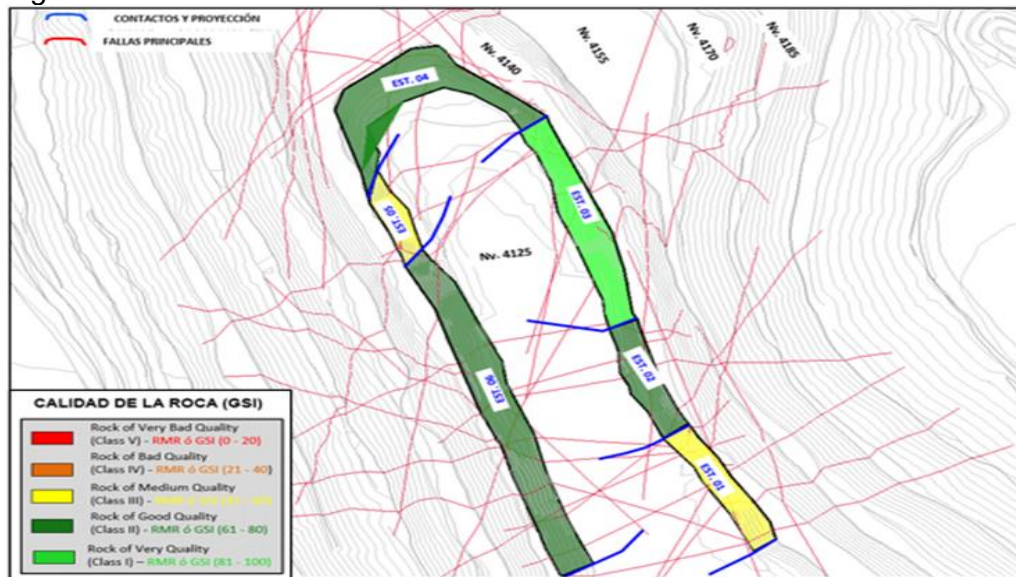
En tal sentido se muestra a continuación Mapeos Geotécnicos Bco. 4140; Proyección estructural Bco. 4125; Planos Predictivos al Nv.4125.

4.6 Mapeos geotécnicos

Los mapeos geotécnicos para el presente proyecto se han realizado por supervisores del área de geotecnia de la unidad minera constancia, dichos mapeos se ha venido realizado de manera continua. Estos mapeos son entregados al área de P&V para la consideración estructural y calidad del macizo rocos en el diseño de la malla y carga del explosivo.

Figura 20

Mapeo geotécnico



Nota: Elaboración propia

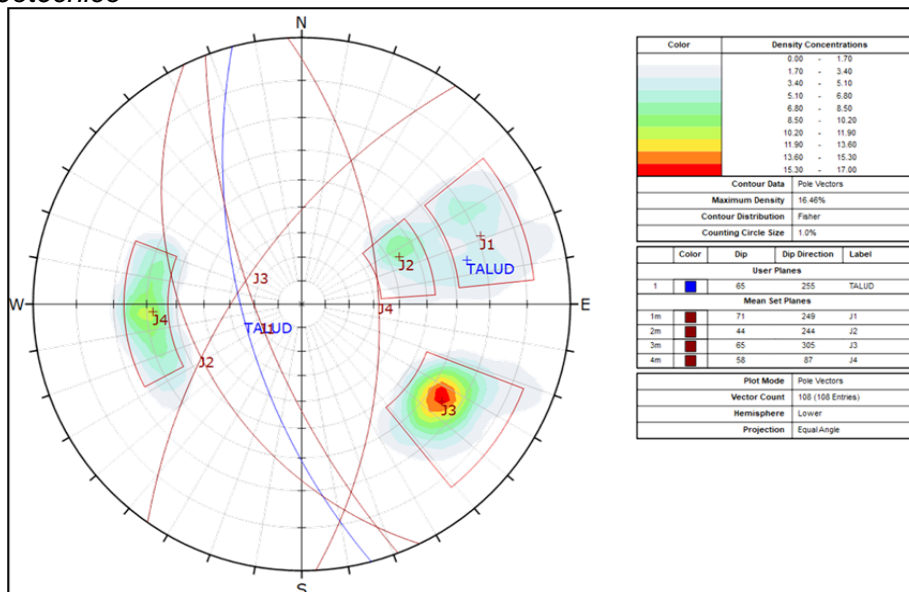
En la figura 20 se observa el registro geotécnico de estructuras y calidades del macizo rocoso donde se evidencia la clasificación del macizo rocoso in situ según la calidad de la roca (RMR o GSI).

4.7 Análisis estructural

La figura 21 se muestra 4 familias obtenidas después del análisis estereográfico de todas las estructuras en los bancos pilotos aplicados.

Figura 21

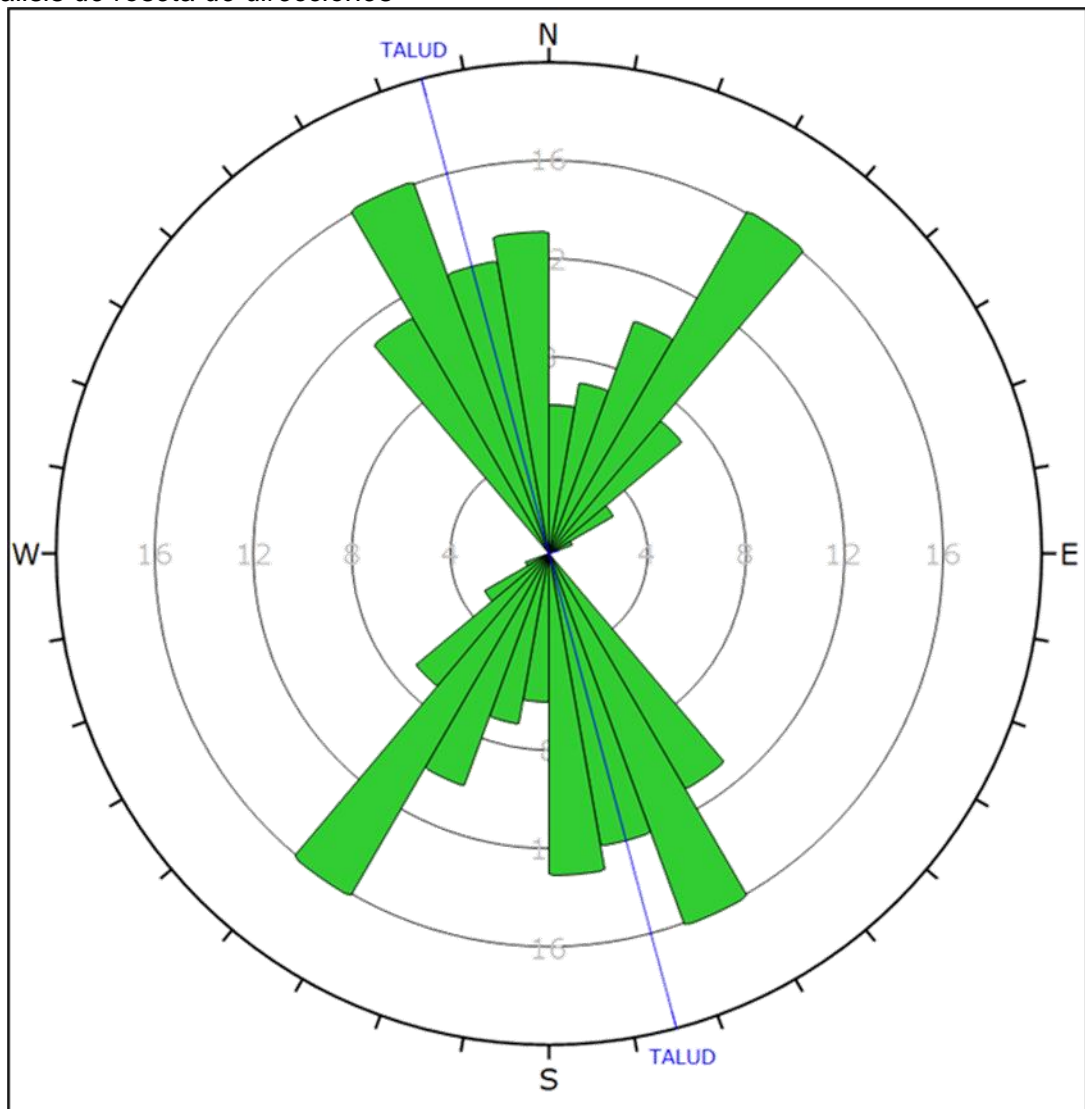
Mapeo geotécnico



Nota: Elaboración propia

Figura 22

Análisis de roseta de direcciones

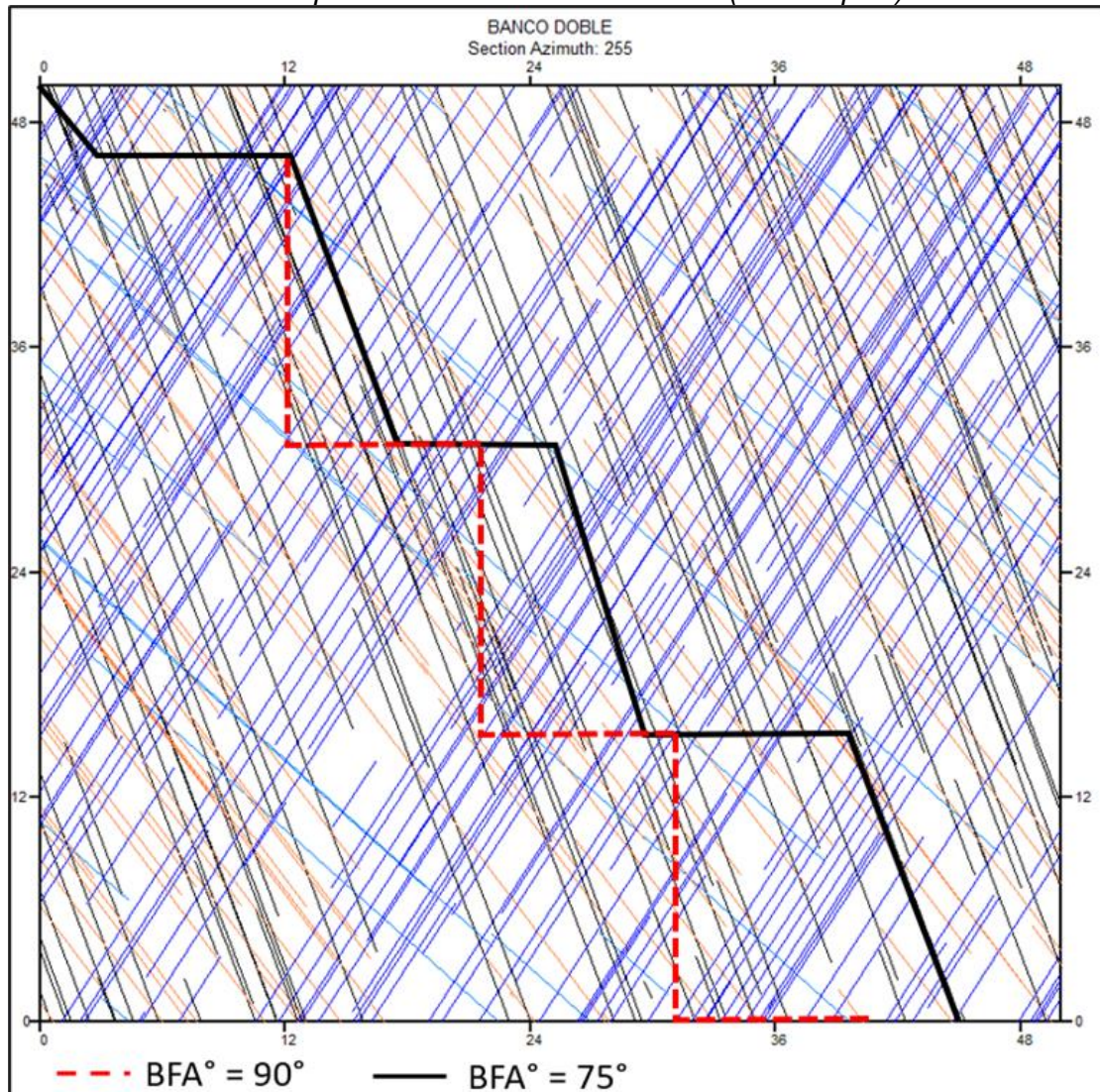


Nota: Elaboración propia

La figura 22 se muestra el DD de las familias, teniendo mayor predominancia hacia el N15°W, paralelo a la excavación.

Figura 23

Distribución estructural explícita en la sección de AZ 225° (anisotrópico)



Nota: Elaboración propia

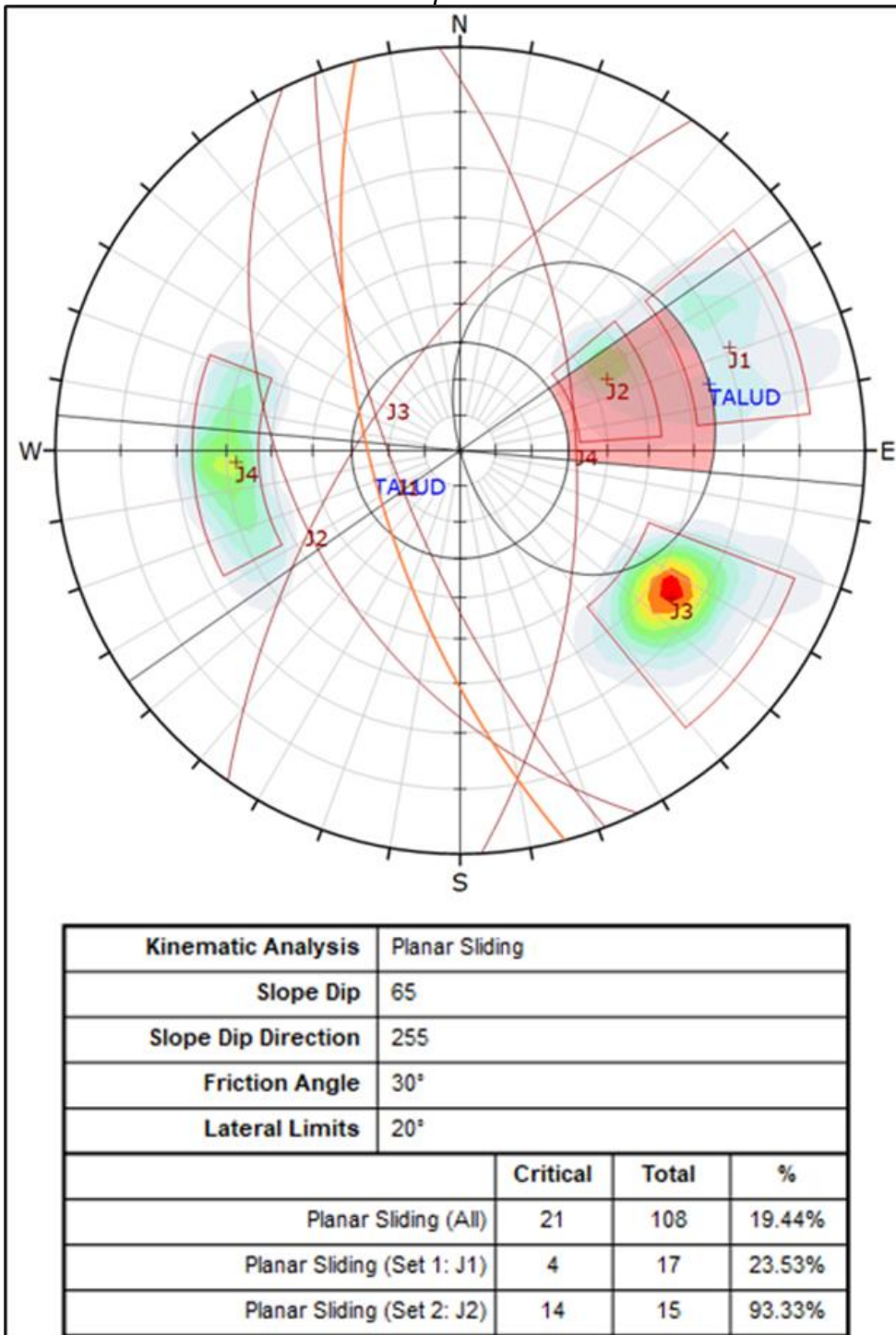
La figura 23 se muestra la distribución estructural en un perfil perpendicular al talud, en el cual se observa que hay estructuras paralelas a la excavación. Sin embargo, el talud de BFA 75° presenta el mismo buzamiento el cual los mecanismos planares queda expuesto o trabados con el pie del talud y el BFA 90° corta a las estructuras que forman el mecanismo de falla planar teniendo estructuras de dimensiones menores.

4.8 Análisis cinemático

La figura 24 se muestra el análisis de probabilidad de ocurrencia del mecanismo de falla planar, teniendo 93% con la familia J2 y 23.53% con la familia J1.

Figura 24

Análisis cinemático de mecanismo de falla planar.

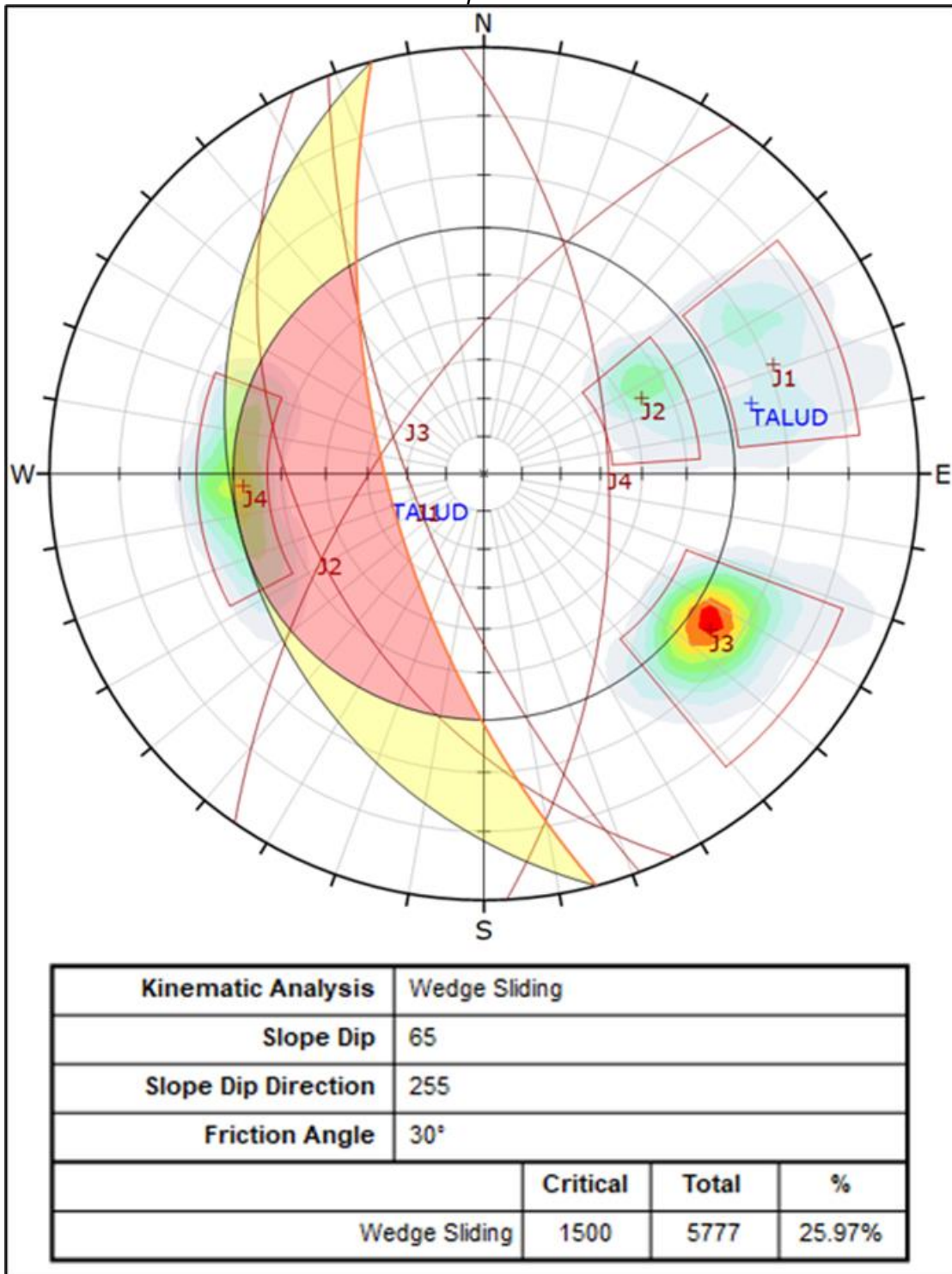


Nota: Elaboración propia

La figura 25 se muestra el análisis de probabilidad de ocurrencia del 25.97% del mecanismo de falla en cuña.

Figura 25

Análisis cinemático del mecanismo de falla por cuña.

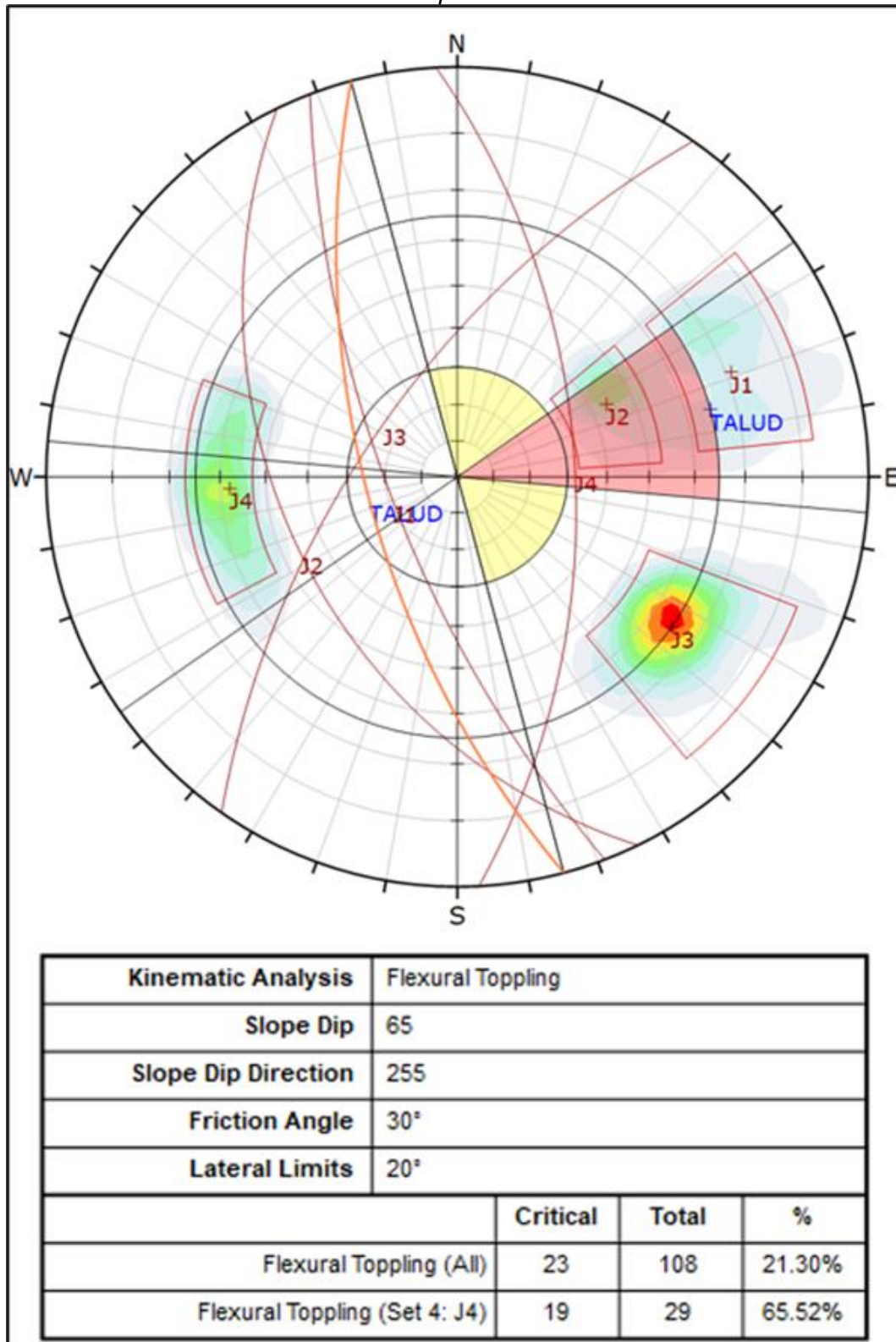


Nota: Elaboración propia

La figura 26 se muestra el análisis de probabilidad de ocurrencia del 21.30% del mecanismo de falla en volteo por flexión.

Figura 26

Análisis cinemático del mecanismo de falla por flexión.

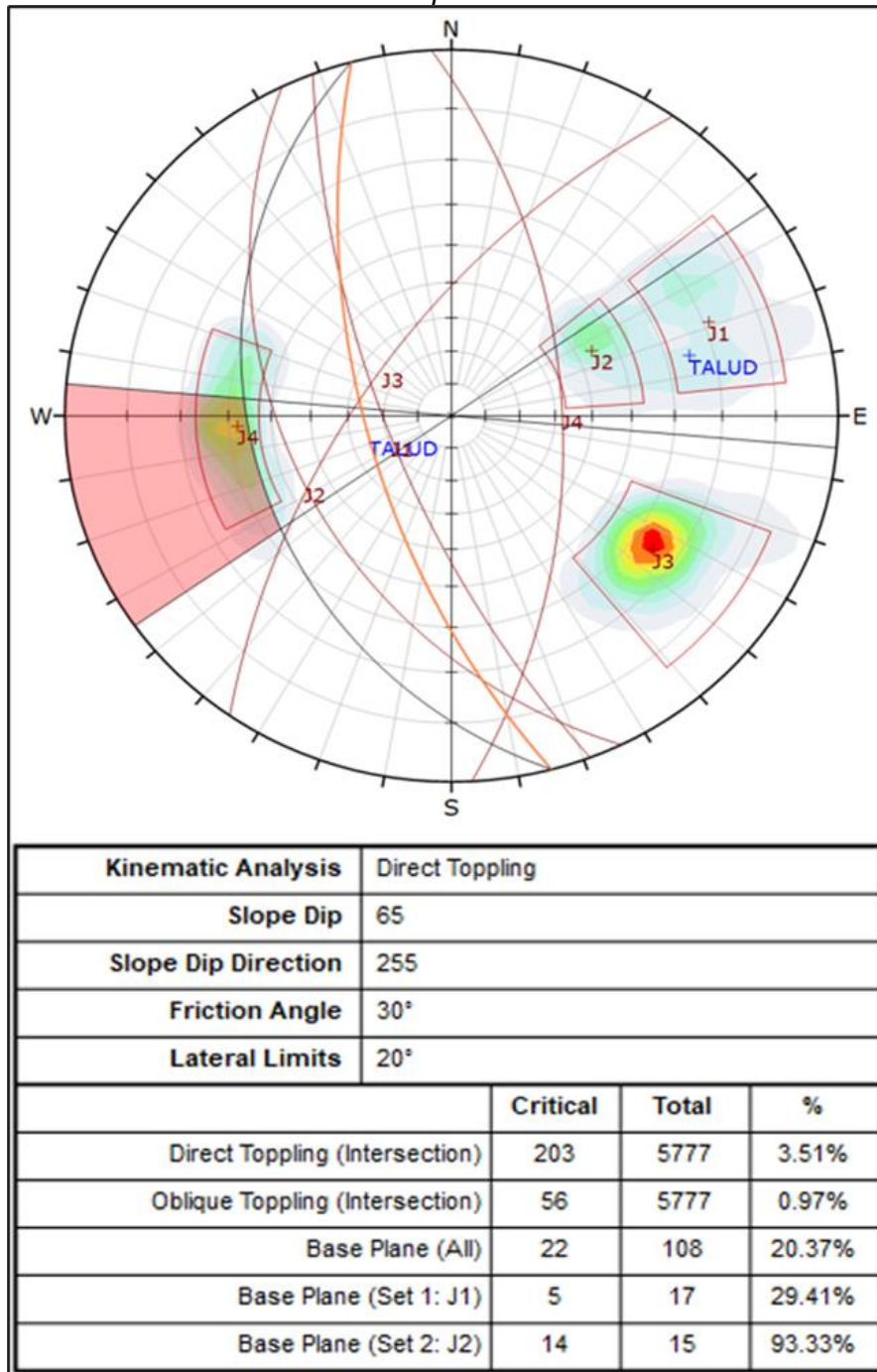


Nota: Elaboración propia

La figura 27, muestra el análisis de probabilidad de ocurrencia del 20.37% del mecanismo de falla en volteo por directo.

Figura 27

Análisis cinemático del mecanismo de falla por volteo.



Nota: Elaboración propia

4.9 Análisis de estabilidad

4.9.1 Análisis de estabilidad escala banco

Para este análisis de estabilidad física a escala banco, se toma las estructuras menores a 30 m, las cuales se evalúan en los diferentes mecanismos de falla más probables a ocurrir.

En la siguiente tabla se muestra las propiedades estructurales de las discontinuidades y fallas.

Tabla 7

Propiedades de resistencia de las estructuras mayores.

Material	Resistencia Máxima		Resistencia Residual	
	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)
Fallas	32	27	0	27

Nota: (Hudbay, 2025)

Tabla 8

Propiedades de resistencia de las estructuras por litología.

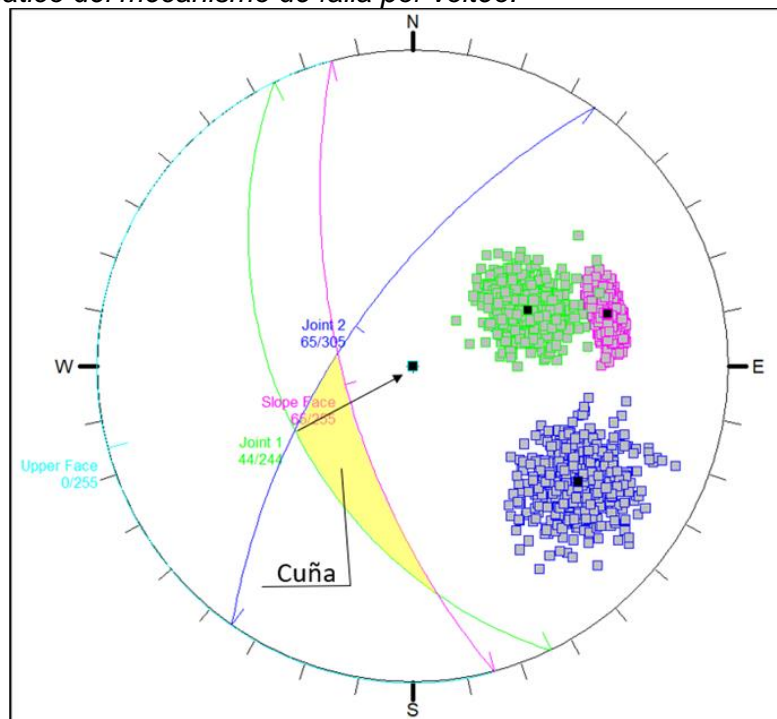
Material	Resistencia Máxima		Resistencia Residual	
	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)
Monzonita Porfírica	92	35	0	35
Sakam	105	36	0	36
Caliza	104	32	0	32
Diorita	107	31	0	31

Nota: (Hudbay, 2025)

La siguiente figura 28 se evidencia la cuña representada en el estereograma a nivel de banco.

Figura 28

Análisis cinemático del mecanismo de falla por volteo.

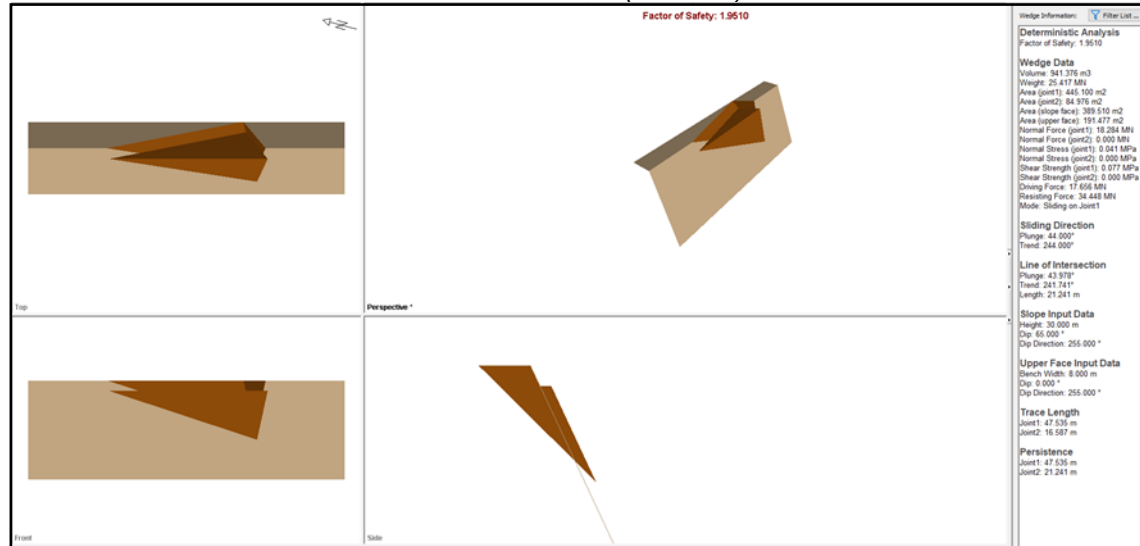


Nota: Elaboración propia

El factor de seguridad de la máxima cuña identificada a nivel banco es de 1.9, teniendo condición de estable.

Figura 29

Análisis de estabilidad física de la máxima cuña (FoS 1.9).

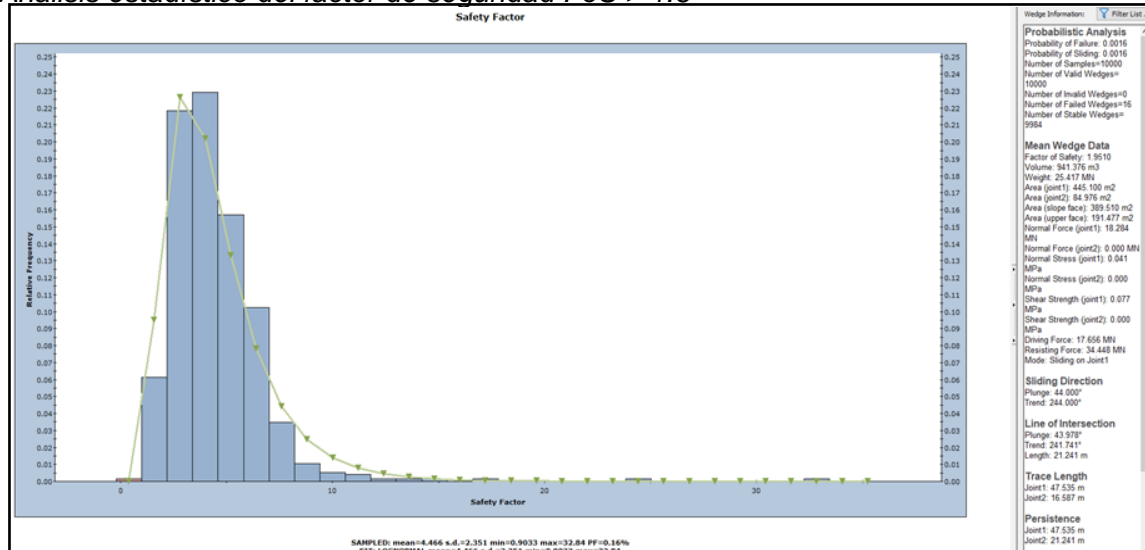


Nota: Elaboración propia

El análisis de sensibilidad del factor de seguridad respecto a la frecuencia relativa nos da una media mayor a 1.6, lo cual indica que la cuña es estable. Si revisamos el estereograma la cuña se encuentra trabada lo cual indica que es estable.

Figura 30

Análisis estadístico del factor de seguridad FoS > 1.6



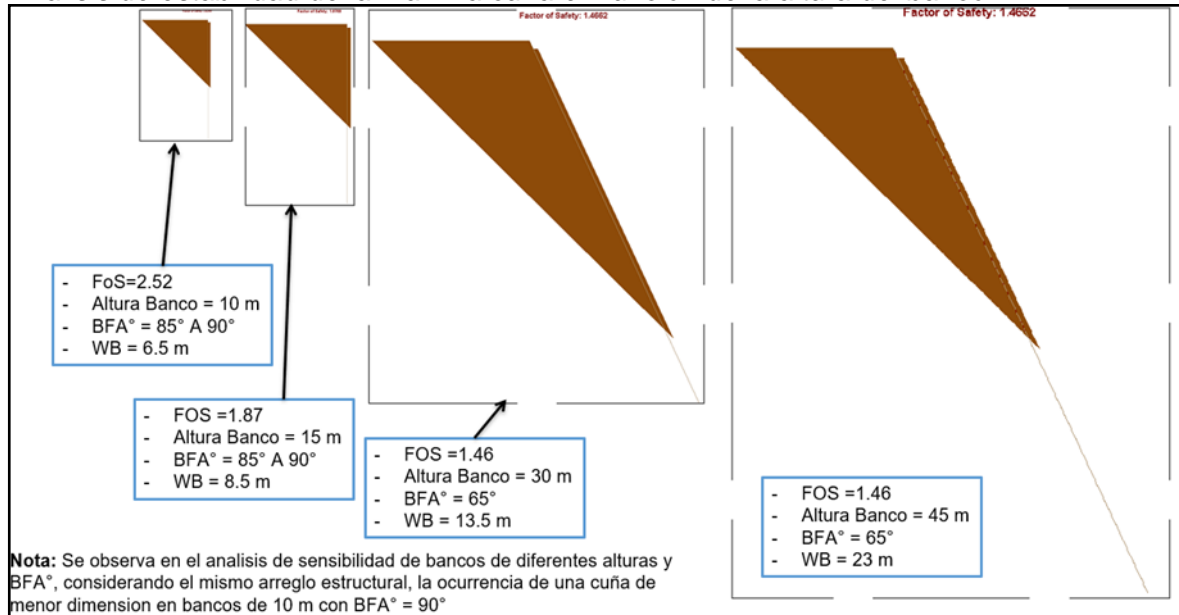
Nota: Elaboración propia

Para el proyecto se realizó análisis de estabilidad física de la máxima cuña de acuerdo con las alturas y ángulos propuestos en las alternativas de optimización.

En la figura 31 se observa que la cuña es estable incluso desarrollando un doble banco de 65° de BFA.

Figura 31

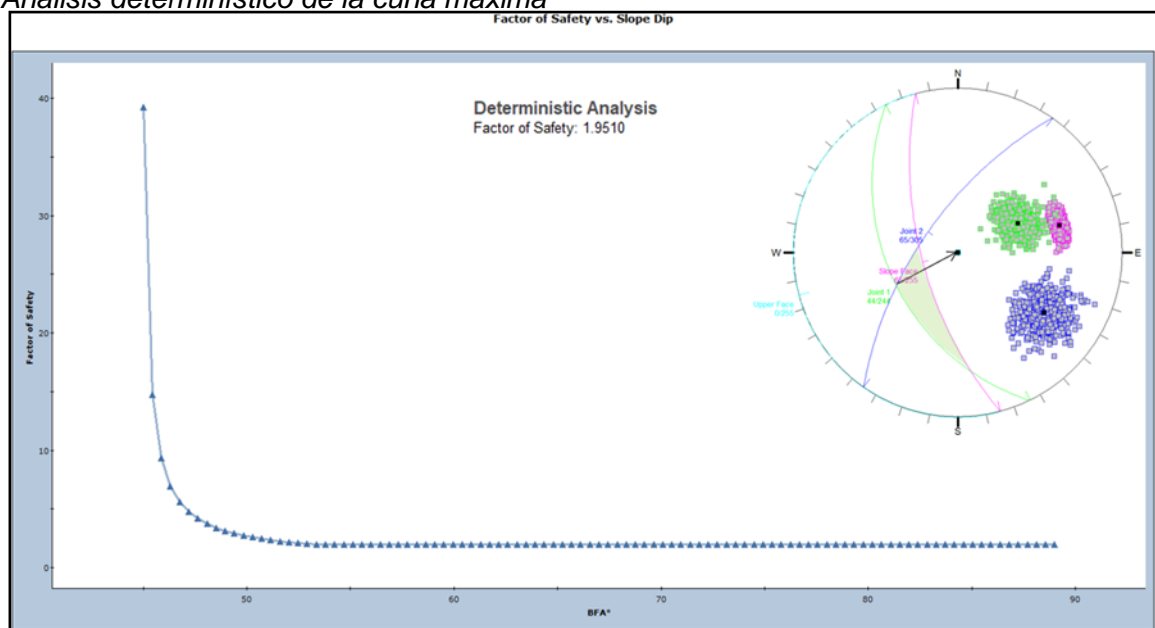
Análisis de estabilidad de la máxima cuña en función de la altura del banco.



En el análisis de sensibilidad de la siguiente figura 32, se observa que mientras más se incrementa en ángulo BFA, el factor de seguridad no cambia a partir de los 55° grados.

Figura 32

Análisis determinístico de la cuña máxima

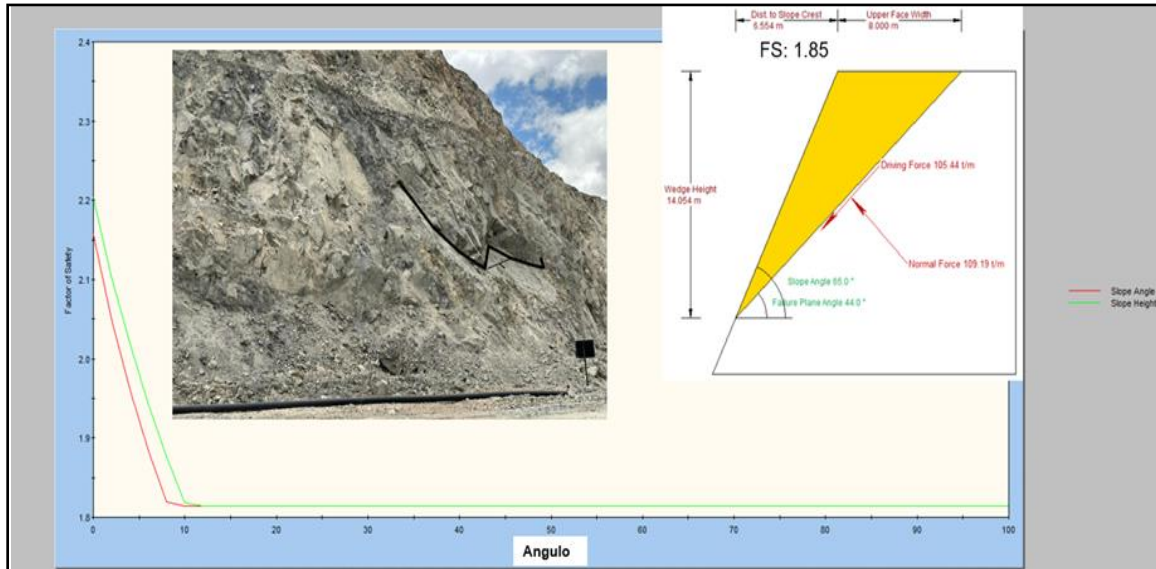


Nota: Elaboración propia

La siguiente figura 33, muestra el análisis de estabilidad física del mecanismo de falla planar, el factor de seguridad obtenido es de 1.85 lo cual muestra que es estable.

Figura 33

Análisis determinístico de la cuña máxima

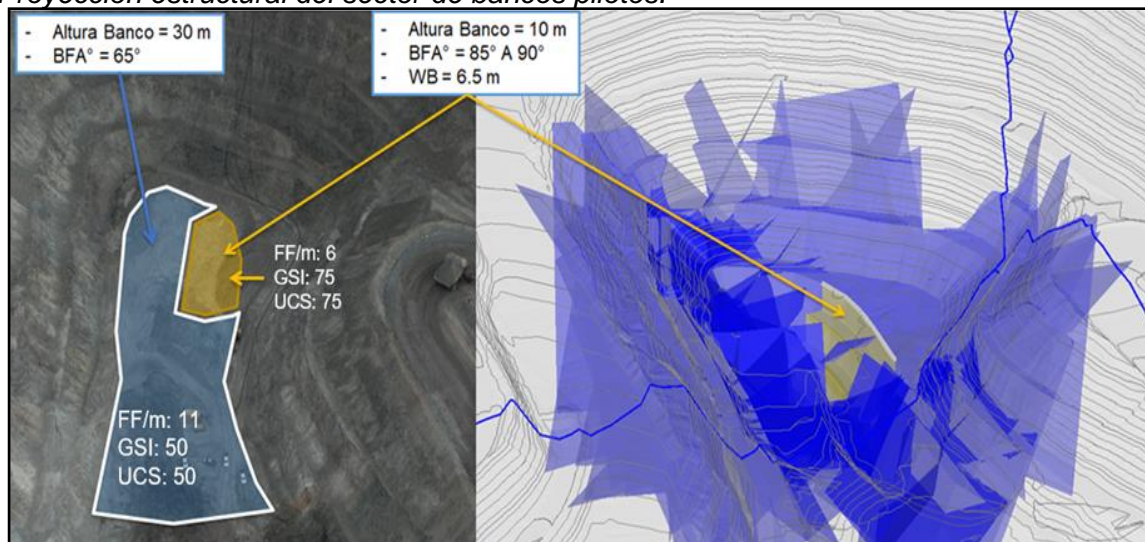


Nota: Elaboración propia

El diseño de los bancos pilotos en la zona de optimización del tajo Pampacancha. Además, se realizó mapeo en línea detalle y celdas geotécnicas, proyectando las fallas registradas a nivel de dos bancos como se observa en la figura 34.

Figura 34

Proyección estructural del sector de bancos pilotos.



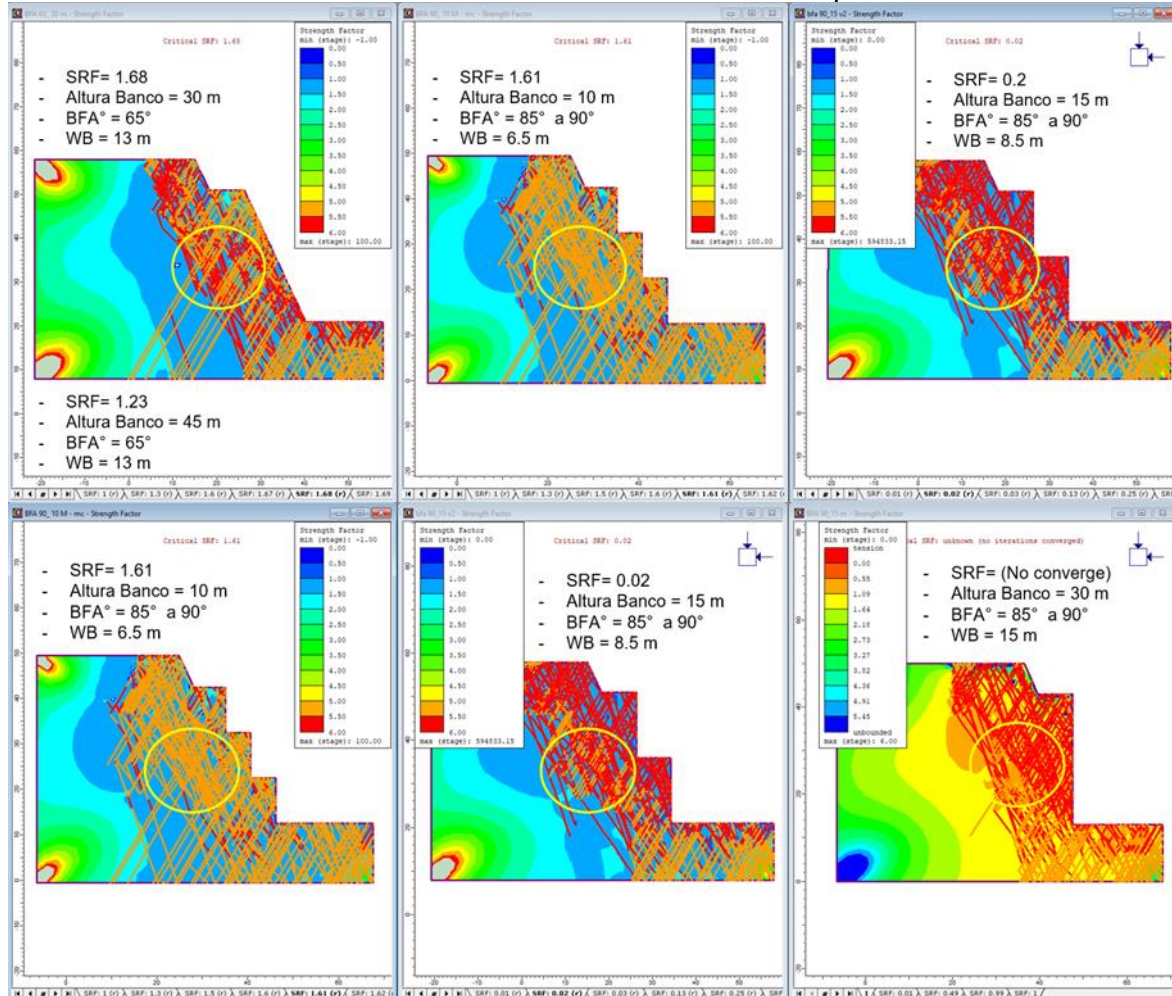
Nota: Elaboración propia

4.10 Análisis de estabilidad física tenseodeformacional

Se realizó el análisis mediante método de elementos finitos, con el software RS2 de las distintas alternativas teniendo como bancos óptimos los de BFA 75° y BFA 90° para la prueba piloto, los cuales presenta un factor de seguridad mayor a 1.3 (Estables).

Figura 35

Análisis tenseodeformacional a escala banco considerando múltiples escenarios



Nota: Elaboración propia

4.11 Análisis de estabilidad física escala interrampa

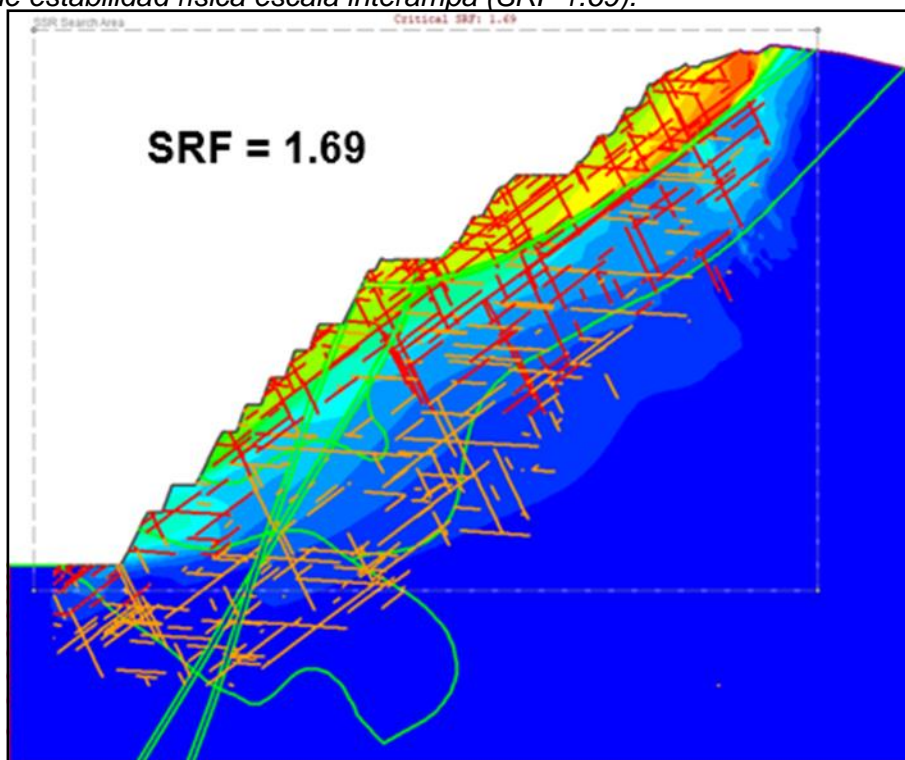
Para este análisis se tomó las propiedades de resistencia de la roca intacta y de las estructuras, se usó el criterio del percentil 35 para estimar la resistencia no confinada y triaxial para las distintas unidades geológicas, que a experiencia de Itasca es más representativa para la determinación de la resistencia del macizo rocoso para taludes de dimensiones como las del Tajo Pampacancha. La resistencia a la compresión de la roca

intacta de acuerdo con este criterio está en el rango de 55 a 90 MPa para el caso de Skarn, Caliza y Dioritas que se pueden calificar como rocas fuertes, mientras que para la Monzonita Porfírica está en el orden de los 30 MPa, que corresponde a una roca medianamente fuerte. La resistencia de las estructuras mayores tiene un ángulo de fricción de 27° y una cohesión máxima de 32 kPa. Por otro lado, la resistencia de las estructuras menores tiene un ángulo de fricción que va de 31 a 36° y una cohesión máxima de 90 a 110 kPa. Se considera que, en condiciones residuales, las estructuras perderán cohesión y tendrán una resistencia netamente fricción.

Como se observa en la figura 36, el SRF es de 1.69, lo cual indica que el ángulo interrampa y global son estables.

Figura 36

Análisis de estabilidad física escala interrampa (SRF 1.69).



Nota: Elaboración propia

4.12 Ejecución de los bancos proyectados analizados

Posterior a todas las evaluaciones de estabilidad física se procede a ejecutar banco de BFA de 75°, altura de 15 m en la pared oeste y banco de BFA de 90°, altura de 15 m en la pared este.

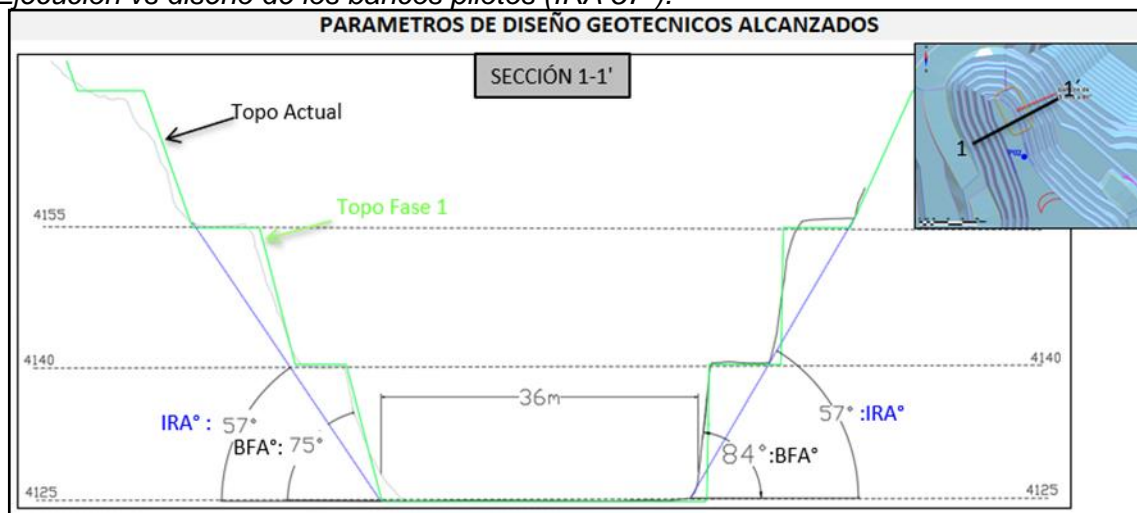
En base a los resultados anteriores, se han definido las zonas de diseño y restricciones planteadas para los bancos piloto los cuales se muestran en la Figura 04. El detalle de las modificaciones de diseño planteadas.

- Diseño Optimizado Fase 2 zona 01, se había propuesto un diseño con IRA de 47°.
- Diseño Optimizado “post” DDH Fase 2 zona 01, el presente estudio se plantó un IRA de 57°.

En la figura 37 se observa Se plantea bancos perpendiculares debido a la optimización de equipos de producción. La optimización bancos verticales aumenta en 10° el IRA° teniendo un IRA de remate de minado de 57° a comparación de un banco doble.

Figura 37

Ejecución vs diseño de los bancos pilotos (IRA 57°).



Nota: Elaboración propia

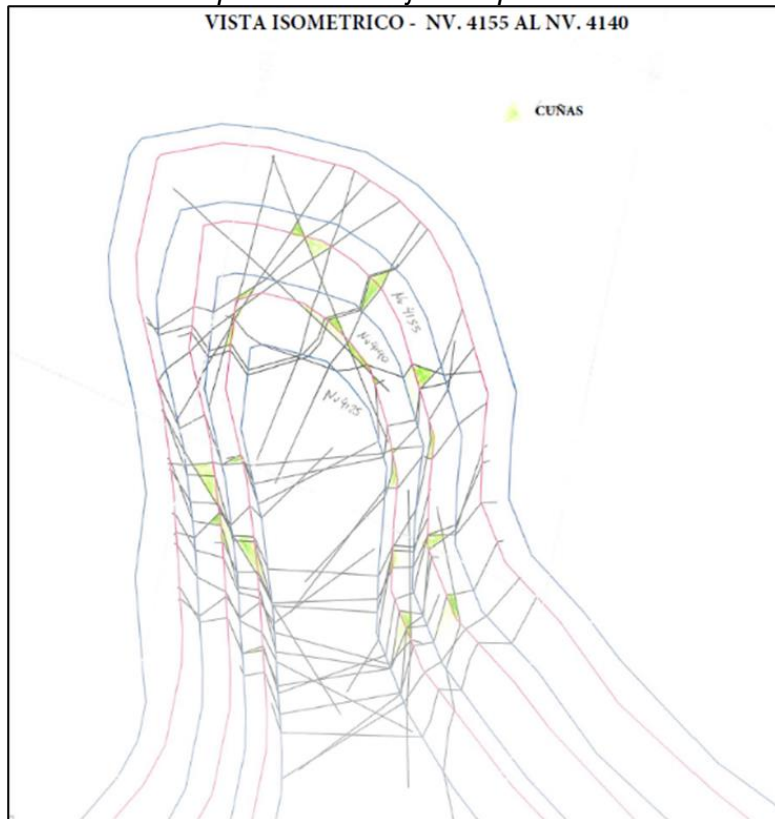
4.13 Planos predictivos

Los planos predictivos es una herramienta que utilizara para identificar y ubicar de forma georreferenciada las fallas locales a escala banco, anticipándose a los perfilados. Esto ayuda a realizar voladura controladas en zonas con debilidad y durante el perfilado se verifica si la estructura esta trabada o no está trabada, en caso no este trabada se procede a descargar.

En la siguiente figura 38, se observa la proyección estructural de los bancos superiores, los cuales forman mecanismos de falla tipo cuña y planares, estos fueron mitigados (descargados) durante el minado.

Figura 38

Vista Isométrico de los bancos pilotos en el tajo Pampacancha.

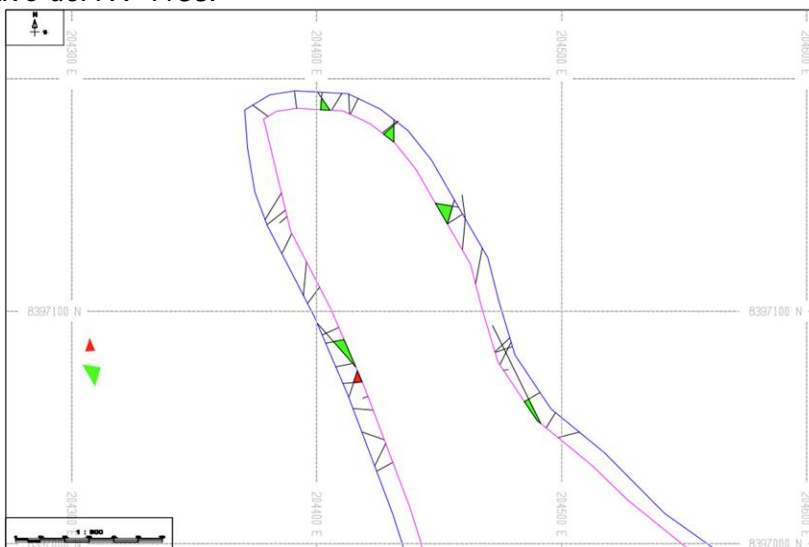


Nota: Elaboración propia

En la figura 39 y 40, se proyecta las estructuras, las cuales forman cuñas y planares a escala banco los cuales deben ser considerados durante la operación para su debida gestión de riesgos.

Figura 39

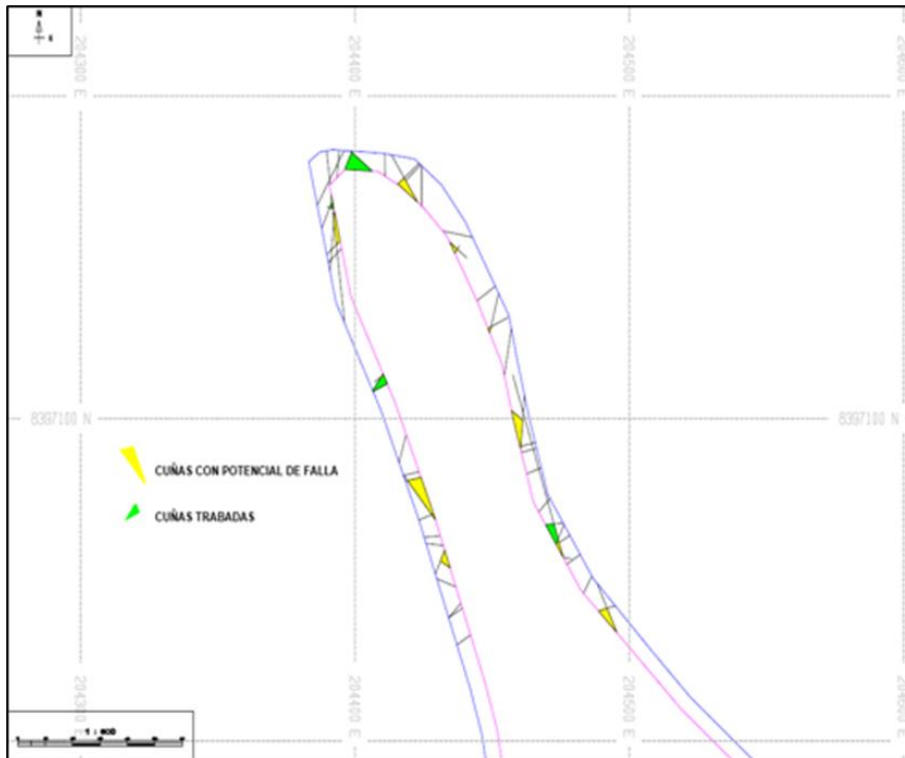
Plano predictivo del NV 4155.



Nota: Elaboración propia

Figura 40

Plano predictivo del NV 4140.



Nota: Elaboración propia

4.14 Seguimiento y control de bancos pilotos

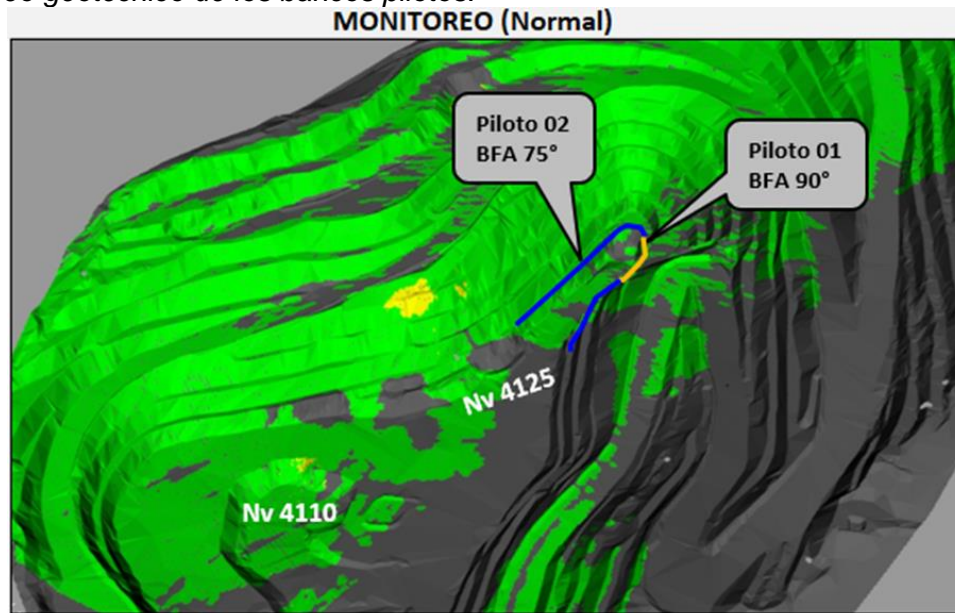
A la fecha de presentando el presente reporte se concluyó con el minado del Bco. 4125 hacia los bancos pilotos teniendo resultados positivos en la cara de los taludes ya que no hubo necesidad de perfilar con la excavadora, el perfilado se realizó con la Pala 5600 según el avance de minado del sector, en algunas zonas se puede apreciar el marcado de las cañas lo que traduce en un buen control de voladura.

4.15 Monitoreo

El monitoreo de los tajos pilotos al igual que todos los tajos de la operación de minera Constancia se realizan de manera automatizada, mencionando uno de ellos al monitoreo con RADAR, con lo cual tenemos un seguimiento en tiempo real del comportamiento de los taludes, como es el caso del noreste tajo Pampacancha donde se encuentra los Bancos Pilotos, materia de la presente realizaron La condición de monitoreo evidencia el buen comportamiento de los bancos pilotos (75° y 90°), teniendo alerta verde (se puede continuar con la operación).

Figura 41

Monitoreo geotécnico de los bancos pilotos.



Nota: Elaboración propia

4.16 Seguimiento de campo

El seguimiento en campo de la implementación de los bancos pilotos, es importante para anticipar a la operación de posibles inestabilidades locales identificadas en los planos predictivos.

La siguiente figura 42, se ve un buen desempeño de los ángulos ejecutados, los cuales responden muy bien para la optimización.

Figura 42

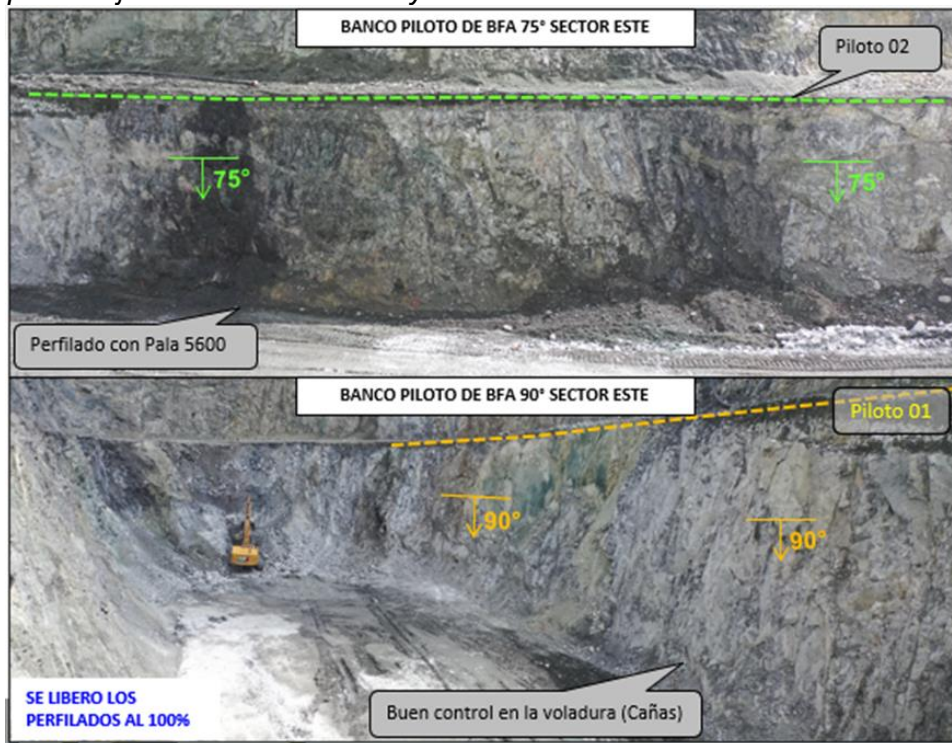
Vista panorámica banco piloto nivel 4125.



Nota: Elaboración propia

Figura 43

Bancos pilotos ejecutados de BFA 75° y BFA 90°.



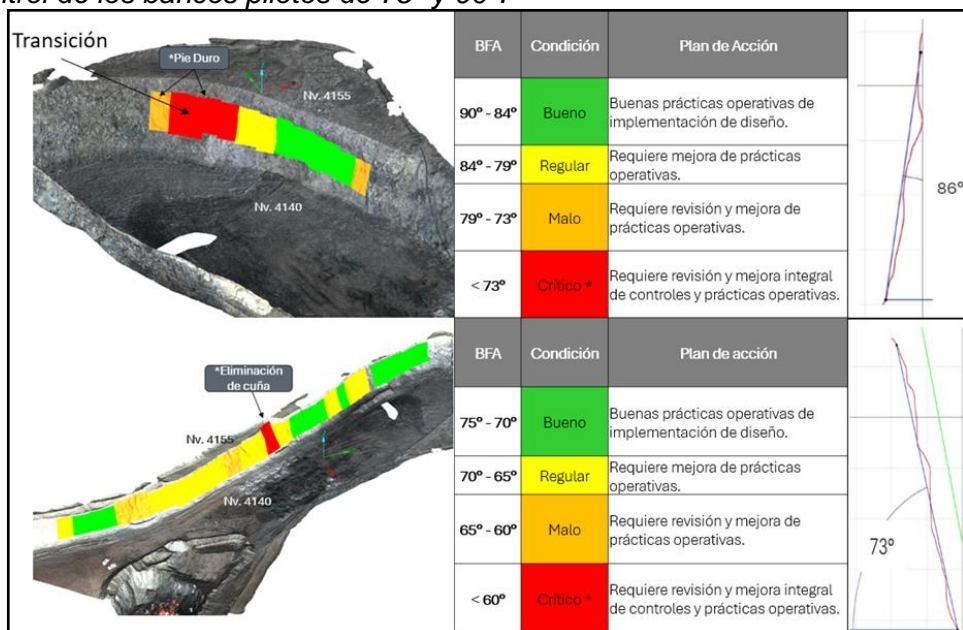
Nota: Elaboración propia

4.17 Full control

El full control de los bancos pilotos ejecutados del 4055 al 4025, tiene un cumplimiento de 86° en promedio en el BFA de 90° y 73 en promedio en el BFA° de 75°.

Figura 44

Full control de los bancos pilotos de 75° y 90°.



Nota: Elaboración propia

4.18 Antes y después

Con la aplicación de los bancos verticales se permitió la recuperación de mineral en el banco 4140, ya que con el diseño inicial solo se minaría hasta el banco 4155.

Tabla 9

Datos del antes y después de la aplicación de bancos verticales.

BANCO 4140	ANTES	DESPUES
Tonelaje del mineral	0 kTN	53 kTn
Finas de Cu	0	100 Tn
Utilidad	0	\$ 1 M
Vida útil	0 meses	1 mes

Nota: (Hudbay, 2025)

4.19 Contrastación de la hipótesis

La prueba será llevada a cabo mediante la prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk y se aplicará en la variable “RMR” dentro de la muestra, la cual condiciona a la aplicación de los bancos verticales.

Formulación de la hipótesis:

- Hipótesis nula (H0): Los datos de RMR siguen una distribución normal.
- Hipótesis alternativa (H1): Los datos de RMR no siguen una distribución normal.

Criterios de decisión:

- Si $p\text{-valor} < 0.05$, se rechaza H0: los datos no son normales.
- Si $p\text{-valor} \geq 0.05$, no se rechaza H0: los datos pueden considerarse normales.

Para esta prueba se evaluó a la variable RMR de los datos obtenidos de las estaciones de mapeo geotécnico de la muestra del Tajo Pampacancha y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10

Datos RMR obtenidos de las estaciones de mapeo geotécnico.

ESTACIONES	RMR
1	67
	65
	71
	62
2	51
	42
	53
	40
	41
3	78
	68
	72
	69
	62
4	86
	95
	89
	93
	100
5	72
	61
	70
	78
	63
6	56
	49
	44
	50
	51

Nota: (Hudbay, 2025)

Aplicando la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en la variable RMR, se obtuvieron los siguientes resultados estadísticos:

Estadístico W: 0.962

p-valor: 0.360

En función a los criterios de decisión y la formulación de la hipótesis, se interpretan los resultados de la siguiente forma:

Dado que el p-valor = 0.360 > 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, los valores de RMR presentan una distribución normal según la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

La muestra evaluada presenta datos de RMR de calidad intermedia, cercana al promedio y son pocos los sectores con valores extremos (valores muy altos o bajos). Es posible aplicar los bancos verticales en la muestra seleccionada

Conclusiones

La ejecución y seguimiento de los bancos pilotos fueron exitosos teniendo un ángulo interrampa IRA de 57° el cual muestra oportunidades de negocio para las futuras fases de minado tanto en el Pajo Pampacancha.

Se realizó seguimiento al comportamiento del Banco Piloto, durante el proceso, las condiciones de forma general fueron estables. En general los bancos pilotos ejecutados en el tajo Pampacancha responden mejor de lo que se esperaba en el inicio del proyecto.

Se planteó y ejecuto el banco de BFA 90° , de altura 15 m en la pared Nor-Este del tajo Pampacancha fase I, teniendo buenos resultados en temas de estabilidad y desempeño durante la ejecución.

Se planteó y ejecuto el banco de BFA 75° , de altura 15 m en la pared Nor-Este del tajo Pampacancha fase I, teniendo buenos resultados en temas de estabilidad y desempeño durante la ejecución.

El banco de BFA° de 75° y 90° , altura de 15 m y con un ancho de berma de 6.0 m y 8.5 m respectivamente, optimiza el talud Interrampa de 47° a 57° .

El banco de BFA 75° en skarn es estable. Además, operativamente es más fácil de construir.

El banco de BFA 90° en calizas es estable.

En los análisis de estabilidad física el talud de 15 m cumple los criterios de aceptabilidad de estabilidad física.

Los Modelos de Red de Fracturas Discretas (DFN) son un pilar importante en los análisis de estabilidad realizados debido a que aportan una representación de la información de las discontinuidades, lo que contribuye a tener resultados más exactos y precisos que permitan la toma de decisiones.

El análisis de estabilidad física tensodeformacional modela el comportamiento de esfuerzos y deformaciones, lo que al complementarse con el modelo DFN, nos da

resultados de una simulación casi realista, permitiendo tomar controles y decisiones operativas.

Se realizó seguimiento al comportamiento del Banco Piloto Vertical 1, durante el proceso, las condiciones de forma general fueron estables. En general los bancos pilotos ejecutados en el tajo Pampacancha responden mejor de lo que se esperaba en el inicio del proyecto.

Los bancos pilotos en el NV 4125 mantienen el diseño obteniendo un ancho operativo de 36 m llegando a lo esperado.

Los controles de P&V fueron excelentes, evidenciando una cara de talud limpia con medias cañas de perforación facilitando el perfilado.

El perfilado del BFA 75° se desarrolló con la Pala 5600, lo cual evidencio que el perfilado es mucho más rápido que con excavadora.

Los taludes pilotos no tuvieron geometrías convexas que puedan generar inestabilidades por desconfinamientos debido a la velocidad del minado.

Recomendaciones

Se recomienda que estos pilotos deben ser plasmados en el diseño de la fase 2 del tajo Pampacancha y fase 8, 9 y 10 en el tajo Constancia que presente características del macizo rocoso similar. Esto debido a que, al aumentar los ángulos escala banco e Interrampa se aumenta la recuperación de mineral en profundidad y disminuye el desmonte.

Se recomienda que los perfilados se realicen con la pala (equipo gigante) para minimizar los tiempos de los equipos auxiliares.

Se recomienda conformar una zanja de 3 metros de profundidad con la excavadora para evitar sobre rotura en las crestas durante el proceso de minado a diseño.

Es importante la evaluación previa de la litología, alteración y mapeo a detalle de los sectores en los cuales se desee optimizar el diseño.

No aplicar criterios geomecánicos que no sean válidos para las condiciones de la zona en cuestión.

Se recomienda generar múltiples escenarios en los análisis de estabilidad considerando escenarios pesimistas, realistas y optimistas.

Referencias bibliográficas

- Agreda, J. (2018). *Optimización del carguío y acarreo aplicando el sistema controlsense en la mina constancia, cusco, 2018*. [Tesis de licenciatura, Universidad Alas Peruanas]. Repositorio UAP
https://repositorio.uap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12990/4327/Tesis_optimiza%20ci%20c3%b3n_cargu%20c3%ado.acarreo_sistema%20controlsense_mina%20constancia_Cusco.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anglo American. (2025). *Open-Pit Mining Definition*. Recuperado el 15 de mayo 2025 de <https://www.angloamerican.com/futuresmart/stories/our-industry/mining-explained/mining-terms-explained-a-to-z/open-pit-mining-definition>
- Arias, Fidas. *El proyecto de investigación*. Caracas, Venezuela: editorial Episteme, 2006
- Ayala, L. (2023). *Geología estructural. Geología 3D*. <https://3dgeol.com/analisis-estructural-en-geologia-como-deberia-hacerse/>
- Balestrini, M. (2006). *Cómo se elabora el proyecto de investigación*. Servicio Editorial Consultores Asociados BL
- Call, R. D. (1987). *Rock slope stability analysis*. In W. A. Hustrulid (Ed.), *Open pit mine planning and design* (pp. 605–628). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Colegio de Ingenieros del Perú. (2015). *Estabilidad de taludes*. Revista Civilízate. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/download/16157/16579/>
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Espinoza, A. (2023) “*Evaluación De Los Parámetros Geométricos Del Talud, Para Garantizar La Estabilidad Del Tajo Superficial Raúl Rojas En La Unidad Minera Cerro De Pasco Compañía Minera Volcan S.A.A. 2022*” [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio UNSCH. <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/63d3d769-ba2d-47f2-a5ba-e8232be96809/content>

- Geotecnia Iquique. (s.f.). *Análisis de tensión-deformación en geotecnia para la estabilidad de taludes*. Recuperado el 16 de mayo de 2025, de:
<https://www.geotecniaiquique.com/geotecnia/ingenieria-de-cimentaciones/tension-deformacion-del-suelo>
- Hernández Sampieri, R. (2023). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (2da ed.). McGraw-Hill.
- Hernández, Y. (2020). *Construcción y Calibración de Modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFN) para el Análisis de Estabilidad de Cuñas en Fase 5*. Ds, Rajo Don Luis. Codelco - División Andina, Región De Valparaíso, Chile [Tesis de licenciatura, Universidad de Concepción]. Repositorio UDEC.
https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=An%C3%A1lisis+estructural+aplicado+al+dise%C3%B1o+de+taludes+con+%C3%A1ngulos+verticales+en+minas+a+cielo+abierto+con+modelos+DFN&btnG=
- Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. Rocscience.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). The Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). *The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2019 edition*. Rocscience.
- Jessop, J. (2012). *Optimización de la explotación minera*. ABB Group.
https://library.e.abb.com/public/527e87d38176d987c1257a7e0036aaa2/39-43%203m210_FS_72dpi.pdf
- LibreTexts Español. (s.f.). *Minería a Tajo Abierto*. Recuperado el 15 de mayo de 2025, https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geología/Libro%3A_Fundamentos_de_Geología_%28Schulte%29/12%3A_Implicaciones_geológicas/12.10%3A_Minería_a_Tajo_Abierto
- Mecánica de Suelos Arica. (s.f.). *Resistencia al corte*. Recuperado el 15 de mayo de 2025, de <https://mecanicadesuelosarica.com/mecanica-de-suelos/resistencia-al-corte>

- Ortega, E. (2022). *Caracterización geotécnica para diseño de taludes en tajo San Gerardo de la Unidad Minera Atacocha – 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del centro del Peru]. Repositorio UNCP
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9263/T010_44111414_T.pdf?
- Raffino, Equipo editorial, Etecé (2023). *Falla geológica*. Enciclopedia Concepto. Recuperado el 14 de mayo de 2025 de <https://concepto.de/falla-geologica/>.
- Rojas, I. (2021). *Noticias Hudbay Minerals LexLatin*. <https://lexlatin.com/noticias/hudbay-minerals-modifica-lineas-de-credito-amplia-financiamiento>
- Santander, C. (2019). *Metodología Rock Engineering System Para Determinar Estabilidad Geomecánica En Taludes Mineros*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio UCHILE.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/174807/Metodolog%C3%ADa-rock-engineering-system-para-determinar-estabilidad-geomec%C3%A1nica-en-taludes-mineros.pdf>
- Santos, B., Gabulle, H., & Gutiérrez, G. (2012). *Modelo de análisis geotécnico para proyectos de diseño de talud de un tajo abierto – Caso Proyecto Chucapaca / Hammond Reef*. Ingemmet. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG16-088.pdf>
- Schulz, K. (2019). *Construcción de modelos de redes de fracturas discretas (DFN) a escala fase, para el análisis de estabilidad y geometrías de inestabilidades estructurales en el Rajo Don Luis, Codelco División Andina, V Región De Valparaíso, Chile* [Tesis de licenciatura, Universidad Andre Bello]. Repositorio UNAB.<https://es.scribd.com/document/540734218/a129784-Schulz-K-Construccion-de-modelos-de-redes-2019-Tesis-3>
- Tamayo y Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica* (5ta ed.). Editorial Limusa.

Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2017). *Estabilidad de taludes*.

RevistaCivilizate.<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/download/16157/16579/>

Wikipedia contributors. (2024). *Estereograma*. Recuperado en:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Estereograma>

Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2017). *Rock slope engineering: Civil and mining* (5th ed.). CRC Press.

Zuloaga, I. (2023). Ángulo. *Geotecnia Online*. Recuperado el 15 de mayo de 2025, de

<https://geotecnia.online/diccionario/angulo/>

Zuloaga, I. (2023). *geotecnia.ai*. <https://geotecnia.ai/que-es-un-mapa-geotecnico/>

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Análisis Estadístico de UCS de la Unidad Geotécnica Skarn	1
Anexo 2: Análisis Estadístico de UCS de la Unidad Geotécnica Caliza	3
Anexo 3: Análisis Estadístico de Propiedades Físicas de la Unidad Geotécnica Skarn	4
Anexo 4: Análisis Estadístico de Propiedades Físicas de la Unidad Geotécnica Caliza....	5
Anexo 5: Análisis Estadístico de mi de la Unidad Geotécnica Skarn.....	6
Anexo 6: Análisis Estadístico de mi de la Unidad Geotécnica Caliza	7
Anexo 7: Relación de Software Geotécnico	8

Anexo 1: Análisis Estadístico de UCS de la Unidad Geotécnica Skarn

Laboratorio	ID Perforación	Profundidad		Litología	Alteración	UCS (Mpa)	E (Gpa)	v
		Desde	Hasta					
GEMEC GEOMECÁNICA LATINA S.A. (2024)	PA-23-001 UCS-06	163,91	164,21	SKARN	SKARN	85,07	47,26	0,184
	PA-23-001 UCS-07	252,48	252,7	SKARN	SKARN	35,2	36,25	0,216
	PA-23-010 UCS-06	206,93	107,15	SKARN	SKARN	98,02	35,54	55,7
	PA-23-010 UCS-07	210	210,28	SKARN	SKARN	131,84	27,14	48,08
	PA-23-011 UCS-02	89,41	89,67	SKARN	SKARN	90,67	40,09	0,165
	PA-23-011 UCS-03	112,01	112,2	SKARN	SKARN	28,29	10,08	0,162
	PA-23-014 UCS-02	124,44	124,68	SKARN	SKARN	51,18	31,21	0,154
	PA-23-024 UCS-01	22,87	23,13	SKARN	SKARN	54,41	29,58	0,157
	PA-23-024 UCS-02	32,55	32,82	SKARN	SKARN	128,73	32,59	0,24
	PA-23-024 UCS-03	47,4	47,63	SKARN	SKARN	125,61	41,71	0,171
	PA-23-024 UCS-04	63,24	63,45	SKARN	SKARN	123,05	37,78	0,167
	PA-23-024 UCS-05	77,38	77,61	SKARN	SKARN	12,4	2,82	0,196
	PA-23-027 UCS-02	65,5	65,78	SKARN	SKARN	23,4	13,88	0,236
	PA-23-027 UCS-05	257,6	257,88	SKARN	SKARN	46,94	34,4	0,146
	PA-23-036 UCS-08	392,36	392,6	SKARN	SKARN	67,85	39,31	0,199
	ANDES GEOLAB S.A.C.(2023)	PA-22-027/7R-02/UCS-05	70,05	70,30	SKN	SKARN	31,8	34,2
PA-22-031/UCS-03/UCS-03		57,54	59,80	SKN	SKARN	162,9	77,5	0,25
PA-22-032/UCS-03		111,62	111,95	SKN	SKARN	78,1	35,1	0,22
PA-22-044/7X-02 [B]/UCS-08		91,32	91,49	SKN	SKARN	78,2	32,2	0,21
PA-22-058/UCS-02		67,56	67,78	SKN	SKARN	32,0	17,7	0,26
PA-22-064/7R-01/UCS-05		68,28	68,55	SKN	SKARN	47,4	26,1	0,18
PA-22-067/UCS-05		149,61	149,90	SKN	SKARN	34,0	27,9	0,21
PA-22-069/7R-01/UCS-04		141,70	141,92	SKN	SKARN	124,5	98,8	0,21
PA-22-107/7R-02/UCS-12		48,82	49,12	SKN	SKARN	109,6	36,1	0,18
PA-22-107/UCS-04/UCS-04		79,02	79,26	SKN	SKARN	84,5	58,6	0,23
PA-22-107/7R-03/UCS-13		95,60	95,82	SKN	SKARN	52,7	51,0	0,24
PA-22-107/7R-07/UCS-15		268,50	268,71	SKN	SKARN	102,8	75,6	0,22
PA-22-107/UCS-10/UCS-10		288,20	288,40	SKN	SKARN	14,1	17,9	0,21
PA-22-108/7X-01 [C]/UCS-12		81,60	81,80	SKN	SKARN	73,9	42,1	0,22
PA-22-108/UCS-02		59,88	60,12	SKN	SKARN	43,2	28,6	0,19
PA-22-108/7X-01 [A]/UCS-11		73,40	73,60	SKN	SKARN	84,1	33,7	0,21
PA-22-108/UCS-05/UCS-05		128,90	129,20	SKN	SKARN	68,9	51,2	0,20
PA-22-108/7R-07/UCS-13		276,70	276,88	SKN	SKARN	17,8	15,0	0,13
PA-22-108/UCS-09		313,07	313,33	SKN	SKARN	55,9	66,3	0,26
PA-22-108/7R-04/UCS-14		343,20	343,44	SKN	SKARN	89,3	106,2	0,24
PA-22-115/7R-02/UCS-10		82,70	83,00	SKN	SKARN	177,9	44,7	0,25
PA-22-115/UCS-06/UCS-06		115,10	115,36	SKN	SKARN	37,7	6,7	0,19
PA-22-115/7R-04/UCS-11		190,30	190,60	SKN	SKARN	81,6	57,5	0,16
PA-22-027 UCS-02		62,02	62,24	SKN	SKARN	24,0	-	-
PA-22-030 UCS-03		70,17	70,43	SKN	SKARN	117,1	-	-
PA-22-030 UCS-05		119,30	119,53	SKN	SKARN	45,1	-	-
PA-22-031 UCS-02		43,25	43,59	SKN	SKARN	96,6	-	-
PA-22-031 UCS-04		85,24	85,45	SKN	SKARN	77,6	-	-
PA-22-032 UCS-02		62,00	62,22	SKN	SKARN	166,1	-	-
PA-22-032 UCS-03		111,62	111,95	SKN	SKARN	119,2	-	-
PA-22-043 UCS-03		88,75	88,92	SKN	SKARN	26,3	-	-
PA-22-044 UCS-03		47,37	47,58	SKN	SKARN	35,8	-	-
PA-22-044 UCS-05		115,22	115,40	SKN	SKARN	28,6	-	-
PA-22-044 UCS-06		187,66	187,90	SKN	SKARN	86,4	-	-
PA-22-058 UCS-02		67,56	67,78	SKN	SKARN	47,8	-	-
PA-22-058 UCS-03		123,90	124,10	SKN	SKARN	47,8	-	-
PA-22-059 UCS-02	42,43	42,64	SKN	SKARN	61,1	-	-	
PA-22-063 UCS-03	106,33	106,55	SKN	SKARN	207,8	-	-	
PA-22-064 UCS-02	63,30	63,54	SKN	SKARN	267,7	-	-	
PA-22-064 UCS-04	102,90	103,14	SKN	SKARN	149,3	-	-	
PA-22-067 UCS-04	121,22	121,42	SKN	SKARN	125,1	-	-	
PA-22-067 UCS-05	149,61	149,90	SKN	SKARN	74,5	-	-	
PA-22-068 UCS-02	57,20	57,50	SKN	SKARN	134,6	-	-	
PA-22-069 UCS-02	68,98	69,20	SKN	SKARN	46,4	-	-	
PA-22-069 UCS-03	166,85	167,10	SKN	SKARN	70,9	-	-	

Laboratorio	ID Perforación	Profundidad		Litología	Alteración	UCS (Mpa)	E (Gpa)	v
		Desde	Hasta					
	PA-22-070 UCS-01	76,95	77,18	SNZ	SKARN	68.4	-	-
	PA-22-073 UCS-01	60,80	60,99	SNZ	SKARN	45.6	-	-
	PA-22-107 UCS-03	55,30	55,50	SNZ	SKARN	74.7	-	-
	PA-22-107 UCS-05	121,62	121,85	SNZ	SKARN	27.5	-	-
	PA-22-107 UCS-09	259,80	260,00	SNZ	SKARN	111.0	-	-
	PA-22-107 UCS-11	305,65	305,90	SNZ	SKARN	39.3	-	-
	PA-22-108 UCS-02	59,88	60,12	SNZ	SKARN	51.7	-	-
	PA-22-108 UCS-06	139,95	140,20	SNZ	SKARN	78.0	-	-
	PA-22-108 UCS-09	313,07	313,33	SNZ	SKARN	105.2	-	-
	PA-22-115 UCS-04	88,85	89,05	SNZ	SKARN	124.0	-	-
	PA-22-115 UCS-05	111,84	112,06	SNZ	SKARN	55.5	-	-
	PA-22-115 UCS-07	176,40	176,58	SNZ	SKARN	67.2	-	-
	PA-22-115 UCS-08	209,75	209,95	SNZ	SKARN	160.9	-	-

Resultado Estadístico UCS - Skarn	
Cantidad de ensayos	73
Media	80
Desviación estándar	49
P35	52
Mínimo	12.4
Máximo	267.7

Anexo 2: Análisis Estadístico de UCS de la Unidad Geotécnica Caliza

Laboratorio	ID Perforación	Profundidad		Litología	Alteración	UCS (Mpa)	E (Gpa)	v
		Desde	Hasta					
GEO MEC GEO MECÁNICA LATINA S.A. (2024)	PA-23-027 UCS-04	137.4	137.61	CALIZA	FRESCA	85.9	22.29	0.203
	PA-23-028 UCS-01	15.56	15.8	CALIZA	FRESCA	108.13	33.71	0.157
	PA-23-028 UCS-02	31.48	31.7	CALIZA	FRESCA	79.31	29.09	0.123
	PA-23-028 UCS-03	40.92	41.14	CALIZA	FRESCA	77.24	31.82	0.146
	PA-23-028 UCS-04	53.7	53.94	CALIZA	FRESCA	131.5	39.28	0.177
	PA-23-028 UCS-05	77.35	77.55	CALIZA	FRESCA	129.29	36.84	0.202
	PA-23-029 UCS-01	37.42	37.64	CALIZA	MARMOL	113.74	31.81	0.171
	PA-23-029 UCS-02	43.5	43.73	CALIZA	MARMOL	147.15	36.81	0.194
	PA-23-029 UCS-03	70.27	70.52	CALIZA	MARMOL	123.59	41.82	0.225
	PA-23-029 UCS-04	79.3	79.55	CALIZA	MARMOL	71.26	25.38	0.232
	PA-23-029 UCS-05	104.78	104.99	CALIZA	MARMOL	61.25	24.68	0.254
	PA-23-036 UCS-05	229.25	229.5	CALIZA	FRESCA	101.44	39.56	0.164
	PA-23-036 UCS-06	307.38	307.63	CALIZA	FRESCA	133.65	31.61	0.171
	PA-23-036 UCS-07	355.2	355.42	CALIZA	FRESCA	88.51	29.19	0.182
	PA-23-008 UCS-03	134.65	135.01	CALIZA	FRESCA	101.3	28.25	31.7
	PA-23-010 UCS-01	8.9	9.1	CALIZA	FRESCA	107.7	29.54	36.16
	PA-23-010 UCS-02	28.2	28.4	CALIZA	FRESCA	112.33	32.2	37.25
	PA-23-010 UCS-03	37.4	37.6	CALIZA	MARMOL	123.16	31.52	36.19
	PA-23-010 UCS-04	68.68	68.9	CALIZA	MARMOL	66.42	44.69	38.4
	PA-23-010 UCS-05	96	96.22	CALIZA	MARMOL	118.04	30.59	34.57
PA-23-013 UCS-01	41.72	42.07	CALIZA	FRESCA	79.93	28.23	0.135	
ANDES GEO LAB S.A.C. (2023)	PA-22-044/TR-03/UCS-10	198.59	198.90	S5	UNALTERED ROCK	120.5	83.2	0.22
	PA-22-051/TR-01/UCS-02	63.48	63.95	S5	UNALTERED ROCK	23.1	49.1	0.26
	PA-22-063/TR-01/UCS-04	47.63	47.88	S5	UNALTERED ROCK	168.9	91.7	0.26
	PA-22-063/UCS-02	65.40	65.64	S5	UNALTERED ROCK	106.8	64.8	0.30
	PA-22-066/TR-01 (B)/UCS-06	75.97	76.18	S5	UNALTERED ROCK	159.4	81.9	0.30
	PA-22-067/UCS-03	104.00	104.37	S5	UNALTERED ROCK	116.4	70.6	0.30
	PA-22-067/TR-03/UCS-07	113.40	113.68	S5	UNALTERED ROCK	86.0	61.4	0.30
	PA-22-107/TR-05/UCS-14	190.07	190.28	S5	UNALTERED ROCK	80.3	78.9	0.25
	PA-22-030 UCS-04	95.60	95.88	S5	UNALTERED ROCK	108.0	-	-
	PA-22-040 UCS-02	44.23	44.43	S5	UNALTERED ROCK	52.5	-	-
	PA-22-044 UCS-04	78.22	78.42	S5	UNALTERED ROCK	63.6	-	-
	PA-22-044 UCS-07	204.63	204.88	S5	UNALTERED ROCK	131.6	-	-
	PA-22-053 UCS-01	61.32	61.56	S5	UNALTERED ROCK	70.7	-	-
	PA-22-063 UCS-02	65.40	65.64	S5	UNALTERED ROCK	131.0	-	-
	PA-22-066 UCS-03	56.15	56.30	S5	UNALTERED ROCK	119.1	-	-
	PA-22-066 UCS-04	85.40	85.65	S5	UNALTERED ROCK	94.6	-	-
	PA-22-067 UCS-02	50.40	50.63	S5	UNALTERED ROCK	69.5	-	-
	PA-22-067 UCS-03	104.00	104.37	S5	UNALTERED ROCK	125.3	-	-
PA-22-107 UCS-06	180.84	181.05	S5	UNALTERED ROCK	182.5	-	-	
PA-22-107 UCS-07	213.80	214.00	S5	UNALTERED ROCK	103.7	-	-	
PA-22-107 UCS-08	237.97	238.19	S5	UNALTERED ROCK	55.7	-	-	

Resultado Estadístico UCS - Caliza	
Cantidad de ensayos	42
Media	103
Desviación estandar	33
P35	87
Mínimo	23.1
Máximo	182.5

Anexo 3: Análisis Estadístico de Propiedades Físicas de la Unidad Geotécnica Skarn

Laboratorio	ID Perforación	Litología	Alteración	Densidad seca (g/cm3)	Densidad húmeda (g/cm3)	Contenido de humedad (%)	Porosidad aparente (%)	Peso específico aparente (KN/m3)
GEOMEC GEOMECÁNICA LATINA S.A. (2024)	DDH-23-01 PF-02	SKARN	SKARN	2.48	2.6	4.38	11.39	25.43
	PA-23-001 PF-04	SKARN	SKARN	2.68	2.71	1.2	3.3	26.57
	PA-23-028 PF-06	SKARN	SKARN	2.65	2.7	1.7	4.61	26.47
ANDES GEOLAB S.A.C.(2023)	PA-22-027 PF-03	SKN	SKARN	2.78	2.79	0.50	1.2	27.3
	PA-22-030 PF-06	SKN	SKARN	3.35	3.37	0.6	0.8	32.9
	PA-22-032 PF-05	SKN	SKARN	3.53	3.54	0.3	1.3	34.6
	PA-22-044 PF-02	SKN	SKARN	2.67	2.72	1.8	11.4	26.2
	PA-22-058 PF-02	SKN	SKARN	3.31	3.34	0.9	6.8	32.5
	PA-22-059 PF-02	SKN	SKARN	2.57	2.63	2.2	9.6	25.2
	PA-22-063 PF-02	SKN	SKARN	2.88	2.94	2.1	8.5	28.3
	PA-22-064 PF-02	SKN	SKARN	2.60	2.63	1.2	4.6	25.5
	PA-22-069 PF-03	SKN	SKARN	2.59	2.62	1.1	10.5	25.4
	PA-22-070 PF-03	SKN	SKARN	2.76	2.77	0.5	4.9	27.1
	PA-22-070 PF-04	SKN	SKARN	2.60	2.61	0.5	2.0	25.5
	PA-22-107 PF-02	SKN	SKARN	2.45	2.50	1.9	7.7	24.0
	PA-22-108 PF-04	SKN	SKARN	2.65	2.68	1.4	1.4	26.0
	PA-22-115 PF-02	SKN	SKARN	2.71	2.72	0.4	0.6	26.6

Resultado Estadístico Peso Específico Aparente Skarn	
Cantidad de ensayos	17
Media	27.39
Desviación estandar	3.02

Anexo 4: Análisis Estadístico de Propiedades Físicas de la Unidad Geotécnica Caliza

Laboratorio	ID Perforación	Litología	Alteración	Densidad seca (g/cm ³)	Densidad húmeda (g/cm ³)	Contenido de humedad (%)	Porosidad aparente (%)	Peso específico aparente (KN/m ³)
GEO MEC GEO MECÁNICA LATINA S.A. (2024)	DDH-23-03 PF-01	CALIZA	RECRISTALIZACIÓN	2.72	2.73	0.22	0.63	26.76
	PA-23-010 PF-03	CALIZA	FRESCA	2.68	2.69	0.36	0.99	26.39
	PA-23-028 PF-05	CALIZA	FRESCA	2.75	2.76	0.36	1.01	27.1
	PA-23-029 PF-03	CALIZA	MARMOL	2.69	2.7	0.26	0.72	26.49
	PA-23-036 PF-07	CALIZA	FRESCA	2.57	2.63	2.31	6.1	25.82
ANDES GEOLAB S.A.C.(2023)	PA-22-030 PF-04	SS	UNALTERED ROCK	2.75	2.76	0.2	0.3	27.0
	PA-22-043 PF-02	SS	UNALTERED ROCK	2.72	2.73	0.4	3.4	26.7
	PA-22-053 PF-02	SS	UNALTERED ROCK	2.75	2.76	0.2	2.0	27.0
	PA-22-063 PF-01	SS	UNALTERED ROCK	2.69	2.69	0.2	0.8	26.4
	PA-22-067 PF-02	SS	UNALTERED ROCK	2.70	2.70	0.1	0.6	26.5
	PA-22-107 PF-05	SS	UNALTERED ROCK	2.70	2.70	0.1	0.6	26.5

Resultado Estadístico Peso Específico Aparente Caliza	
Cantidad de ensayos	11
Media	26.61
Desviación estandar	0.36

Anexo 5: Análisis Estadístico de mi de la Unidad Geotécnica Skarn

Laboratorio	ID Perforación		Profundidad		Litología	Alteración	Confinamiento s_3 (MPa)	Esfuerzo de rotura s_1 (MPa)	Resist. a la comp. uniaxial (MPa)	Constante "mi"	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción interno (°)
			Desde	Hasta								
GEO MEC GEO MECÁNICA LATINA S.A. (2024)	PA-23-014 UCS-02		124.44	124.68	SKARN	SKARN	0	51.18	51.47	25.14	9.24	51.88
	PA-23-014 TX-01 (B)		67.17	67.49			6	109.47				
	PA-23-014 TX-01 (A)		54.91	55.05			10	133.79				
ANDES GEOLAB S.A.C.(2023)	PA-22-044	TX-01	60,70	61,18	SKN	SKARN	2.0	44.6	28.3	13.8	7.1	41.2
							6.0	53.8				
							10.0	83.5				
	PA-22-058	TX-01 (A)	45,34	45,56	SKN	SKARN	2.0	33.1	43.5	13.6	12.0	40.2
							6.0	79.7				
							10.0	98.3				
	PA-22-059	TX-01 (A)	43,10	43,30	SKN	SKARN	2.0	79.1	50.2	27.7	10.0	51.8
							6.0	98.0				
							10.0	145.8				
	PA-22-067	TX-02 (A)	182,02	182,20	SKN	SKARN	2.0	94.3	69.7	25.2	13.4	51.8
							6.0	127.8				
							10.0	161.1				
	PA-22-107	TX-02 (A)	162,35	162,55	SKN	SKARN	2.0	88.9	77.5	7.4	19.5	37.1
							6.0	97.8				
							10.0	121.2				
	PA-22-108	TX-03 (A)	180,86	181,05	SKN	SKARN	2.0	66.6	55.7	5.9	15.1	33.5
							6.0	69.7				
							10.0	94.3				
	PA-22-115	TX-01 (A)	109,70	109,90	SKN	SKARN	2.0	74.7	65.6	7.4	17.0	36.2
							6.0	51.8				
							10.0	105.7				

Resultado Estadístico mi - Skarn	
Cantidad de ensayos	8
Media	15.77
Desviación estandar	8.99

Anexo 6: Análisis Estadístico de mi de la Unidad Geotécnica Caliza

Laboratorio	ID Perforación	Profundidad		Litología	Alteración	Confinamiento s_3 (MPa)	Esfuerzo de rotura s_1 (MPa)	Resist. a la comp. uniaxial (MPa)	Constante "mi"	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción interno (°)	
		Desde	Hasta									
GEO MEC GEO MECÁNICA LATINA S.A. (2024)	PA-23-027 UCS-04	137.4	137.61	CALIZA	FRESCA	0	85.9	85.82	9.86	19.24	41.92	
	PA-23-027 TX-02 (A)	142.13	142.3			6	117.29					
	PA-23-027 TX-02 (B)	153.6	153.9			10	135.97					
ANDES GEOLAB S.A.C.(2023)	PA-22-063	TX-01 (A)	70,30	70,45	SS	UNALTERED ROCK	2.0	91.1	107.1	18.6	22.0	48.7
		TX-01 (B)	75,90	76,15			6.0	159.1				
		TX-01 (C)	78,23	78,46			10.0	187.2				
	PA-22-067	TX-01 (A)	68,22	68,38	SS	UNALTERED ROCK	2.0	112.6	92.9	14.0	18.8	46.8
	PA-22-059	TX-01 (B)	70,50	70,73			6.0	123.3				
	PA-22-067	TX-01 (C)	74,13	74,39			10.0	163.5				
	PA-22-107	TX-03 (A)	200,77	200,97	SS	UNALTERED ROCK	2.0	67.7	58.2	11.6	14.2	41.0
		TX-03 (B)	210,30	210,48			6.0	100.1				
		TX-03 (C)	204,50	204,75			10.0	106.2				

Resultado Estadístico mi - Caliza	
Cantidad de ensayos	4
Media	13.54
Desviación estandar	3.79

Anexo 7: Relación de Software Geotécnico

Software	Tipo de análisis / Método	Modelo	Aplicaciones principales	Resultados / Salidas
DIPS	Análisis estructural y cinemático de discontinuidades (proyecciones estereográficas)	2D	Clasificación de familias de discontinuidades; evaluación de modos de falla (planar, cuña, vuelco); análisis de orientación de estructuras	Diagramas estereográficos, polos, planos promedio, densidad de discontinuidades
SWEDGE	Equilibrio límite – Análisis de estabilidad de cuñas	3D simplificado	Evaluar estabilidad de cuñas por intersección de discontinuidades; efecto del agua, cohesión y fricción; diseño de pernos de anclaje	Factor de seguridad, volumen y peso de cuña, geometría 3D, probabilidad de falla
SLIDE2	Equilibrio límite (Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer, etc.)	2D	Estabilidad de taludes en suelo o roca; efecto del nivel freático y refuerzos; análisis de sensibilidad	Superficies críticas, FS global, diagramas de esfuerzos, curvas de resistencia
SLIDE3	Equilibrio límite tridimensional (LEM 3D)	3D	Estabilidad de taludes naturales o mineros; efectos tridimensionales y del agua; cálculo de volúmenes de falla y FS realista	Superficies críticas 3D, FS, mapas de probabilidad y volumen de deslizamiento
RS2	Elementos finitos (análisis tensodeformacional)	2D	Taludes, túneles, excavaciones y cimentaciones; modelado elástico-plástico y reducción de resistencia (SSR); interacción suelo-estructura	Tensiones, deformaciones, desplazamientos, FS numérico, mapas de esfuerzos

RS3	Elementos finitos tridimensionales	3D	Modelos complejos tridimensionales de minas y taludes; evaluación 3D de tensiones y desplazamientos; simulación de discontinuidades 3D	FS tridimensional, campos de tensiones y deformaciones, desplazamientos volumétricos
FLAC2D	Diferencias finitas bidimensional (análisis numérico continuo)	2D	Modelado geomecánico de taludes, túneles, presas y cimentaciones; simulación de deformaciones y esfuerzos; análisis por etapas	Distribución de tensiones, deformaciones, desplazamientos, evolución temporal, FS (SSR)
FLAC3D	Diferencias finitas tridimensional (análisis numérico avanzado)	3D	Modelado tridimensional de minas, taludes y túneles; evaluación no lineal, anisotropías, cargas dinámicas y acoplamientos térmico-hidráulicos	Campos 3D de tensiones, deformaciones y desplazamientos; FS 3D; visualizaciones volumétricas