



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y GEOTÉCNICA DE LA UNIDAD
GEOTÉCNICA 5 EN LOS SECTORES ESPERANZA, HARU Y FARELLONES,
MINA S.C.M. ATACAMA KOZAN, TIERRA AMARILLA, CHILE**

Francisco Andrés Pino Valdivia

Copiapó, Chile 2025



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y GEOTÉCNICA DE LA UNIDAD
GEOTÉCNICA 5 EN LOS SECTORES ESPERANZA, HARU Y FARELLONES,
MINA S.C.M. ATACAMA KOZAN, TIERRA AMARILLA, CHILE**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de Geólogo.

Profesor guía: Dr. Gonzalo Galaz Escanilla

Tutor: Sr. Mario Muñoz Poblete

Francisco Andrés Pino Valdivia

Copiapó, Chile 2025

Dedicado a mi papá y mamá, Héctor y Jeannette.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres, Héctor Pino Pino y Jeannette Valdivia Jofré, por su amor, apoyo incondicional y por darme la oportunidad de estudiar lo que me apasiona. A mi abuelo Amador y, en especial, a mi abuelita Violeta, por todo su amor, consejos e incentivo para estudiar esta carrera. También a mi abuelo Gilberto y abuela Luzmenia, su recuerdo siempre me acompañará.

Agradezco a la S.C.M. Atacama Kozan en su conjunto, por haberme permitido realizar mi memoria de título. Al área de Ingeniería, a don Sebastián y Kawano san, al departamento de Geomecánica que me acogió, especialmente a mi tutor Mario Muñoz, así como a Jonathan, Cristián y Nicolás. Al departamento de Topografía, a Rodrigo, Scarlett, Antonia, Alexis y don Leonardo. Al departamento de Planificación, a Felipe, Claudio y Gonzalo. Al departamento de Geología, a don Hugo, Terashima san, Javiera, Tanya, Miguel, Cristhofer, Juan José, don Guillermo, Pablo y Cristhoper. Agradezco a todos por el apoyo y contribución a mi desarrollo profesional y personal.

A todos los integrantes del departamento de Geología de la Universidad de Atacama y, en particular, a mi profesor guía Gonzalo Galaz, por sus consejos y gran aporte a la mejora de este trabajo. Finalmente, a mis amigos que conocí en la Universidad y que me acompañaron todos estos años, en especial a Javiera, Camila, Matías y José, muchas gracias.

Resumen

El yacimiento Atacama Kozan es un depósito de tipo IOCG ubicado en el distrito Punta del Cobre, región de Atacama, cuya mena principal es el cobre extraído desde la calcopirita. El tipo de explotación aplicado es de tipo subterráneo, por medio del sistema *Sublevel stoping* y, actualmente, el desarrollo de labores se focaliza en el nivel general 50 de la mina, donde se han reconocido diferencias en los parámetros geotécnicos con respecto a lo observado en niveles superiores, de acuerdo con lo establecido en la Unidad Geotécnica (UGT) 5 definida para el nivel con un índice de resistencia geológica (GSI) de 59 y un índice Q de Barton de 9,0. El presente trabajo contiene una propuesta de dominios geotécnicos para el nivel general 50, generando una subdivisión de la UGT 5, la cual permite definir sus diferencias geotécnicas y ajustar los trabajos de fortificación. El estudio abarcó los sectores Haru, Esperanza y Farellones, donde se aplicaron las metodologías de descripción macro y microscópica de muestras de roca, mapeo geotécnico de celdas, mapeo de discontinuidades por línea de detalle, confección de mapas 1:500 de la información capturada, análisis de nubes de puntos con el *software* Maptek PointStudio, análisis estereográfico de discontinuidades y estimación de fortificación, de acuerdo con el método gráfico presente en Q de Barton. El estudio petrográfico permitió identificar la presencia de dos litologías en el nivel 50, las que corresponden a andesita biotitizada-cloritizada y filita de biotita, esta última sólo detectada en el sector Haru. El análisis de las discontinuidades indicó la presencia de familias de estructuras con manteos subverticales a oblicuos (86° - 49°), de orientación predominante NW y NE, además de la presencia de fallas orientadas NNW asociadas a la mineralización de calcopirita. En base a la caracterización petrográfica, geotécnica y de discontinuidades, fue posible definir cuatro dominios geotécnicos denominados Haru Fil, Haru And, Esperanza y Farellones, los cuales varían en sus parámetros Q desde un mínimo de 6,5 hasta un máximo de 7,7; mientras que su GSI varía desde un mínimo de 56,4 hasta un máximo de 60,3. La evaluación de fortificación permitió reconocer la necesidad de fortificación en celdas con un índice $Q < 5$, indicando la instalación de mallas y pernos de 2,4 m para las vías de acceso, sugiriendo considerar fortificación para celdas en cruzados.

Palabras claves: Atacama Kozan - IOCG - Q de Barton - GSI - Dominios geotécnicos

Abstract

The Atacama Kozan deposit is an IOCG type deposit located in the Punta del Cobre district, Atacama region, whose main ore is copper extracted from chalcopyrite. The type of exploitation applied is underground, by means of the Sublevel stoping system, and currently the development of the tunnels is focused on the general level 50 of the mine, where differences in the geotechnical parameters have been recognized with respect to what has been observed in higher levels, and according to the established in the Geotechnical Unit (UGT) 5 defined for the level, with a geological resistance index (GSI) of 59 and a Q system of 9,0. The present work contains a proposal of geotechnical domains for the general level 50, generating a subdivision of the UGT 5, which allows defining its geotechnical differences and adjusting the fortification works. The study covered the Haru, Esperanza and Farellones sectors, where the following methodologies were applied: macro and microscopic description of rock samples, geotechnical mapping of cells, mapping of discontinuities by line of detail, preparation of 1:500 maps of the captured information, point cloud analysis with Maptek PointStudio software, stereographic analysis of discontinuities and estimation of fortification, according to the graphic method present in Q system. The petrographic study identified the presence of two lithologies in level 50, corresponding to biotitized-chloritized andesite and biotite phyllite, the latter only detected in the Haru sector. The analysis of discontinuities indicated the presence of families of structures with subvertical to oblique buttes (86° - 49°), predominantly NW and NE oriented, in addition to the presence of NNW oriented faults associated with chalcopyrite mineralization. Based on the petrographic, geotechnical and discontinuities characterization, it was possible to define four geotechnical domains named Haru Fil, Haru And, Esperanza and Farellones, which vary in their Q parameters from a minimum of 6,5 to a maximum of 7,7; while their GSI varies from a minimum of 56,4 to a maximum of 60,3. The fortification evaluation allowed recognizing the need for fortification in cells with a Q system <5 , indicating the installation of 2,4 m bolts and mesh for the access tunnels, suggesting to consider fortification for cells in crosscuts.

Key words: Atacama Kozan - IOCG - Q system - GSI - Geotechnical domains

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: MARCO INTRODUCTORIO	1
1.1. Introducción y problemática de investigación	1
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Ubicación y accesos	4
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	6
2.1. Etapa de gabinete I	6
2.2. Etapa de terreno	6
2.2.1. Recolección de muestras de roca.....	6
2.2.2. Caracterización geotécnica por método de celdas.....	7
2.2.3. Caracterización de estructuras mayores.....	7
2.3. Etapa de gabinete II	8
2.3.1. Descripción de cortes transparentes de roca.....	8
2.3.2. Digitalización de mapeo geotécnico y de estructuras.....	8
2.3.3. Análisis de nubes de puntos para la identificación de discontinuidades.....	8
2.3.4. Análisis estereográfico de las discontinuidades.....	9
2.3.5. Indicaciones de fortificación.....	9
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	10
3.1. Depósitos IOCG	10
3.2. Macizo rocoso y sus características	12

3.3. Clasificación del macizo rocoso	14
3.3.1. <i>Rock Quality Designation</i> (RQD).....	14
3.3.2. Índice de calidad Q.....	15
3.3.3. Índice de resistencia geológica (GSI)	17
CAPÍTULO 4: MARCO GEOLÓGICO	18
4.1. Geología distrital	18
4.1.1. Formación Punta del Cobre.....	18
4.1.2. Grupo Chañarillo.....	21
4.1.3. Rocas intrusivas	22
4.1.4. Rocas metamórficas	24
4.2. Geología estructural distrital	24
4.3. Geología local de Atacama Kozan	26
4.3.1. Andesitas	27
4.3.2. Subdivisión de unidad Andesitas propuesta por Solís (2016).....	27
4.3.3. Subdivisión de unidad Andesita propuesta por Pérez (2019).....	29
4.3.4. Manto.....	31
4.3.5. Metasedimentos.....	31
4.3.6. Tobas.....	32
4.3.7. Caliza estéril.....	32
4.4. Geología estructural de Atacama Kozan	32
4.5. Modelo geotécnico de Atacama Kozan	33
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	37
5.1. Petrografía	37

5.2. Geotecnia Haru	41
5.2.1. Discontinuidades.....	41
5.2.2. Índices geotécnicos.....	48
5.3. Geotecnia Esperanza	50
5.3.1. Discontinuidades.....	50
5.3.2. Índices geotécnicos.....	56
5.4. Geotecnia Farellones	58
5.4.1. Discontinuidades.....	58
5.4.2. Índices geotécnicos.....	63
5.5. Definición de dominios geotécnicos	65
5.6. Indicaciones de fortificación	67
CAPÍTULO 6: DISCUSIONES	71
6.1. Distribución de las litologías	71
6.2. Discontinuidades y metodologías de captura	71
6.3. Dominios geotécnicos en UGT 5	72
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS	77
ANEXOS	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Codificación de cortes transparentes.....	6
Tabla 4.1. Resumen de índices de calidad promedios (GSI y RMR) de unidades geotécnicas.....	33
Tabla 5.1. Resumen de familias de discontinuidades reconocidas en el sector Haru.....	48
Tabla 5.2. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Haru superior.....	49
Tabla 5.3. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Haru intermedio.....	49
Tabla 5.4. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Haru inferior.....	50
Tabla 5.5. Resumen de familias de discontinuidades reconocidas en el sector Esperanza.....	56
Tabla 5.6. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Esperanza 1A.....	56
Tabla 5.7. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Esperanza 1B.....	57
Tabla 5.8. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Esperanza 3.....	57
Tabla 5.9. Resumen de familias de discontinuidades reconocidas en el sector Farellones.....	63
Tabla 5.10. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Farellones intermedio.....	64
Tabla 5.11. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Farellones inferior.....	65
Tabla 5.12. Resumen de índices geotécnicos de dominios.....	65
Tabla 5.13. Variables aplicadas para la definición de fortificación, para cada subsector estudiado.....	67
Tabla 5.14. Variables aplicadas para la definición de fortificación, para las celdas de menor calidad geotécnica.....	68
Tabla 5.15. Resumen de indicaciones de fortificación para subsectores de estudio.....	69
Tabla 5.16. Resumen de indicaciones de fortificación para celdas de menor calidad geotécnica.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos S.C.M. Atacama Kozan.....	5
Figura 2.1. Ejemplos de puntos generados por presencia de vehículos, personas y agua.....	8
Figura 2.2. Ejemplo de vista de superficie, con la captura de discontinuidades.....	9
Figura 3.1. Distribución geográfica de los depósitos IOCG sensu stricto, óxidos de Fe (P, F, REE) y depósitos skarns.....	11
Figura 3.2. Esquema de discontinuidades, y sus características, en el macizo rocoso....	13
Figura 3.3. Procedimiento de medición y cálculo de RQD.	14
Figura 3.4. Cartilla de GSI.....	17
Figura 4.1. Esquema estratigráfico del distrito Candelaria - Punta del Cobre, con las principales edades geocronológicas y paleontológicas.....	19
Figura 4.2. Mapa geológico-estructural simplificado del distrito Candelaria-Punta del Cobre.....	25
Figura 4.3. Esquema de la división estratigráfica del yacimiento Atacama Kozan, indicando unidades geológicas informales, utilizadas en el depósito.....	27
Figura 4.4. Esquema estratigráfico de la subdivisión de rocas pertenecientes a la unidad Andesita.....	29
Figura 4.5. Perfil esquemático de la distribución relativa de las unidades geotécnicas del yacimiento de Atacama Kozan.....	33
Figura 5.1. Microfotografías de andesita biotitizada-cloritizada.....	38
Figura 5.2. Microfotografías de filitas de biotita.....	39
Figura 5.3. Microfotografías de filitas de biotita.....	40
Figura 5.4. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Haru superior.....	41
Figura 5.5. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Haru superior.....	42
Figura 5.6. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Haru intermedio.....	43

Figura 5.7. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Haru intermedio.....	44
Figura 5.8. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Haru inferior.....	45
Figura 5.9. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Haru inferior.....	46
Figura 5.10. Proyección estereográfica de la totalidad de discontinuidades identificadas, en terreno y en PointStudio, sector Haru.....	47
Figura 5.11. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores, subsector Esperanza 1 A.....	51
Figura 5.12. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Esperanza 1 B.....	52
Figura 5.13. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Esperanza 3.....	53
Figura 5.14. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Esperanza 3.....	54
Figura 5.15. Proyección estereográfica del total de fallas mayores y menores reconocidas en el sector Esperanza.....	55
Figura 5.16. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores reconocidas en el subsector Farellones Intermedio.....	58
Figura 5.17. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Farellones intermedio.....	59
Figura 5.18. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores reconocidas en el subsector Farellones inferior.....	60
Figura 5.19. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Farellones intermedio.....	61
Figura 5.20. Proyección estereográfica de la totalidad de discontinuidades identificadas, en terreno y en PointStudio, sector Farellones.....	62
Figura 5.21. Gráfico de calidad del macizo rocoso y fortificación. Incorpora los puntos de intersección entre las rectas de los promedios de Q y la relación ancho-ESR.	69

CAPÍTULO 1: MARCO INTRODUCTORIO

1.1. Introducción y problemática de investigación

Los depósitos de óxidos de hierro – cobre – oro (IOCG), son una importante fuente de Cu, Au y pueden contener concentraciones económicamente significativas de U y REE, así como también de diversos elementos críticos, tales como Mo, Ni, Co, entre otros (del Real, 2019; Castillo *et al.*, 2023). Las características principales de un depósito IOCG propuesta por Williams *et al.* (2005), y revisada por Groves *et al.* (2010), consiste en: Cu y Au como principales minerales de interés económico, características hidrotermales y control estructural, abundantes óxidos de hierro con bajo contenido de Ti y silicatos con contenido de Fe, enriquecimiento de LREE y sulfuros bajos en S, ausencia de vetillas de cuarzo o silicificación, y una relación temporal, no espacial, con el magmatismo.

El distrito Candelaria-Punta del Cobre es parte del cinturón IOCG andino del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, y es el distrito que preserva el mayor volumen de mineral, con un contenido de cobre mayor a 13 Mt (Couture *et al.*, 2017). El distrito se localiza en la región de Atacama, en el norte de Chile, se compone de diez depósitos de tipo IOCG (del Real, 2019) y de diversas minas activas que explotan los cuerpos mineralizados alojados, principalmente, en rocas de la Formación Punta del Cobre, siendo una de ellas la faena de la Sociedad Contractual Minera Atacama Kozan.

La empresa S.C.M. Atacama Kozan, se ubica en la comuna de Tierra Amarilla, nace en el año 1998 y explota uno de los depósitos pertenecientes al distrito IOCG de Punta del Cobre, siendo el producto comercializado un concentrado de cobre de alta pureza, obtenido desde el procesamiento del mineral en la planta de flotación. Atacama Kozan cuenta con unas reservas de ~30 Mt con una ley de cobre promedio de ~1,5 % (Ichii *et al.*, 2007) y el método de explotación es de tipo subterráneo, que se realiza mediante el sistema *Sublevel stoping*. El método se aplica en yacimientos masivos o tabulares, con características sub verticales y roca de caja de adecuada competencia (Villaescusa, 2014). La explotación se efectúa por medio de caserones, desde donde se extrae el mineral hasta dejar el caserón como una cámara abierta, por lo que se requiere que el diseño de la unidad

de explotación considere parámetros geomecánicos para la factibilidad y seguridad de la operación (Grigaliunas, 2016).

La excavación subterránea por medio de perforación y tronadura se compone de una secuencia de procesos, en donde uno de los procesos de mayor relevancia consiste en la instalación de fortificación o soporte, para asegurar la estabilidad del túnel o galería ante eventuales sobreexcavaciones, algo que sólo se efectúa si existe la necesidad de aquello, dependiendo principalmente de la calidad de la roca (Suorineni *et al.*, 2008; Vargas, 2014). El cálculo de sostenimiento se realiza, empleando metodologías analíticas, observacionales, empíricas y numéricas (MINTUR, 2015) que, en conjunto con estudios geológicos y estructurales, permiten establecer la necesidad de fortificación del macizo rocoso. Algunos de los métodos de caracterización del macizo rocoso más utilizados en minería subterránea son RMR (*rock mass rating*), índice Q (Barton *et al.*, 1974) y el índice de resistencia geológica, GSI (Niu *et al.*, 2024).

A partir de estudios geológicos efectuados por la compañía, se han definido cuatro unidades geológicas informales (UG) para el yacimiento de Atacama Kozan, las que consisten desde la base a techo en unidad Andesitas, unidad Manto, unidad Metasedimentos y unidad Tobas, pertenecientes a la Formación Punta del Cobre. Solís (2016) y Pérez (2019), realizaron caracterizaciones petrográficas en diversas galerías de los niveles generales 310, 165 y 136 del yacimiento, en donde, propusieron subdivisiones geológicas para la unidad informal de andesitas. Solís (2016), sugirió cinco subdivisiones, donde cuatro de ellas se diferencian, esencialmente, en la presencia e intensidad de tipos de alteración, mientras que define una subunidad como brecha volcánica. Posteriormente, Pérez (2019) postuló que la unidad informal de andesitas se compone de cuatro subunidades, las que se distinguen por intensidad de alteración y por el origen formativo de la roca, reconociendo andesitas y brechas andesíticas. Las diferencias, tanto en cantidad como en tipos de subunidades, sugieren heterogeneidad dentro de la unidad Andesitas, lo que podría extenderse a niveles más profundos y que es relevante para desarrollo de la mina.

Sobre la base del análisis de las características geológicas, geotécnicas y estructurales del yacimiento, el personal del departamento de Geomecánica de S.C.M. Atacama Kozan, en conjunto con empresas consultoras (por ejemplo E-Mining, 2008; SCMAK, 2018; FF-Geomechanics, 2020), han definido la presencia de siete unidades geotécnicas (UGT), las que se encuentran descritas en el capítulo “Marco Geológico”, y que se distinguen entre sí por la calidad del macizo en su extensión, además del grado de fracturamiento asociado.

Actualmente, la compañía se encuentra desarrollando labores en el nivel general 50, emplazadas dentro de la unidad geotécnica 5, sin embargo, se han reconocido diferencias en la calidad geotécnica del macizo con respecto a lo determinado en niveles superiores de la mina, así como también, variaciones en la litología de algunos sectores, lo que podría indicar la necesidad de modificación de la unidad geotécnica definida. Por lo anterior, se requiere una revisión tanto petrográfica como geotécnica en las labores del nivel general 50, para complementar los trabajos geotécnicos y de fortificación en los sectores de Esperanza, Haru y Farellones.

1.2. Hipótesis

Existen diferencias en los parámetros geotécnicos en el interior de la Unidad Geotécnica 5 al considerar lo observado en el nivel general más reciente, el nivel 50, con respecto a los niveles superiores. Por lo tanto, se espera determinar una división de la UGT 5 para este nivel, lo que se podría obtener mediante levantamientos geotécnicos, estructurales y análisis petrográficos del macizo rocoso en los sectores Haru, Esperanza y Farellones.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer posibles subdivisiones de la Unidad Geotécnica 5 en los sectores Haru, Esperanza y Farellones en sus labores pertenecientes al nivel general 50 de la mina, con la finalidad de ajustar los trabajos de fortificación de acuerdo con las características propias de los sectores y nivel de estudio.

1.3.2. Objetivos específicos

- i. Reconocer las propiedades estructurales y petrográficas del macizo rocoso en las labores del nivel general 50.
- ii. Determinar las características geotécnicas del macizo rocoso, mediante la aplicación de las metodologías de clasificación de Q de Barton y GSI.
- iii. Definir dominios geotécnicos para el nivel general 50, a partir del procesamiento de la información levantada en terreno.
- iv. Generar una adaptación de las sugerencias de la metodología Q de Barton para las labores del nivel general 50, considerando la definición de dominios geotécnicos, además de los elementos y tipos de fortificación utilizados por S.C.M. Atacama Kozan.

1.4. Ubicación y accesos

La faena de la empresa minera S.C.M. Atacama Kozan, se localiza en la región de Atacama, provincia de Copiapó, aproximadamente a 16 km al sureste de la ciudad de Copiapó, en lo que se conoce como el distrito minero Punta del Cobre. Las coordenadas del ingreso a la faena en UTM (Datum WGS 84 -19S) son N 6.957.048,10 y E 374.446,70, y se encuentra a una cota promedio de 525 m s.n.m. (Fig. 1.1). El acceso a la mina desde la ciudad de Copiapó se realiza por la avenida Copayapu con dirección hacia la comuna de Tierra Amarilla, conectando con la ruta C-35 hasta, finalmente, acceder al camino de uso público que permite el acceso a las instalaciones de Atacama Kozan.

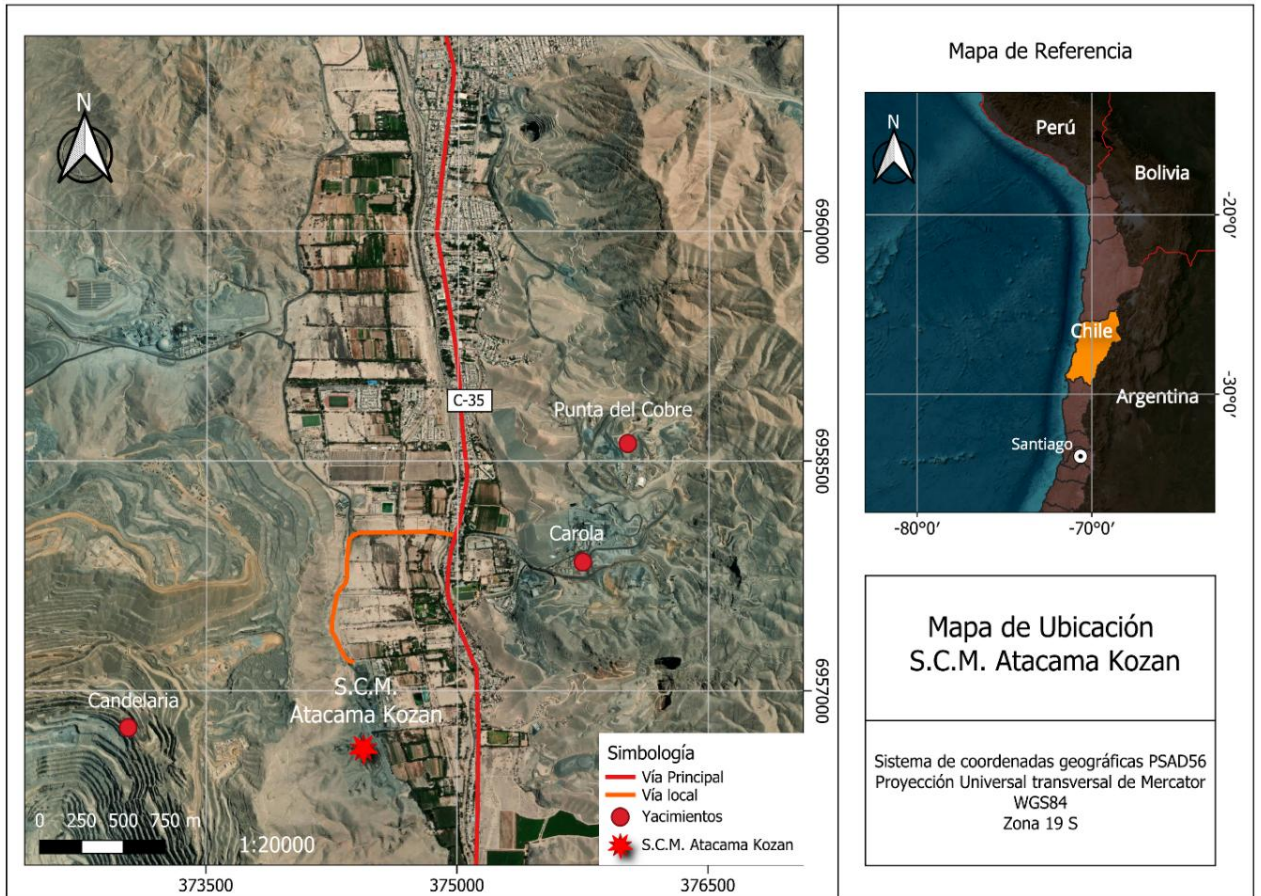


Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos S.C.M. Atacama Kozan. Elaboración propia.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

2.1. Etapa de gabinete I

En esta etapa se reunió y seleccionó información relevante para el tema investigado, considerando trabajos de tesis, publicaciones científicas, libros, cartas geológicas y trabajos, tanto externos como internos, realizados acerca de la geología de la mina S.C.M. Atacama Kozan. En específico, se recopiló información acerca de depósitos de tipo IOCG, el método de explotación *Sublevel stoping*, métodos de clasificación de macizo rocoso GSI y Q de Barton, aplicación de herramientas geotécnicas del *software* Maptek PointStudio y caracterización geológica del distrito Candelaria - Punta del Cobre. Adicionalmente, se revisaron informes técnicos y archivos que contenían información de la geología del yacimiento Atacama Kozan, con énfasis en la descripción petrográfica, estructuras y la unidad geotécnica asignada a los sectores de estudio.

2.2. Etapa de terreno

2.2.1. Recolección de muestras de roca.

Entre los meses de julio y agosto del 2023 se recolectaron un total de 30 muestras de roca considerando los sectores Haru (H. superior, intermedio e inferior), Esperanza (E3, E1-A y E1-B) y Farellones (F. intermedio e inferior). Se seleccionó la muestra más representativa de cada sector, las que posteriormente se entregaron al departamento de Geología de la Universidad de Atacama para la confección de 8 cortes transparentes. El código utilizado para la identificación de los cortes fue AK50M más el número correlativo a la muestra (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Codificación de cortes transparentes. Elaboración propia.

Código de muestra	Sector
AK50M1	Haru superior
AK50M2	Haru inferior
AK50M3	Haru intermedio
AK50M4	Esperanza 3
AK50M5	Esperanza 1-A
AK50M6	Farellones inferior W
AK50M7	Farellones inferior E
AK50M8	Farellones intermedio

2.2.2. Caracterización geotécnica por método de celdas.

Durante esta etapa se llevó a cabo el trabajo de levantamiento geotécnico de las labores de estudio, aproximadamente 1.800 m a escala 1:500, entre los meses de octubre a diciembre del 2023, en donde se aplicó el método de celdas geotécnicas, que consiste en capturar parámetros geotécnicos dentro de un tramo definido del túnel que presenta características homogéneas. La extensión de la celda varía en función de la continuidad de las características que se observen en el macizo.

Se identificaron los parámetros necesarios para la aplicación de los sistemas de clasificación del macizo rocoso Q de Barton (Barton *et al.*, 1974; Barton, 2002) y GSI (Hoek *et al.*, 2013), este último, de forma cualitativa y cuantitativa. Los datos recopilados se compilaron en una hoja de cálculo del *software* Microsoft Excel.

2.2.3. Caracterización de estructuras mayores.

Se realizó la identificación de estructuras mayores, por medio del método de línea de detalle a escala 1:500, entre los meses de noviembre 2023 a enero 2024, que consistió en el registro de discontinuidades significativas que cortan un plano horizontal imaginario que se ubica a 1,50 m del suelo. Las estructuras consideradas fueron fallas, diques y vetas, en donde, los datos obtenidos fueron la ubicación, rumbo, dirección de inclinación, buzamiento y observaciones relevantes como, por ejemplo, tipos de rellenos, alteraciones, entre otros.

En el caso de las fallas, se aplicó una distinción para su denominación, que identifica como falla mayor o VIF (*Very Important Fault*) a aquellas fallas con un espesor mayor a 10 cm, mientras que se llama falla menor o FT (*Fault Trace*) a fallas con un espesor menor a 10 cm. La diferenciación de fallas se extrajo tanto de trabajos internos de Atacama Kozan, como de trabajos externos encomendados (por ejemplo, FF-Geomechanics, 2020).

2.3. Etapa de gabinete II

2.3.1. Descripción de cortes transparentes de roca.

La descripción petrográfica de los cortes transparentes se realizó en las dependencias del departamento de Geología de la Universidad de Atacama. La descripción se enfocó en el reconocimiento de características litológicas y de alteración en las muestras.

2.3.2. Digitalización de mapeo geotécnico y de estructuras.

Se procesó y digitalizó la información de obtenida en los levantamientos, por medio del software AutoCAD versión 2024, en planos a escala 1:500. En el caso de los mapas geotécnicos, se identificó la división de celdas, incorporando su respectiva calificación de GSI y Q de Barton. Para los mapas de estructuras, se destacaron las trazas de las discontinuidades y propiedades, que consideraron, espesor, dirección de inclinación y buzamiento.

2.3.3. Análisis de nubes de puntos para la identificación de discontinuidades.

Se realizó un procesamiento de las nubes de puntos de los sectores de estudio, utilizando el *software* Maptek PointStudio 2023.1. Las nubes de puntos fueron proporcionadas por el departamento de Topografía de S.C.M. Atacama Kozan, y se capturaron mediante el uso de la unidad de escaneo móvil láser Hovermap de la marca Emesent, en escaneos a pie. El procesamiento consideró la limpieza de la nube puntos, suprimiendo puntos generados por presencia de vehículos o maquinaria, personas, agua y elementos asociados al desarrollo de trabajos, tales como, baños, tableros eléctricos, mangas de ventilación, entre otros (Fig. 2.1).

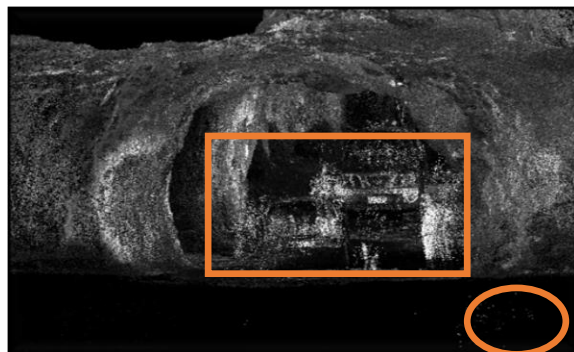


Figura 2.1. Ejemplos de puntos generados por presencia de vehículos, personas y agua. Elaboración propia.

Luego, se generó la superficie de trabajo, mediante la herramienta “Creación de superficie compleja 3D”, lo que habilita el uso de herramientas del módulo geotécnico del programa. Para la captura de discontinuidades se utilizó la herramienta semiautomática “Extraer” del módulo geotécnico (Fig. 2.2), que permite reconocer discontinuidades (fallas, diaclasas, diques, etc.) a partir de la selección de un plano de referencia, agrupando la información reconocida en sets y que, posteriormente, son exportados en archivos de extensión .csv. La información extraída de las nubes de puntos con el *software* PointStudio, permite reconocer características generales de las discontinuidades de cada sector, lo que incluye ubicación en coordenadas UTM, rumbo, dirección de inclinación, buzamiento y área. Los datos estructurales son generados bajo la notación regla de la mano derecha.

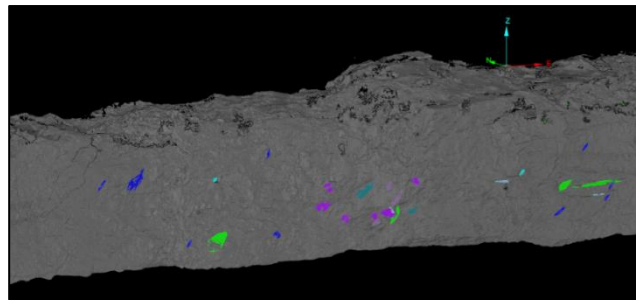


Figura 2.2. Ejemplo de vista de superficie con la captura de discontinuidades. Elaboración propia.

2.3.4. Análisis estereográfico de las discontinuidades.

Representación mediante proyección estereográfica en una red de Schmidt, tanto de las discontinuidades medidas en terreno, como de las capturadas por el software PointStudio, por medio de diagramas de polos y rosetas. La proyección se realizó utilizando el *software* Dips, en donde se analizó la presencia de sistemas de estructuras, relacionados en su orientación, con la finalidad de reconocer tendencias estructurales a lo largo de las labores

2.3.5. Indicaciones de fortificación.

Se utilizó como referencia el diagrama de fortificación de Q de Barton, de acuerdo con el libro de mano del método (NGI, 2022), considerando los elementos de sostenimiento aplicados tradicionalmente en S.C.M. Atacama Kozan (véase Anexo 2), los que consisten, principalmente, en pernos helicoidales de 2,4 m o 3,5 m en conjunto con mallas tejidas de acero capaces de soportar 3.500 kg de carga.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1. Depósitos IOCG

Los depósitos de tipo óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG) corresponden a importantes fuentes de Cu y Au, que pueden incluir cantidades relevantes de U y REE (del Real, 2019). Se han presentado varias definiciones y criterios para definir lo que se considera IOCG (p. ej. Sillitoe, 2003; Williams *et al.*, 2005; Groves *et al.*, 2010; Barton, 2013), lo que ha dado lugar a considerar como tal a un amplio espectro de yacimientos. Las características que definen un depósito de tipo IOCG propuesta por Williams *et al.* (2005) y revisada por Groves *et al.* (2010), tal como se presenta en Skirrow (2021) es:

- Cu y Au como metales de significancia económica.
- Características hidrotermales y controles estructurales, usualmente con brechas.
- Abundantes óxidos de Fe bajos en Ti y/o silicatos de Fe.
- Enriquecimiento de LREE y sulfuros con bajo contenido S, como calcopirita, bornita, calcosina y pirrotina.
- Ausencia de abundantes vetas de cuarzo-sulfuro y alteración que, comúnmente, incluye una disminución del contenido de sílice de la roca encajante.
- Relación temporal con el magmatismo, aunque sin una estrecha relación espacial con las intrusiones.

Groves *et al.* (2010) definen los depósitos IOCG *sensu stricto* como aquellos con un contenido económico mayor a 100 Mt de cobre y oro. Si bien la mayoría se formó entre el Arcaico y el Proterozoico medio (Fig. 3.1), procesos posteriores a la mineralización, como los observados en yacimientos importantes como Salobo y Olympic Dam, dificultan la interpretación de su contexto geológico original (del Real, 2019).

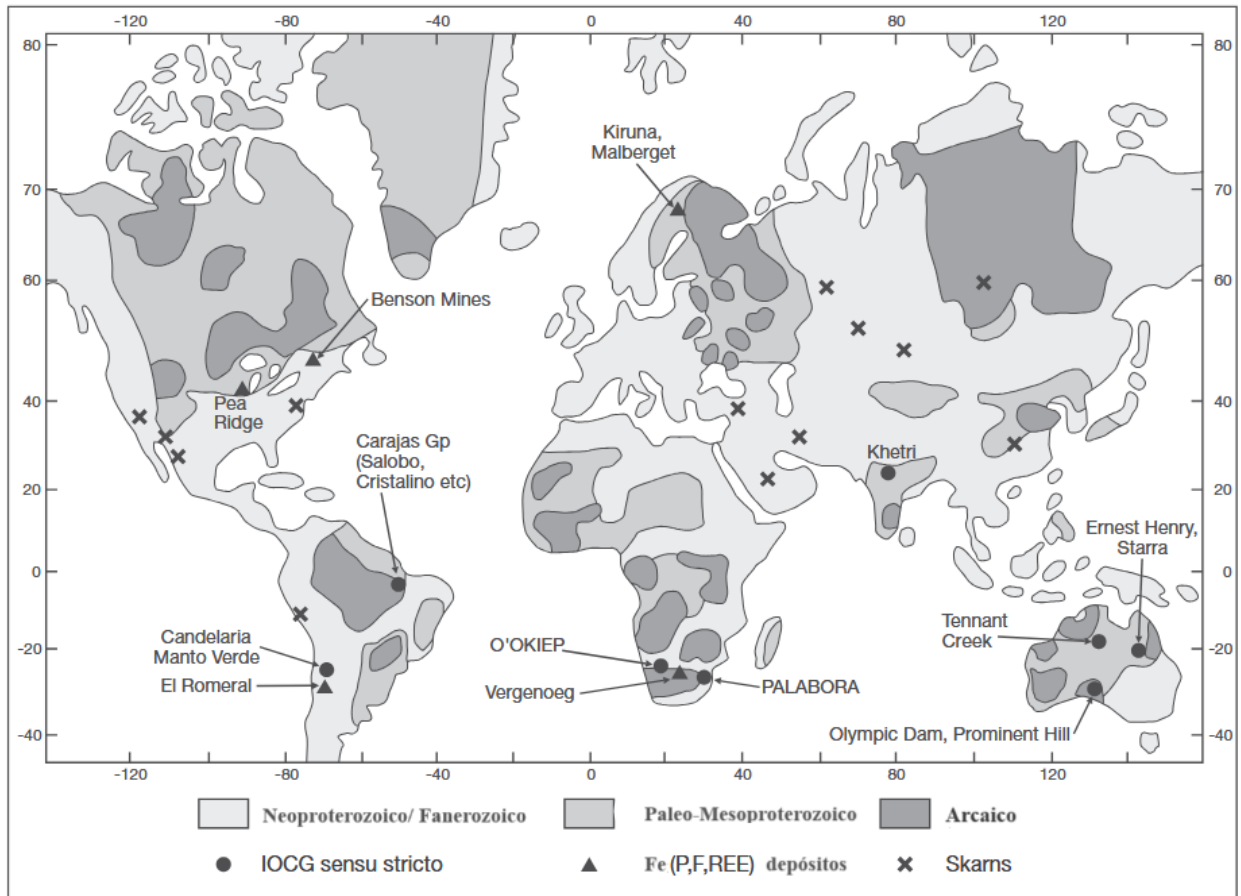


Figura 3.1. Distribución geográfica de los depósitos IOCG sensu stricto, óxidos de Fe (P, F, REE) y depósitos skarns. Modificado de Groves *et al.* (2010).

El cinturón de depósitos IOCG más joven y, por tanto, más accesible de comprender, se ubica en la cordillera de la Costa del norte de Chile y sur de Perú, donde forman parte del arco volcánico - plutónico de edad Jurásica al Cretácico temprano (Sillitoe, 2003). Los depósitos IOCG andinos, según Barra *et al.* (2017), se caracterizan por la abundante presencia de magnetita, calcopirita, contenidos menores de bornita, cantidades relevantes de Au y Ag. La mineralización se dispone de manera masiva, vetas, stockworks, brechas y disseminaciones, que tienden a estar controladas por estructuras formando cuerpos de tipo manto.

El estudio del origen y posible vínculo genético entre los depósitos IOCG y los depósitos IOA (óxido de Fe - Apatito, por sus siglas en inglés), en el cinturón andino ha dado lugar a dos hipótesis: se formaron a partir de fluidos magmáticos (Hitzman *et al.*,

1992; Rieger *et al.*, 2010), o como producto de salmueras de cuenca calentadas por las intrusiones (Ulrich y Clark, 1999; Chen *et al.*, 2011). Con base en el estudio del depósito IOA de Los Colorados, en particular de la magnetita, Knipping *et al.* (2015) plantearon un modelo magmático-hidrotermal de transición entre depósitos IOA profundo hacia depósitos IOCG más somero, donde ambos depósitos son formados por el mismo fluido. Barra *et al.* (2017), de acuerdo con estudios isotópicos Re-Os en muestras de IOCG y IOA, concluyeron que ambos depósitos se formaron por procesos magmáticos-hidrotermales, relacionados con el emplazamiento de cuerpos intrusivos.

3.2. Macizo rocoso y sus características

La definición de macizo rocoso, según González de Vallejo (2002), es un conjunto de bloques de matriz rocosa y discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso siendo discontinuos, anisótropos y heterogéneos. En el mismo trabajo se define a la matriz rocosa como el material rocoso exento de discontinuidades.

Discontinuidad es un término amplio que se refiere a todo tipo de plano o línea que interrumpe la continuidad integral del macizo rocoso. Como ejemplos de discontinuidades se reconocen planos de estratificación, esquistosidad, fallas, diaclasas, entre otros. Las principales características de las discontinuidades (Fig. 3.2) fueron recopiladas por el ISRM (1978; *International Society for Rock Mechanics*) y que se detallan a continuación, de acuerdo con lo presente en Brady y Brown (2005):

- a. Orientación: se refiere a la actitud de las discontinuidades en el espacio, que pueden caracterizarse determinando la inclinación, dirección de inclinación y rumbo de la superficie. La orientación de las discontinuidades afecta a la estabilidad de las labores, condicionando la formación de bloques debido a la relación entre diferentes planos.
- b. Espaciamiento: es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades próximas entre sí y se determina por medio del espaciamiento promedio de cada familia. La fragmentación y permeabilidad del macizo pueden variar de acuerdo con el espaciamiento.

- c. Persistencia: consiste en la extensión del plano que forma la discontinuidad. Usualmente, se define estimando la longitud de la traza del plano, lo que en condiciones de labores subterráneas es particularmente complejo, ya que la ventana visible es acotada. Al igual que el espaciamiento, la persistencia influye en la fragmentación y permeabilidad del macizo.
- d. Rugosidad: considera la ondulación de la superficie de la discontinuidad. Este características incide favorablemente en la resistencia al cizallamiento, en particular, cuando las discontinuidades no presentan relleno, por lo que, en caso contrario la influencia de la rugosidad disminuye.
- e. Apertura: es la distancia perpendicular que separa las paredes de roca que forman una discontinuidad abierta. La dimensión de la apertura puede variar de acuerdo con el desplazamiento generado por cizalle o la pérdida de relleno como resultado de procesos de disolución.
- f. Relleno: describe al material que se encuentra entre las paredes de una discontinuidad. La presencia de relleno repercute en la resistencia al cizalle, en general, provocando una disminución de este, a excepción de rellenos como sulfuros o cuarzo.

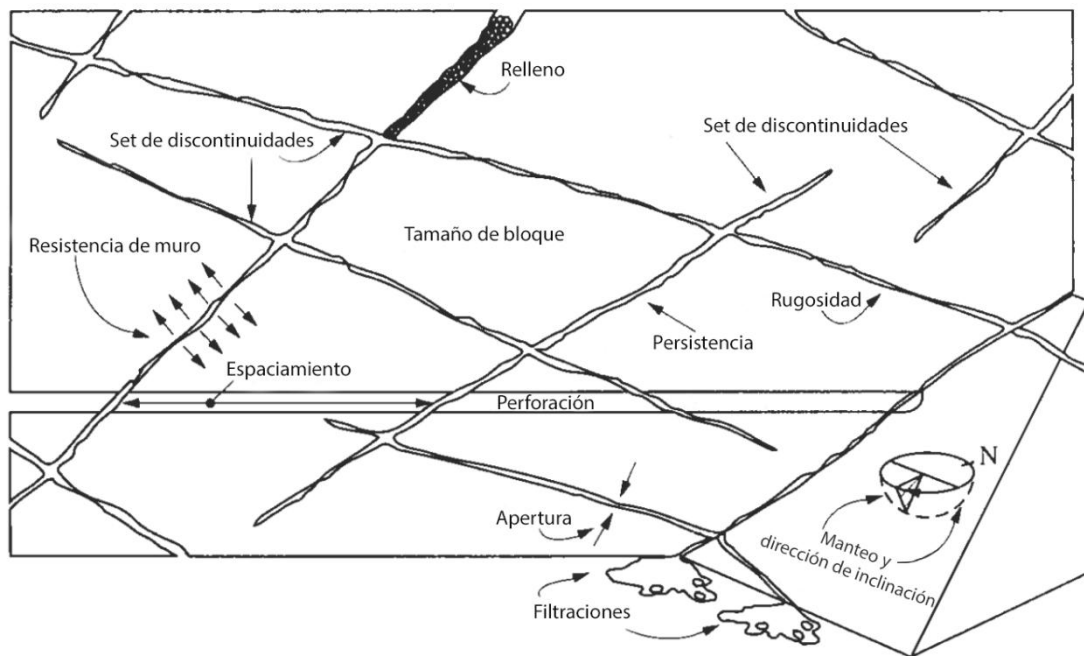


Figura 3.2. Esquema de discontinuidades, y sus características, en el macizo rocoso. Modificado de Hudson (1989).

3.3. Clasificación del macizo rocoso

Las metodologías que clasifican el macizo rocoso son herramientas fundamentales para los estudios geotécnicos, ya que, permiten estimar el comportamiento y calidad del conjunto de bloques y discontinuidades, con el objetivo de generar diseños de estructuras tanto estables como seguros. Las clasificaciones permiten obtener parámetros de resistencia y deformabilidad, siendo las más utilizadas en túneles las metodologías del *Rock mass rating* (RMR) y el índice de calidad Q (González de Vallejo, 2002). A continuación, se detallan las clasificaciones aplicadas en el presente estudio, *Rock quality designation* (RQD), Q y el índice de resistencia geológica (*Geological Strength Index*, GSI).

3.3.1. Rock Quality Designation (RQD).

Es una metodología propuesta por Deere (1963) con la finalidad de cuantificar la influencia de las discontinuidades, considerando su espaciamiento. Fue concebido como un método aplicado durante la caracterización de sondajes, en donde se miden todos los fragmentos de sondajes 10 cm o mayores, valor que posteriormente se divide por el largo del tramo considerado (Fig 3.3).

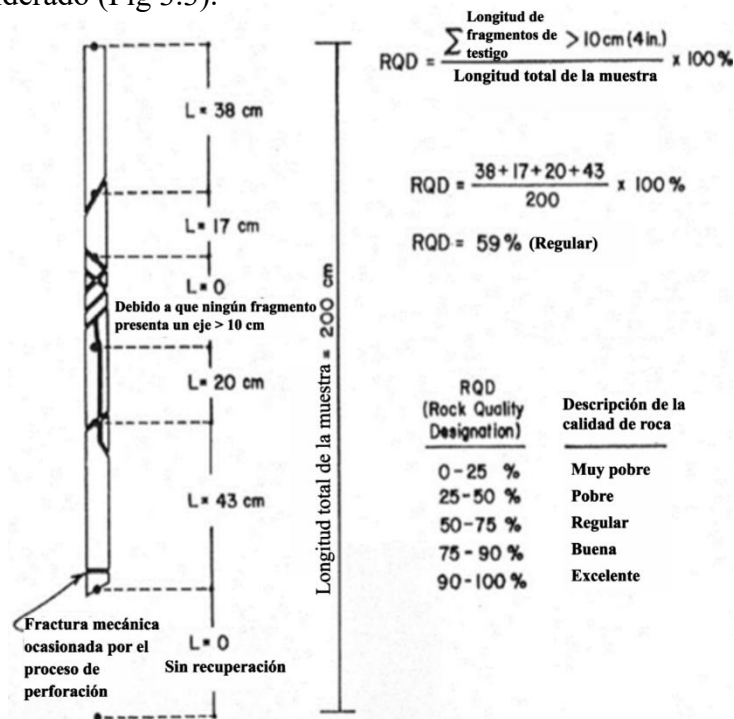


Figura 3.3. Procedimiento de medición y cálculo de RQD. Modificado de Deere y Deere (1989).

Se ha propuesto que es posible determinar RQD tridimensional, considerando el número de discontinuidades por metro cúbico, a partir del conteo de trazas de los planos expuestos (Palmström, 1982). La última actualización de la ecuación (Palmström, 2005) es la siguiente: $RQD = 110 - 2,5J_v$.

3.3.2. Índice de calidad Q.

Es un método de clasificación del macizo rocoso que fue desarrollado por profesionales del Instituto Geotécnico de Noruega entre los años 1971 y 1974 (NGI, 2022). La metodología fue presentada por Barton *et al.* (1974) y permite la clasificación del macizo tanto en contextos subterráneos como en superficie. El índice Q, consiste en la estimación de seis parámetros, a través de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

- RQD = Índice que mide la calidad de la roca intacta en fragmentos de perforación recuperados mayores a 10 cm.
- J_n = Número de familias de discontinuidades (diaclasas, fallas) en la roca.
- J_r = Rugosidad de las discontinuidades.
- J_a = Alteración de las discontinuidades.
- J_w = Presencia de agua.
- SRF = Factor de reducción de esfuerzos, que considera el efecto de los esfuerzos inducidos por la excavación en la resistencia del macizo rocoso.

Al agrupar los parámetros se obtienen tres factores fundamentales para la interpretación del índice Q.

$$\frac{RQD}{J_n} = \text{Grado de diaclasamiento o tamaño de bloque.}$$

$$\frac{J_r}{J_a} = \text{Fricción de las discontinuidades.}$$

$$\frac{J_w}{SRF} = \text{Stress activo.}$$

El valor estimado de Q varía entre 0,001 a 1000 en una escala logarítmica, donde $Q < 0,01$ consiste en un macizo rocoso de calidad geotécnica excepcionalmente pobre, y $Q > 400$ un macizo de calidad excepcionalmente buena, con un total de 9 clases diferentes (Egaña, 2008). A continuación, se presentan las diferentes clases:

- 0,001 a 0,01: excepcionalmente mala
- 0,01 a 0,1: extremadamente mala
- 0,1 a 1: muy mala
- 1 a 4: mala
- 4 a 10: regular
- 10 a 40: buena
- 40 a 100: muy buena
- 100 a 400: extremadamente buena
- 400 a 1.000: excepcionalmente buena

Para efectos del presente estudio, se realizó una leve modificación a la clase regular, incorporando las clasificaciones regular mala (Q: 4 a 5,99), regular (Q: 6 a 7,99) y regular buena (Q: 8 a 10), con la finalidad de reconocer de manera más fácil posibles tendencias.

A partir del valor de Q y la dimensión equivalente del túnel, es posible reconocer el sostenimiento necesario. Considerando la altura o ancho en metros de la excavación, el coeficiente de soporte según la finalidad de la obra (ESR) y el índice Q estimado, es posible determinar sugerencias de sostenimiento, según las categorías de fortificación que se presentan en el gráfico de sostenimiento y que indican recomendaciones técnicas aproximadas para contribuir a la estabilidad de la labor (Anexo 2).

3.3.3. Índice de resistencia geológica (GSI)

Es una metodología empírica de clasificación de macizo rocoso. Fue propuesto por Hoek (1994) y permite estimar tanto la resistencia como la deformabilidad del macizo, por medio de la evaluación de dos parámetros, la blocosidad o entrelazamiento de las rocas, y la condición de las superficies. La combinación de los parámetros genera una descripción cualitativa de las características observadas en el terreno. Marinos y Hoek (2000), presentaron un cartilla con apoyo gráfico que indica los parámetros requeridos por el método y sus categorías (Fig. 3.4).







INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICO GSI (Hoek & Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es mas realista que fijar GSI=35. Tambien notar que esta tabla no se aplica a mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente debiles en una orientacion desfavorable con respecto a la cara de la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultado de cambios en la humedad, se reducira cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de categoria regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones humedas. La presion de poros se maneja con un analisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
ESTRUCTURA		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
		MUY BUENA Muy rugoso. Superficies frescas sin meteorización	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada. superficies con oxido	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimiento compacto o rellenos o fragmentos	MUY MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimiento de arcilla suave o rellenos
	Intacta o Masivo: Especimenes de roca intacta o masivo in roca in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo rocoso no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cubicos formados por tres familias de discontinuidades	80	70			
	Moderadamente Fracturado: Entrelazado, macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o mas familias de discontinuidades		60	50		
	Muy Fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la interseccion de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificacion o esquistocidad			40	30	
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas				20	
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta de formacion de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte					10

Figura 3.4. Cartilla de GSI. Modificado de Hoek y Marinos, 2000.

CAPÍTULO 4: MARCO GEOLÓGICO

4.1. Geología distrital

4.1.1. Formación Punta del Cobre

Fue definida por primera vez por Segerstrom y Ruiz (1962), y se reconoce como un conjunto heterogéneo de rocas volcánicas y volcanoclásticas de edad Cretácico Inferior. Arévalo (2005) determinó que esta formación se encuentra constituida por una secuencia estratificada de rocas volcánicas y sedimentarias, que subyace en concordancia a la Formación Abundancia del Grupo Chañarcillo, y cuya relación en la base no se encuentra expuesta en el área cercana a la comuna de Tierra Amarilla. Como ambiente de formación se interpreta que sería una depositación marina sobre una plataforma continental o línea de costa, con una importante actividad volcánica durante la etapa de sedimentación, la que en un inicio se caracterizaría por el emplazamiento de cuerpos dacíticos con formas de domo y flujos de lava andesíticos (Arévalo, 1999). Desde su primera definición, se han presentado diferentes propuestas de redefinición para esta formación (cf. Ortiz *et al.*, 1966; Ryan *et al.*, 1995; Arévalo, 1999; Marschik y Fontboté, 2001), y la presente en este trabajo corresponde a la subdivisión contenida en del Real *et al.* (2018) y del Real (2019; Fig. 4.1), que complementa lo realizado por Arévalo (1999; 2005), compuesta por cuatro miembros: Andesita Inferior, Dacita, Volcano sedimentario y Andesita Superior.

- *Miembro Andesita Inferior*

Presenta rocas volcánicas masivas, las que varían desde andesitas de grano fino hasta medio, con texturas porfídicas, separadas por autobrechas de flujo, bloques, flujos de ceniza y sedimentos volcánicos retrabajados. En su composición mineralógica, se destaca la presencia de fenocristales de plagioclasa, hornblenda y, en menor proporción, piroxeno (del Real *et al.*, 2018). Comprende una parte de lo que en estudios anteriores se ha denominado miembro Geraldo - Negro (Marschik y Fontboté, 2001). De acuerdo con la exploración por medio de perforación, se estima que la potencia de este miembro supera los 800 m y luego de 700 m de profundidad se han reconocido intercalaciones

sedimentarias, las que incluyen brechas polimícticas y finas capas de sedimentos. La edad determinada a través de un estudio U-Pb en circones es de $135,3 \pm 1,0$ Ma (del Real, 2019).

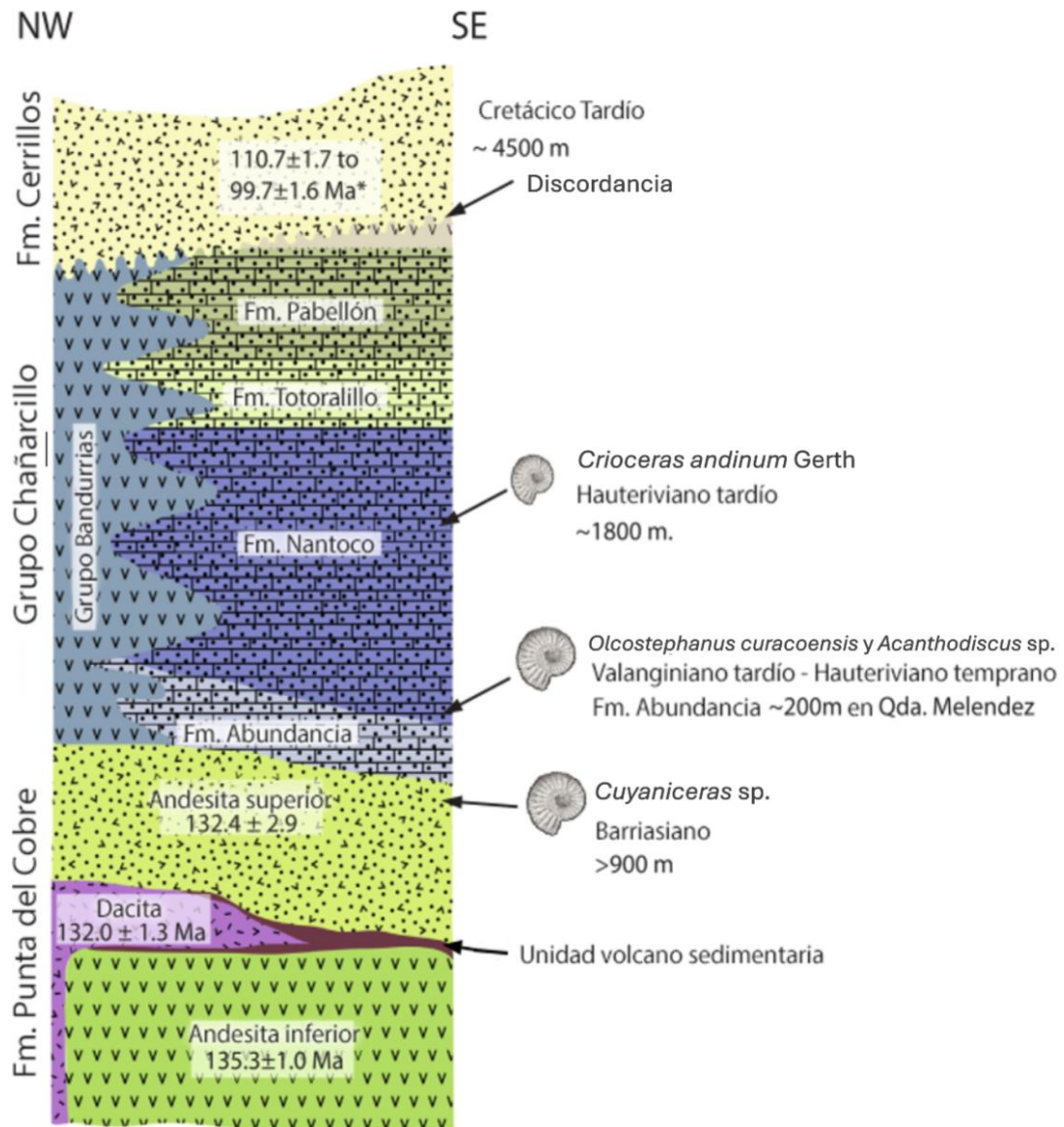


Figura 4.1. Esquema estratigráfico del distrito Candelaria - Punta del Cobre, con las principales edades geocronológicas y paleontológicas. Modificado de del Real (2019).

- *Miembro Dacita*

Se compone de cuerpos de dacita, con textura porfídica, masivos o con rasgos brechosos, que localmente sobreyacen en concordancia al miembro Andesita Inferior, los que presentan fenocristales de plagioclasa y, en menor medida, biotita (del Real, 2018).

Agrupar lo definido en otros estudios como Dacita Meléndez o Albitófiro (Marschik y Fontboté, 2001), este último nombre se debe a que comúnmente se encuentra intensamente alterada, principalmente a albita, así como también cuarzo y clorita (Marschik y Fontboté, 1997). La potencia de este miembro es variable y su origen se ha reconocido como extrusivo por Marschik *et al.* (1997), mediante la observación de intercalación de clastos dentro de los cuerpos dacíticos y contactos erosivos con los sedimentos que los sobreyacen, lo que posteriormente fue complementado por Arévalo (1999). La edad determinada a través de un estudio U-Pb en circones es de $132,0 \pm 1,3$ Ma (del Real, 2019).

- *Miembro Volcano sedimentario*

La composición de este miembro varía desde brechas volcánicas de composición polimíctica, con clastos de andesita, dacita y calizas, en el este del valle de Copiapó, hasta rocas sedimentarias de grano fino fuertemente estratificadas, con intercalaciones de rocas tobáceas hacia el oeste. En los sectores en donde el miembro Dacita se encuentra ausente, la secuencia de rocas volcánicas-sedimentarias sobreyacen al miembro Andesita Inferior. Se han reconocido sectores en donde la relación estratigráfica entre los miembros Dacita y Volcano-sedimentario se encuentra invertida, por lo tanto, se interpreta que poseen un origen principalmente contemporáneo (del Real, 2019). Corresponde a lo denominado en estudios anteriores como Toba Negra o Lutitas Trinidad (Marschik y Fontboté, 2001).

- *Miembro Andesita Superior*

Este miembro contiene lentes discontinuos de rocas basálticas-andesíticas con flujos locales de facies de autobrechas y lavas basálticas afaníticas, las cuales sobreyacen en concordancia a los miembros Dacita y Volcano-sedimentario (del Real, 2019). La potencia de este miembro varía desde algunas decenas de metros hasta aproximadamente los 600 m hacia el sur de Candelaria. Este miembro se ha denominado anteriormente como Miembro Algarrobo (Marschik y Fontboté, 2001). La edad determinada a través de un estudio U-Pb en circones es de $132,4 \pm 2,9$ Ma (del Real, 2019).

El origen que se ha interpretado para el conjunto de rocas que componen la Formación Punta del Cobre, es que se trataría de una acumulación de sedimentos en una plataforma

clástica o línea de costa, contemporánea con actividad volcánica submarina de tipo lávica y explosiva (Arévalo, 2005). Algunos autores han planteado que las rocas de esta formación representarían la parte norte de una cuenca marginal abortada desarrollada durante el Cretácico temprano en Chile central (p. ej. Levi y Aguirre, 1981). Sin embargo, a diferencia de la contemporánea cuenca de trasarco de Chile central, no se ha reconocido la presencia de *flood basalts* (Marschik y Fontboté, 2001).

4.1.2. Grupo Chañarcillo.

Fue definido por primera vez por Segerstrom y Parker (1959) en el valle del río Copiapó, dividiendo al grupo en cuatro formaciones: Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón. Biese-Nickel en Hoffstetter *et al.* (1957) originalmente dividió y describió las formaciones que componen este grupo. Luego, Segerstrom y Ruiz (1962) incorporaron la Formación Punta del Cobre como el miembro basal este grupo, sin embargo, en estudios posteriores (Arévalo, 1999; Mourgues, 2004; del Real *et al.*, 2018; del Real, 2019), se considera que existe una discordancia en el contacto entre las formaciones Punta del Cobre y Abundancia. En el distrito Punta del Cobre se ha reconocido la presencia de afloramientos de rocas pertenecientes a las formaciones Abundancia y Nantoco.

- *Formación Abundancia*

Fue definido como la unidad basal del Grupo Chañarcillo, compuesto por una sucesión calcáreo-arenosa, de aproximadamente 200 m de espesor, que es cubierta en concordancia por calizas pertenecientes a la Formación Nantoco. La sucesión está conformada por calcilutitas y grauvacas verdes, dispuestos en capas continuas, graduando internamente a hacia un techo de calcilutitas blanquecinas o desarrollo de laminación muy fina (Arévalo, 2005). También se ha descrito la presencia de arcosas, calizas de tipo *mudstone* y capas volcánicas menores (del Real, 2019). Se interpreta la presencia de calcilutitas y grauvacas como una acumulación de turbiditas volcanoclásticas de grano fino, en conjunto con una precipitación de carbonatos en un ambiente submareal profundo (Arévalo, 2005).

Hacia el techo de la formación, en la quebrada Meléndez, se han reconocido la presencia de cuatro géneros de ammonoideos (Corvalán, 1974) y en la base de la

formación, en las inmediaciones de la mina Manto Verde, se ha reportado la presencia de *Olcostephaunus* sp. y *Acanthodiscus* sp. (Segerstrom y Ruiz, 1962). A partir de la presencia de los restos fósiles mencionados, los autores propusieron una edad Valangiano superior, algo apoyado por Mourgues (2001), donde recolectó diferentes variedades de *Olcostephaunus*, asignando una edad Valangiano superior temprano para estos depósitos (Arévalo, 2005).

- *Formación Nantoco*

A nivel general, consiste en una secuencia monótona de calizas de color gris, que poseen un espesor variable entre 800 y 1.200 m, disponiéndose de manera concordante sobre las rocas de la Formación Abundancia y subyace de igual forma a los estratos de la Formación Totoralillo (Arévalo, 2005). Segerstrom y Parker (1959), dividieron esta formación en dos miembros: miembro inferior y miembro superior. El miembro inferior se compone de calcilutitas y calcilutitas limosas, con un espesor que varía de 600 a 1.000 m, con trazas de fósiles *Thalassinoides* hacia la zona media inferior del miembro, además de un nivel persistente de calcarenitas bio e intraclásticas. El miembro superior presenta un espesor de aproximadamente 200 m y se encuentra conformado por calcilutitas negras con laminación fina y calcarenitas amarillentas (Arévalo, 2005). Por su parte, Mourgues (2004) describe el miembro inferior de esta formación, compuesto por *mudstones* grises homogéneas y *wakestones*, a su vez, el miembro superior está formado por brechas calcáreas con una matriz evaporítica, siendo este último miembro ampliamente reconocido a lo largo de la región de Atacama.

La edad estimada para la Formación Nantoco por Arévalo (2005) corresponde al Hauteriviano. Le asigna a la Formación una edad hauteriviana, debido al reconocimiento de fósiles de amonites, mencionados por estudios anteriores (Segerstrom, 1960; Corvalán, 1974), que se encuentran presentes en calcilutitas negras hacia la parte alta de la secuencia.

4.1.3. Rocas intrusivas

Las intrusiones más importantes del distrito corresponden al batolito Copiapó, compuesto por los cuerpos intrusivos plutónicos La Brea, San Gregorio y Los Lirios, los

que composicionalmente varían desde diorita a granodiorita (Marschik y Fontboté, 2001; Arévalo, 2005). En el área de Tierra Amarilla, los mencionados cuerpos intruyeron a las secuencias continentales – marinas del Cretácico, es decir, la Formación Punta del Cobre y el Grupo Chañarcillo (Arévalo, 1999).

- *Diorita La Brea*

Se compone de dioritas con clinopiroxeno y hornblenda, las que son de grano grueso. Hacia el este del cuerpo intrusivo se observa una gradación de la diorita gruesa a facies porfídicas de microdioritas y microdioritas cuarcíferas de piroxeno y hornblenda (Arévalo, 2005). Es el cuerpo intrusivo de mayor dimensión de acuerdo con sus afloramientos en el área de Tierra Amarilla. La edad de cristalización determinada en circones por el método U-Pb es de 118 ± 1 Ma (Marschik y Söllner, 2006), siendo hasta el momento, la edad reportada más antigua para cualquier fase del batolito Copiapó (del Real, 2019).

- *Monzodiorita San Gregorio*

Se encuentra compuesto por monzodioritas homogéneas de hornblenda, biotita y clinopiroxeno, con actinolita y turmalina ocasional, además de plagioclasa, ortoclasa y cuarzo intersticial, los que se disponen como agregados seriados. Se encuentra limitado por fallas sinistralas en el oeste y este, lo que lo posiciona en contacto con intrusivo La Brea (Arévalo, 2005). La datación U-Pb en circones, indicó una edad de cristalización de $115,5 \pm 0,4$ Ma (Marschik y Söllner, 2006).

- *Granodiorita Los Lirios*

Principalmente, se compone de granodioritas de biotita y hornblenda, con variaciones a tonalitas y dioritas cuarcíferas de clinopiroxeno. En el límite este del cuerpo, intruye a las formaciones Punta del Cobre y Nantoco, mientras que al oeste intruye al intrusivo La Brea (Arévalo, 2005). La edad de cristalización determinada por análisis de U-Pb en circones entregó una edad de $110,7 \pm 0,4$ Ma (Marschik y Söllner, 2006), por lo que se considera como la fase más reciente del batolito Copiapó (del Real, 2019).

4.1.4. Rocas metamórficas

El emplazamiento del batolito Copiapó produjo una amplia aureola de contacto (hasta 3,5 km) de skarns de calco-silicatos, rocas corneanas y rocas metavolcánicas (Tilling, 1976). Dentro de la aureola de contacto, las calizas del Grupo Chañarcillo se convirtieron en skarns de granate-escapolita, las que varían a mármol hacia el exterior. Mientras que las rocas tobáceas, volcanoclásticas y calizas, localizadas entre el miembro superior de la Formación Punta del Cobre y la base del Grupo Chañarcillo, se convirtieron en skarns de granate y hornfels (Marschik *et al.* 2000).

4.2. Geología estructural distrital

En el área correspondiente al distrito Punta del Cobre, los rasgos estructurales más reconocibles, consisten en el Sistema Plegado y Corrido de Paipote (Arévalo *et al.*, 2006), y estructuras subordinadas al Sistema de Falla de Atacama (SFA) que consisten tanto en la zona de cizalle Ojancos-Florida, como en fallas ramificadas del sistema principal (Fig. 4.2).

Un rasgo de primer orden en el distrito es el Anticlinorio de Tierra Amarilla que se extiende con rumbo NNE desde el valle del río Copiapó hasta la quebrada Algarrobal (Martínez *et al.*, 2016; Arévalo *et al.*, 2006). Esta estructura se habría generado debido a la presencia de un sistema estructural transcurrente, de tipo flor positiva, denominado “Faja Plegada y Corrida de Paipote”, que se compone de fallas de alto ángulo orientadas ~NNE, con movimiento inverso y componente sinistral, que desplazan y deforman a las rocas de edad Cretácico Inferior; siendo la falla Paipote, la falla maestra desde la que se desprenden el resto de las estructuras y que produce el mayor salto estratigráfico (Arévalo, 1999; 2005).

En relación con las ramificaciones asociadas al Sistema de Falla de Atacama (SFA) dentro de las estructuras mayores reportadas en el distrito, se encuentra la zona de cizalle Ojancos-Florida, donde tal como se describe en Arévalo *et al.* (2006), corresponde a una zona de cizalla dúctil NNW localizada próxima al contacto entre las rocas intrusivas y secuencias estratificadas del Cretácico Inferior. La zona habría sido retrabajada por la falla

Paipote, lo que provocó variaciones en la potencia, rumbo y buzamiento. Se han reconocido rocas miloníticas de protolito monzodiorítico, y esquistos miloníticos de protolito volcánico-volcanoclástico, identificando grado metamórfico variable, con facies de anfibolita en el centro y facies de esquistos verdes hacia el norte y sur, asociado a la presencia de actinolita, clorita, epidota.

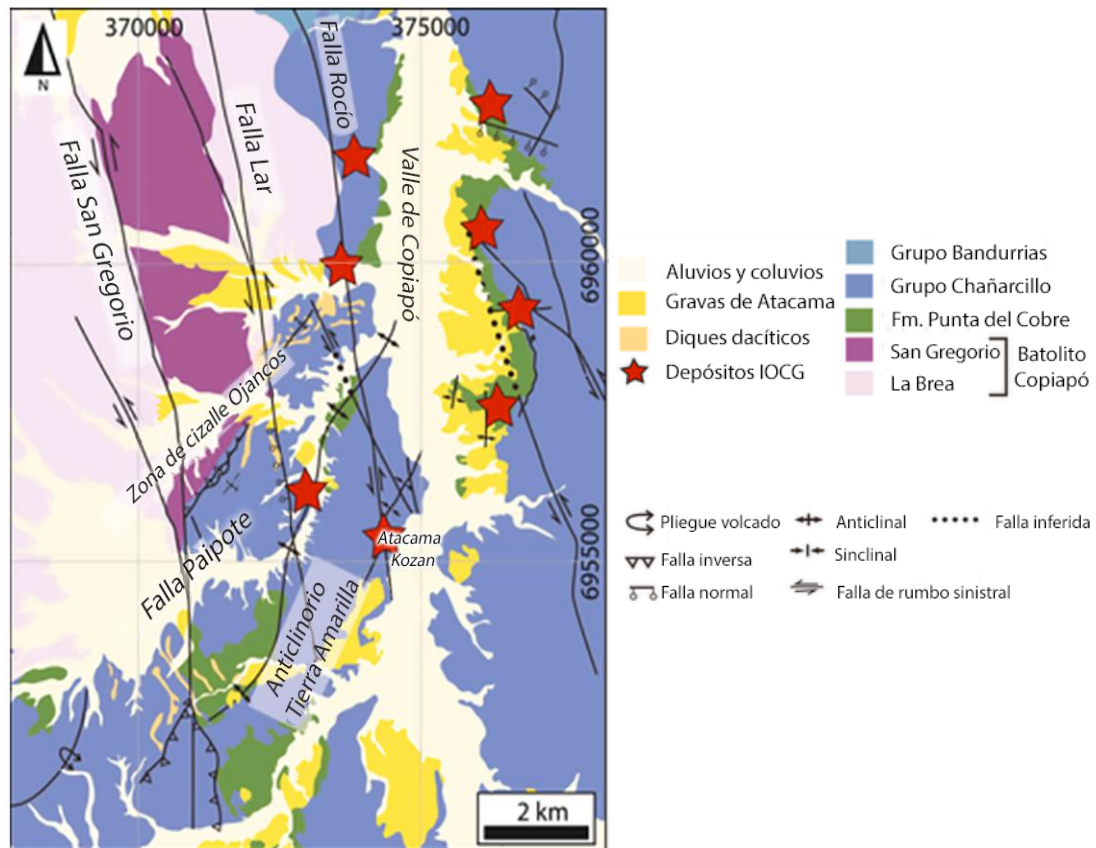


Figura 4.2. Mapa geológico-estructural simplificado del distrito Candelaria-Punta del Cobre. Modificado de del Real *et al.* (2023).

En el distrito se han reconocido estructuras de rumbo, de componente sinistral y de orientación NW-NNW, que Arévalo *et al.* (2006) indican como parte de un sistema regional de igual orientación, dentro de las que se han descrito a las fallas Lar, Rocío y Ojancos. La falla Lar corta al depósito de Candelaria y en ella se ha observado la presencia de estrías verticales, a pesar del dominio de las estrías horizontales (del Real, 2019).

Arévalo (1999), identificó cuatro sistemas estructurales para el área de la mina Candelaria, las que consideró representativas para las principales fases de deformación definidas a escala distrital. Desde el sistema más antiguo al más reciente, consisten en

zona de cizalla dúctil de bajo ángulo, fallas lítricas normales de ángulo medio-bajo, un anticlinal normal que comprende al conjunto de la secuencia estratificada, y un sistema de fallas de rumbo.

La etapa de mineralización del distrito Punta del Cobre se ha asociado a un contexto estructural transtensivo (Arévalo *et al.*, 2006), sin embargo, del Real *et al.* (2023) proponen que la mineralización se produjo en un escenario de transpresión con acortamiento NW-SE asociado a fallas de rumbo sinistral-inversas NNW. En este contexto, Seymour *et al.* (2024) plantean que la mineralización IOCG del distrito Sierra Chicharra y su zona de cizalle sinistral NW, adyacente a ~20 km al oeste del distrito Punta del Cobre, se desarrollaron en un régimen transpresivo producto de la convergencia oblicua SE a lo largo de una zona de cizalle de rumbo NE.

4.3. Geología local de Atacama Kozan

La formación huésped del depósito de Atacama Kozan corresponde a la Formación Punta del Cobre, en particular, la zona superior del miembro Andesita Inferior y el miembro Volcano sedimentario; donde la zona mineralizada se considera una extensión del horizonte “Manto” del depósito de Candelaria (del Real, 2019). La litología propia del yacimiento se encuentra ampliamente descrita en (i) las memorias realizadas por Solís (2016) y Pérez (2019), (ii) informes geológicos internos, y (iii) descripciones litológicas contenida en el trabajo de Ichii *et al.* (2007). A partir de los estudios mencionados, se han definido cuatro unidades geológicas informales (U.G.), las que consisten, desde base a techo de la columna estratigráfica, en unidad Andesitas, unidad de Manto que hospeda mineralización, unidad Metasedimentos y unidad Tobas (Fig. 4.3). Para el caso de la unidad de Andesitas, los trabajos de Solís (2016) y Pérez (2019), proponen diferentes subdivisiones, las que son especificadas a continuación.

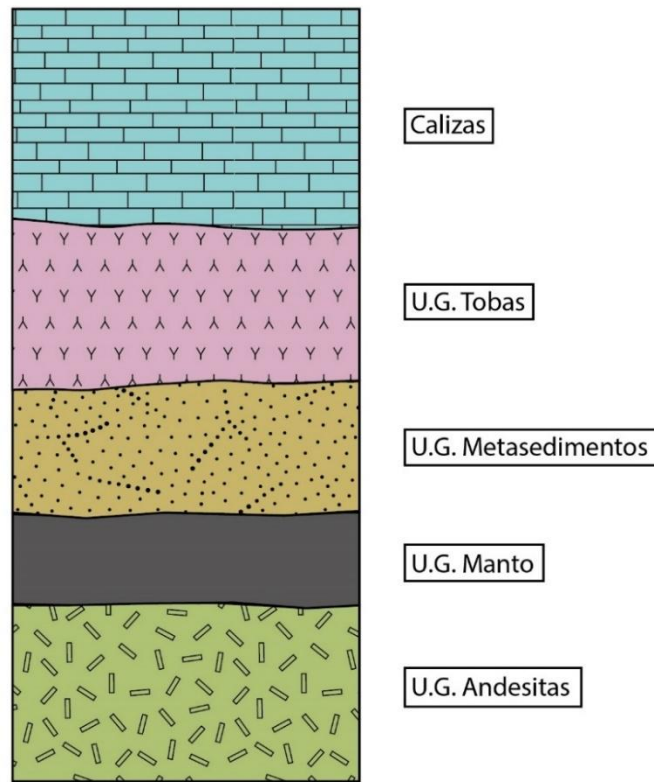


Figura 4.3. Esquema de la división estratigráfica del yacimiento Atacama Kozan, indicando unidades geológicas informales, utilizadas en el depósito. Modificado de Solís (2016).

4.3.1. Andesitas

La unidad consiste en rocas andesíticas porfídicas con fenocristales de plagioclasa, que presentan una intensa alteración potásica, con pirita diseminada o en lentes, y con escasa mineralización de calcopirita. Se dispone subyaciendo a la unidad geológica informal de Manto.

4.3.2. Subdivisión de unidad Andesitas propuesta por Solís (2016)

La propuesta considera 5 subdivisiones informales para rocas pertenecientes a la unidad Andesita, cercanas a la unidad Manto del depósito, de acuerdo con un estudio realizado en los niveles 136, 165 y 310 de la mina; en las galerías MNE, OS3-S1, BRS8, BNL, BRS1 y BRS2.

- Andesitas biotitizadas – cloritizadas

Corresponden a andesitas afaníticas intensamente alteradas a biotita y moderada alteración a clorita. Adicionalmente, se observa evidencia de alteración débil a cuarzo, epidota y hematita. El contenido de minerales opacos es de 10-25 %, con un 10-25 % de magnetita, 5-15 % de pirita y 5-10 % de calcopirita, teniendo como modo de ocurrencia en vetillas y diseminado; a excepción de la calcopirita que se presenta sólo en vetillas. Se distribuye, principalmente, en la zona NE del depósito y subyace a la unidad de manto.

- Andesitas alteradas a feldespatos potásicos con argilización sobrepuesta

Corresponden a andesitas afaníticas intensamente alteradas a feldespato potásico e intensamente argilizadas. Además, se ha observado alteración débil a cuarzo y clorita. El contenido de minerales opacos corresponde a 10-20 %, con 10-15 % de magnetita, 2-10 % de pirita y 1-5 % de calcopirita, con modos de ocurrencia tanto en vetillas como diseminado. La distribución se ha reconocido en todo el yacimiento, principalmente, en las galerías del nivel 136.

- Andesitas silicificadas.

Considera a andesitas afaníticas intensamente alteradas a cuarzo. Las rocas, de igual forma, presentan evidencias de alteración potásica, en algunos sectores, de manera pervasiva, además de argilización débil a moderada en cristales de feldespato. Dentro de los minerales de mena observados se cuenta con 10-15 % de magnetita, 2-10 % de pirita y 1-3 % de calcopirita, con modo de ocurrencia en vetillas y diseminados. Su distribución se ha observado en la totalidad del yacimiento y, en algunos sectores, especialmente asociada a andesitas alteradas a feldespato potásico.

- Andesitas sin alteración.

Consiste en andesitas afaníticas que no presentan una alteración que afecte a la litología en su conjunto, sin embargo, se han observado plagioclasas con alteración argílica leve a escasa, a sericita y pistacita. La distribución de minerales de mena corresponde a 10-25 % de magnetita, 5-15 % de pirita y 5-10 % de calcopirita, teniendo como modo de ocurrencia

en vetillas y diseminado; a excepción de la calcopirita que se presenta sólo en vetillas. No se ha reconocido una distribución con características particulares en el yacimiento.

- Unidad de brecha volcánica.

Corresponde a rocas de tipo brecha, monomícticas, generalmente matriz soportada, compuesta por clastos de andesita, usualmente con alteración potásica. La matriz de las brechas presenta argilización débil a moderada y alteración moderada a clorita y sílice. Los minerales de mena presentes corresponden a 10-20 % de magnetita, 1-5 % de pirita y 2-5 % de calcopirita, teniendo como modo de ocurrencia en vetillas y diseminado; a excepción de la calcopirita que se presenta sólo en vetillas. Se ha reconocido la presencia a lo largo de todo el yacimiento.

4.3.3. Subdivisión de unidad Andesita propuesta por Pérez (2019)

La propuesta considera 4 subdivisiones para rocas pertenecientes a la unidad Andesitas del depósito (Fig. 4.4), de acuerdo con un estudio realizado en los niveles 165 y 310 de la mina; en las galerías SLSW1, SLSW2, SLSW3 y SLSW4.

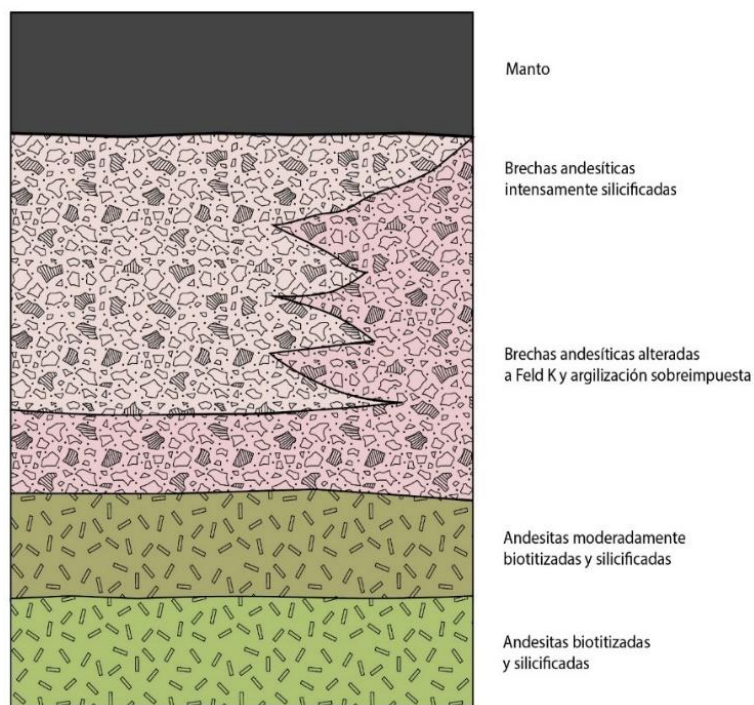


Figura 4.4. Esquema estratigráfico de la subdivisión de rocas pertenecientes a la unidad Andesita. Modificado de Pérez (2019).

- Andesitas débilmente biotitizadas y silicificadas.

Se compone de rocas andesíticas de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa en una matriz afanítica, levemente alteradas a biotita y sílice. Se destaca la presencia de vetillas tipo *stockwork*, rellenas con cuarzo y minerales opacos. Los minerales de mena presentes en la roca corresponden a un 6 % de magnetita, 7 % de pirita y <1 % de calcopirita, dispuestas en vetillas y diseminados. Se identificó como la subunidad inferior de la unidad geológica informal Andesitas, y reconocida en los accesos de los niveles de producción del nivel 165.

- Andesitas moderadamente biotitizadas y silicificadas.

Compuesta por rocas andesíticas de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa de moderada a intensamente silicificados, en una matriz biotitizada, donde la intensidad de la alteración, en algunos sectores, oblitera la textura original de la roca. La mineralización es escasa, tanto en vetillas como diseminada, y corresponde a 4-20 % de pirita, 2-4 % de calcopirita, 5 % pirrotina y 2-4 % de magnetita. La presente subunidad sobreyace a la subunidad de andesitas débilmente biotitizadas y silicificadas, y se reconoce en la totalidad de los niveles de producción estudiados.

- Brechas andesíticas alteradas a feldespatos potásico con argilización sobreimpuesta.

Corresponde a ortobrechas, compuestas por clastos angulosos, con alteración pervasiva a feldespatos potásico y, ocasionalmente, a epidota, además de biotitización moderada a débil en la matriz. La mineralización es escasa, diseminada, y se divide en un 10 % de magnetita, <1 % de calcopirita y <1 % de pirita. Se dispone adyacente al manto o en interdigitación con la brecha andesita intensamente silicificada.

- Brechas andesíticas intensamente silicificadas.

Se compone de ortobrechas, formadas por clastos angulosos, los que se encuentran intensamente alterados a sílice, en una matriz con alteración débil a moderada a epidota y biotita. La mineralización es escasa y se divide en un 10 % de magnetita, 3 % de pirita,

1% de calcopirita y 1 % de pirrotina, teniendo como modo de ocurrencia diseminado. La subunidad se dispone adyacente a la unidad informal de manto, y aflora en el nivel 165.

4.3.4. Manto

Esta unidad corresponde a la unidad de mayor interés del yacimiento, ya que se trata de la unidad de extracción del mineral. De potencia variable desde 3 a 70 metros, y presenta una mayor potencia y extensión en superficie hacia el sector centro-norte del depósito (Solís, 2016). Consiste en rocas de color gris oscuro a verdoso, generalmente, con textura obliterada por reemplazo a magnetita, además de presentar alteración a clorita, actinolita, biotita y localmente hematita. En sectores donde disminuye la pervasividad de las alteraciones, es posible observar que la roca original correspondería a rocas sedimentarias, de tipo conglomerados, areniscas y lutitas. La mineralización se reconoce en vetas, *stockworks*, brechas y mantos, con un contenido abundante de magnetita (hasta un 70 %), calcopirita (10-30 %), pirita (5 %) y pirrotina (10 %) (Pérez, 2019). Las leyes de cobre varían entre 0,4 % a 3,5 %, teniendo como único mineral de mena la calcopirita, en porciones en donde la presencia de magnetita es superior al 15 % (Solís, 2016).

4.3.5. Metasedimentos

Las rocas pertenecientes a esta unidad consisten en rocas sedimentarias que presentan rasgos de metamorfismo de bajo grado. Solís (2016) menciona la presencia de rocas de color gris oscuro, de grano fino, cantidad moderada de micas y sectores de gran fisibilidad, a las que denominó como “Meta-lutitas”. Posteriormente, Pérez (2019) describe rocas de grano medio, que no superan el metro de espesor, y que identificó como metareniscas. La unidad presenta alteración intensa a biotita y silicificación leve a moderada. Pérez (2019) identifica una fábrica bandeada, la que se divide en bandas estériles de arenisca silicificada, con un alto contenido de biotita, bandas mineralizadas, con textura obliterada por la intensa alteración a cuarzo, biotita y clorita. Se ha reconocido la presencia de la unidad de Metasedimentos en medio de la unidad de Manto del sector SLSW1, en el nivel 165 (Pérez, 2019).

4.3.6. Tobas

Rocas de tonalidad pardo oscuro, que presentan silicificación y alteración a feldespato potásico, con matriz cinerítica silíceos y andesíticos, en ocasiones, con escaso granate. La unidad contiene mineralización sólo presente en vetas, de extensión milimétrica a centimétrica, y consiste en magnetita, calcopirita, pirita y pirrotina. Se encuentra dispuesta sobre la unidad Manto, y se ha identificado en las perforaciones para los niveles 165 y 310 (Pérez, 2019).

4.3.7. Caliza estéril

De acuerdo con las características estratigráficas del depósito, determinadas por medio del estudio de sondajes y presentadas por Ichii *et al.* (2007), sobre las rocas tobáceas, se ha reconocido la presencia de rocas sedimentarias de tipo caliza, las que no presentan mineralización.

4.4. Geología estructural de Atacama Kozan

A lo largo de la mina, se han medido diaclasas de rumbos preferentes NW, NNW y NNE, las que presentan buzamientos de alto ángulo (60-90°). Solís (2016) determinó la presencia de dos sets de diaclasas de rumbo, NNW y NW, con registros ocasionales de un sistema NNE. Por otra parte, Pérez (2019) estableció que, en su área de estudio, es posible reconocer cuatro sets de diaclasas de rumbos principales NW, NNW y NNE, con escasos registros de un sistema ~E-W.

El depósito se encuentra limitado lateralmente por dos fallas principales que se han identificado como de tipo normal, la falla Santa Gemita en el límite occidental y la falla Este hacia el límite oriental, ambas con rumbos NW, y buzamientos de 80-90° y 50-55° respectivamente, las que se han definido como estructuras ramificadas del Sistema de Fallas de Atacama (Solís, 2016). En la falla Santa Gemita se observa un espesor de brecha de falla de 60 a 120 cm, con halo de influencia de 15 m a cada lado y relleno de óxidos de hierro. La falla Este posee un espesor de 1 m, con un halo de alteración principalmente argílico de 30 m a cada lado.

En el yacimiento, se ha reconocido la distribución de diques de composición gabroica, espesores centimétricos (10-50 cm), rumbos ~NW y con direcciones de inclinación SW-NE, donde se sugiere que, de acuerdo con las observaciones en terreno, el emplazamiento de los diques estaría controlado por las fallas principales (Solís, 2016).

4.5. Modelo geotécnico de Atacama Kozan

A partir del análisis de la información geológica, geotécnica y estructural del yacimiento, obtenida por estudios realizados tanto por el personal del Departamento de Geomecánica y el Departamento de Geología de la compañía, como por instituciones consultoras, se han definido 7 unidades geotécnicas (UGT) (Tabla 4.1; E-Mining, 2008; SCMAK, 2018) las que se distribuyen en forma variable a lo largo del yacimiento (Fig. 4.5). Una de las características más importantes para la definición de las UGT ha sido el grado de fracturamiento, ya que se considera que permite una correcta diferenciación del macizo rocoso de la mina (E-Mining, 2008).

Tabla 4.1. Resumen de índices de calidad promedios (GSI, RMR y Q) de unidades geotécnicas. Elaboración propia. Comunicación personal, noviembre 2023.

Unidades Geotécnicas	GSI prom	RMR prom	Q prom
1	59	64	9,2
2	54	59	5,5
3	57	62	7,7
4	59	64	8,9
5	59	64	9,0
6	49	55	3,3
7	47	52	2,4

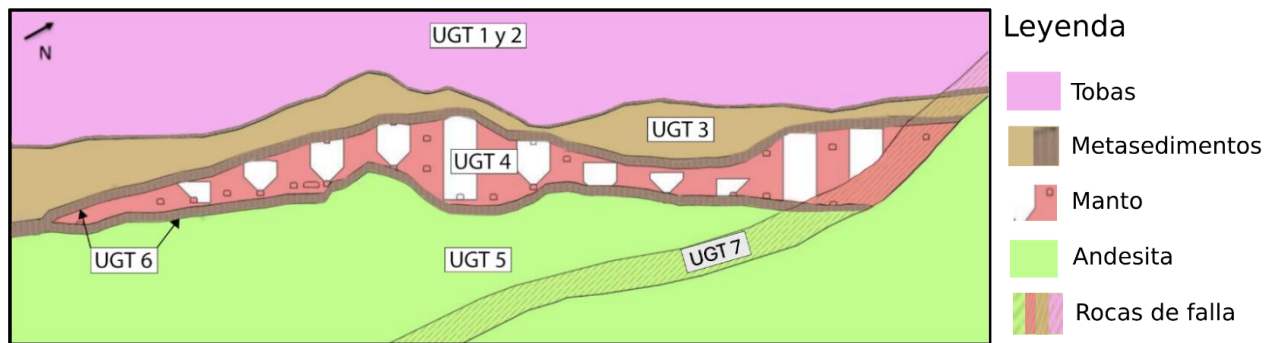


Figura 4.5. Perfil esquemático de la distribución relativa de las unidades geotécnicas del yacimiento de Atacama Kozan. Modificado de SCMAK, 2018.

- UGT 1

La presente unidad consiste en rocas tobáceas duras (R4-5, véase anexo 3), con silicificación y presencia de alteración a feldespato potásico, con una diferencia horizontal de la UGT 2. El índice RMR promedio es 64, GSI promedio es 59 y Q de 9,2, por lo tanto, se considera una unidad de buena calidad geotécnica. El principal mecanismo de inestabilidad asociado a esta unidad es la generación de bloques por la intersección de discontinuidades.

- UGT 2

Unidad compuesta por rocas tobáceas duras (R4-5) que presenta silicificación y alteración a feldespato potásico, con una diferencia horizontal de la UGT 1. El índice RMR promedio es 59, GSI promedio de 54 y Q promedio de 5,5, por lo que se considera que esta unidad posee calidad geotécnica buena a regular y de peor calidad relativa con respecto a la UGT 1, debido al aumento del grado de fracturamiento. El principal mecanismo de inestabilidad asociado a esta unidad es la generación de bloques por la intersección de discontinuidades.

- UGT 3

La roca que compone esta unidad se considera como rocas sedimentarias que presentan un bajo grado de metamorfismo de dureza moderada (R3-4), es decir, de menor dureza con respecto a otros dominios. El índice RMR promedio es 62, GSI promedio de 57 y Q de 7,7, por lo que se considera que la presente unidad es de buena a regular calidad geotécnica, y muestra mejores condiciones hacia niveles superiores. El principal mecanismo de inestabilidad que se asocia a esta unidad es el lajamiento en el techo de las labores, producto de la baja calidad geotécnica del relleno blando que presentan las discontinuidades, y la orientación subhorizontal de las diaclasas y la laminación. Además, se ha observado inestabilidad a partir de la formación de bloques por intersección de discontinuidades.

- UGT 4

Unidad compuesta por rocas con abundante magnetita, que oblitera su textura original, y silicificadas de alta dureza (R4-5). El índice RMR promedio es de 64, GSI promedio de 59 y Q de 8,9, por lo tanto, posee una buena calidad geotécnica. La formación de bloques por intersección de discontinuidades constituye el principal mecanismo de inestabilidad. En algunos sectores de la mina, la UGT 4 se dispone en intercalación con la UGT 3, por lo que se generan lajamientos en el techo de las labores, producto de las características subhorizontales de las rocas que componen a la UGT 3.

- UGT 5

Esta unidad se encuentra compuesta por rocas volcánicas andesíticas duras (R4-5), que presenta silicificación y alteración a feldespato potásico. El índice RMR promedio es de 64, GSI promedio es 59 y Q de 9,0, con máximos de RMR 85 y GSI 80 en sectores con notable presencia de calcopirita, por lo que se considera de buena calidad geotécnica. Se ha reconocido la presencia de foliación en algunas labores, observando un comportamiento similar a lo establecido para la UGT 3. La formación de bloques por intersección de discontinuidades constituye el principal mecanismo de inestabilidad.

- UGT 6

Se compone de rocas sedimentarias que presentan un bajo grado metamórfico con mayor grado de fracturamiento que las identificadas en la UGT 3. Las rocas se disponen en forma de franja, alrededor de los contactos con rocas andesíticas y rocas con alteración pervasiva de magnetita. El índice RMR promedio es de 55, GSI de 49 y Q de 3,3, no obstante, en sectores donde se observan bandas discontinuas de potencia variable dentro de la UGT, el índice GSI promedio disminuye a 25-30. Los límites de esta unidad varían, dependiendo del sector a considerar y los mecanismos de inestabilidad son similares a lo presente en la UGT 3, es decir, lajamiento en el techo de las labores y formación de bloques por intersección de discontinuidades.

- UGT 7

La unidad se compone de rocas de falla (harina o brecha de falla) de dureza moderada a blanda (R3-1), lo que se debe al control ejercido por las fallas distritales. El índice RMR promedio es 52, GSI promedio de 47 y Q de 2,4, con RMR mínimo de 10 y GSI de 5 sobre las fallas. Se considera que el macizo en esta unidad es de regular a muy pobre en calidad. El alto grado de fracturamiento relacionado con la presencia de cizalle y la baja cohesión, se consideran como los principales mecanismos de inestabilidad.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. Petrografía

A partir de la selección de 30 muestras de mano extraídas, se describieron al microscopio ocho muestras de roca, es decir, una muestra por cada subsector de estudio, por medio de un microscopio petrográfico. Fue posible distinguir dos litologías, andesitas biotitizadas-cloritizadas y filitas de biotita. En el caso de las andesitas, estas se identificaron en todos los subsectores, mientras que las filitas fueron reconocidas en algunas celdas de los subsectores Haru intermedio y Haru inferior.

Andesita biotitizada-cloritizada

En muestra de mano, se describe como una roca ígnea volcánica de color gris verdoso, textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (20-30%) y una masa fundamental (80-70%) afanítica. Además, se reconocen vetillas de cuarzo que contienen cantidades menores de calcopirita, piritita y epidota.

Microscópicamente, las muestras presentan una textura porfídica, holocristalina, hipidiomórfica, formadas por fenocristales de albita euhedral a subhedral (25-30%), con tamaños que varían entre 1,3 mm y 0,5 mm (Fig. 5.1a) y que se encuentran moderada a intensamente alteradas a sericitita. La masa fundamental se compone por minerales de tamaño fino <0,1 mm de plagioclasa subhedral a anhedral (45-50%), cuarzo anhedral (15-20%), cristales subhedrales a anhedrales de biotita secundaria (25-30%). Además, se constató la presencia de clorita (10-15%), en general, alterando a cristales de biotita secundaria (Fig. 5.1b). Los minerales de menor presencia consisten en epidota anhedral (1-4%) con un tamaño de 0,05 mm a 0,1 mm, y cristales subhedrales de actinolita (1-3%) de tamaño promedio de 0,08 mm, los que se disponen como cúmulos (Fig. 5.1c).

Los minerales opacos de las muestras se distribuyen diseminados, con escasa presencia (<5%) y de tamaño 0,06-0,3 mm. En la totalidad de las muestras definidas como andesitas, se reconocieron vetillas de cuarzo de potencia inferior a 0,5 mm, las que incorporan cristales de clorita y contenido muy leve de minerales opacos (Fig. 5.1d).

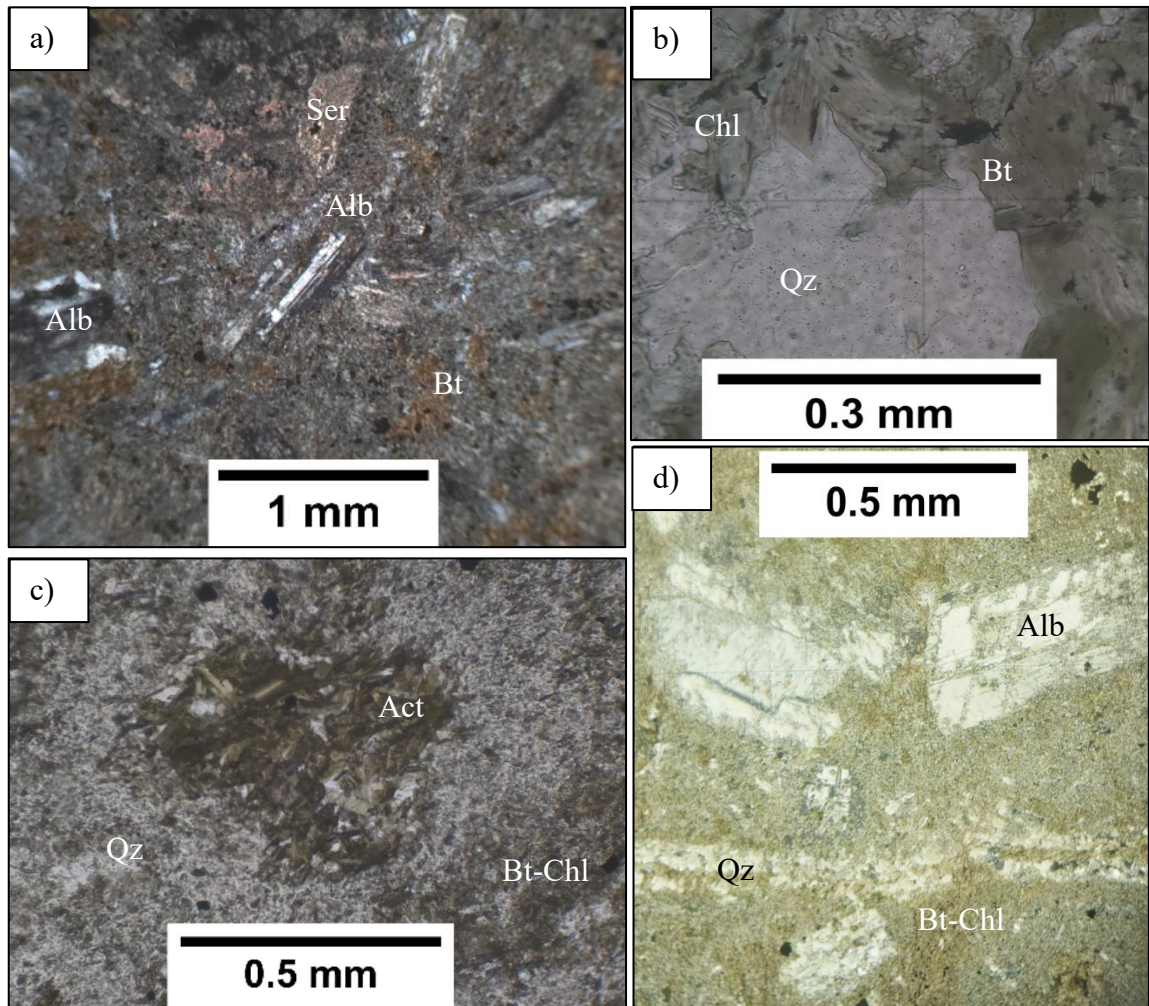


Figura 5.1. Microfotografías de andesitas biotitizadas-cloritizadas. a) Albitas subhedrales alteradas a sericita, nicoles cruzados 10x4. b) Biotitas alteradas a clorita, nicoles paralelos 10x25. c) Cúmulos de actinolita, nicoles paralelos 10x10. d) Vetilla de cuarzo, nicoles cruzados 10x10. Las abreviaturas utilizadas en las figuras son: Act (actinolita), Alb (albita), Bt (biotita), Chl (clorita), Qz (cuarzo) y Ser (sericita).

Filita de biotita

Macroscópicamente, consiste en una roca de color negro verdoso que se compone, principalmente, de micas de grano fino y cuarzo de grano fino. Se destaca el desarrollo de foliación con orientación preferencial de los cristales micáceos. Además, se reconocen vetillas de cuarzo y sulfuros (calcopirita y pirita), y vetillas de calcita con epidota. En el conjunto de rocas estudiadas, no fue posible establecer la relación de corte entre las mencionadas vetillas.

Microscópicamente, estas rocas presentan una textura granolepidoblástica, con un dominio microlitónico (o QF, cuarzo-feldespático) que se compone por cristales de cuarzo (25-30%) de tamaño fino a medio (0,05-0,6 mm), y un dominio M (compuesto principalmente por filosilicatos) formado por cristales de biotita (40-45%), además de clorita (5-15%) y actinolita (5-10%) de grano fino (<0,05 a 0,15 mm), con un espaciamiento promedio entre dominios de 0,4 mm (Fig. 5.2a). El espaciamiento entre dominios fue el principal elemento discriminador para definir a las muestras como filitas. Adicionalmente, se observan cristales de epidota anhedrales (~0,1mm) en zonas de concentración de minerales opacos, en conjunto con cristales de clorita (Fig. 5.3a). El contenido de minerales opacos, principalmente, diseminados es leve (<3%). De acuerdo con el contenido mineral, se interpreta que el protolito es de tipo sedimentario.

Se han reconocido vetillas de calcita-epidota (Fig. 5.2b) y epidota-sulfuros (Fig. 5.3b,c), con potencias inferiores a 0,1 mm, en donde no fue posible establecer una relación de corte entre ellas. En el caso de la asociación epidota-sulfuros, se han observaron indicadores cinemáticos de cizalle (Fig 5.3c).

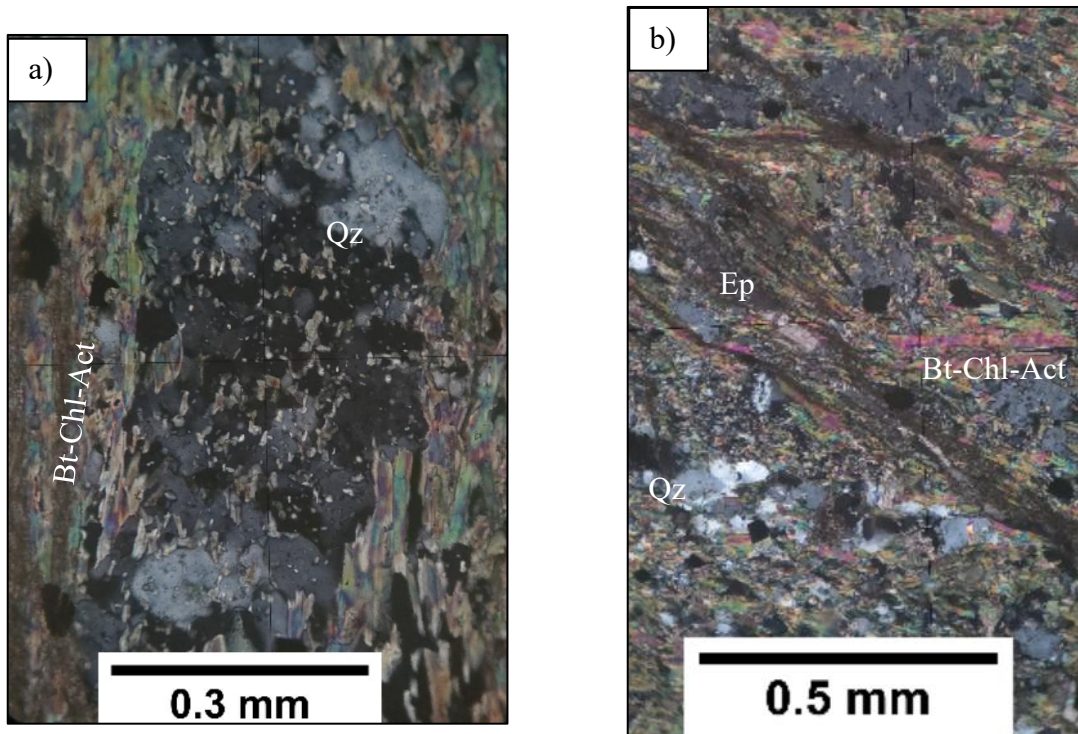


Figura 5.2. Microfotografías de filitas de biotita. a) Relación entre dominios (M y QF), nicoles cruzados 10x40. b) Vista general de la muestra AK50M3, nicoles cruzados 10x25. Las abreviaturas utilizadas en las figuras son: Act (actinolita), Bt (biotita), Chl (clorita) y Qz (cuarzo).

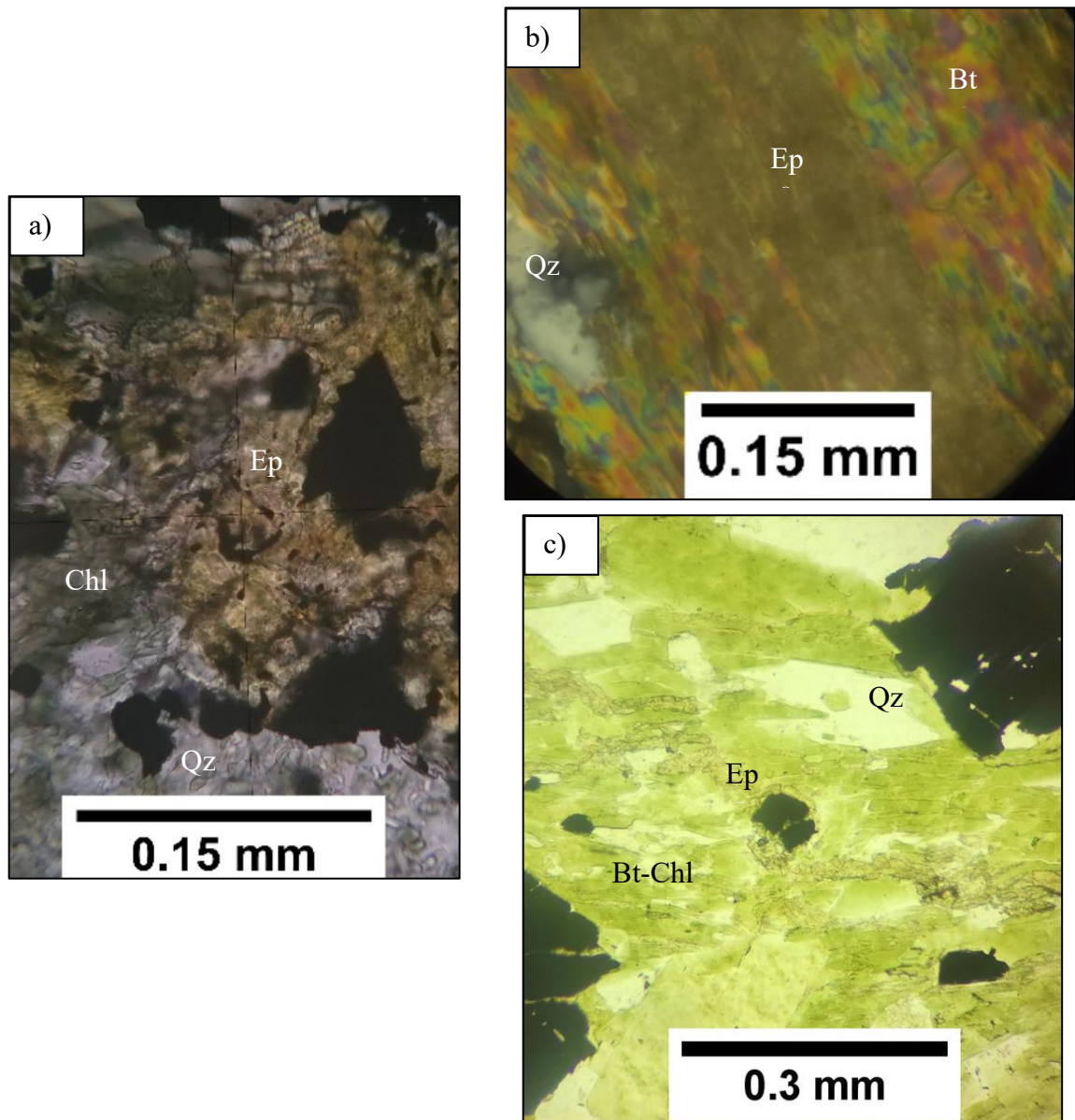


Figura 5.3. Microfotografías de filitas de biotita. a) Epidota y clorita junto con minerales opacos, nicoles paralelos 10x40. b) Vetilla de epidota, nicoles cruzados 10x40. c) Indicador cinemático de cizalla, nicoles paralelos 10x40. Las abreviaturas utilizadas en las figuras son: Act (actinolita), Bt (biotita), Chl (clorita) y Qz (cuarzo).

5.2. Geotecnia Haru

5.2.1. Discontinuidades

Haru superior

En base al levantamiento de estructuras en el subsector Haru superior se detectaron 9 fallas menores de 3 cm de espesor promedio, mínimo de 1 cm y máximo de 6 cm, principalmente, con relleno de harina de falla. En el análisis de estas discontinuidades, de acuerdo con el diagrama de rosetas, se observan dos orientaciones principales: ~N-S y NNE (Fig. 5.4a). El estereograma de densidad de polos muestra una tendencia principal, representado por el plano N14E/32NW, en conjunto con planos de múltiples orientaciones, pero de inclinaciones oblicuas con un promedio de 47° (Fig.5.4b).

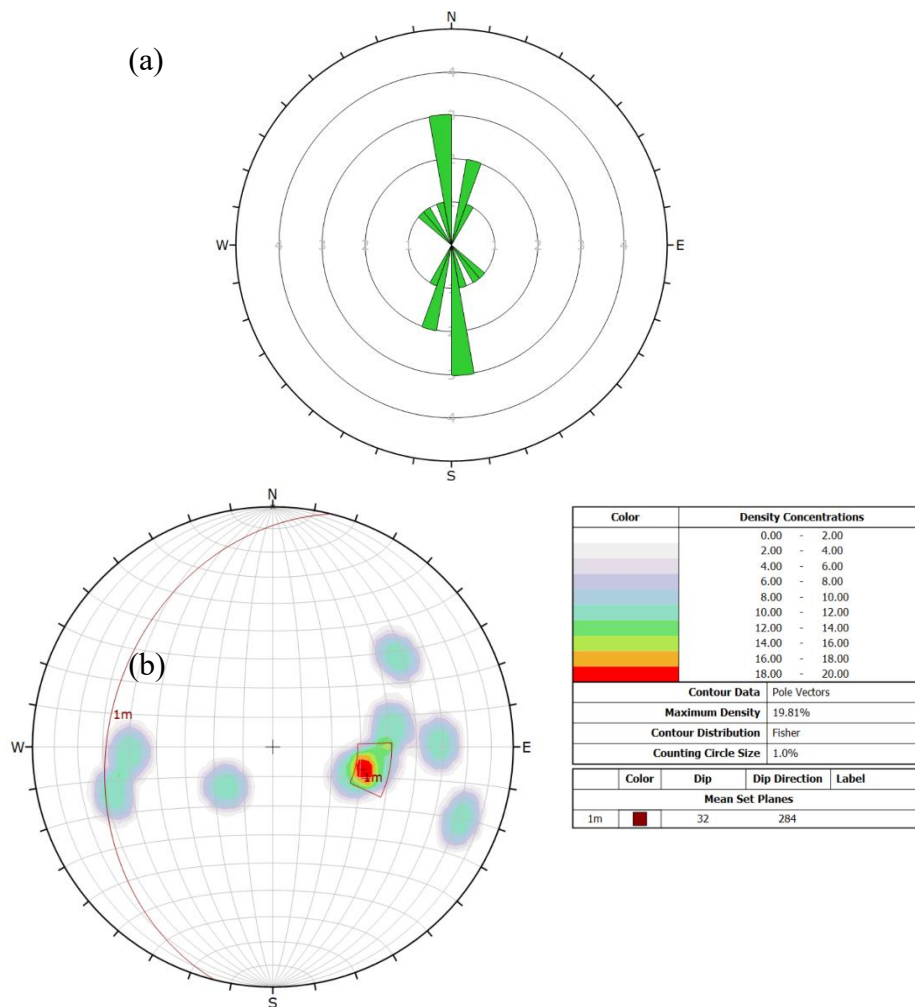


Figura 5.4. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Haru superior. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Mediante el procesamiento y análisis de la nube de puntos del subsector Haru superior, se detectaron 204 discontinuidades, las que presentan orientaciones preferenciales NE y NW, según lo observado en el diagrama de rosetas (Fig. 5.5a). En base al estereograma de densidad de polos, la familia principal de las discontinuidades se encuentra representada en el plano N60E/77NW, y las familias secundarias se muestran en los planos N59W/67NE y N47W/60SW (Fig. 5.5b).

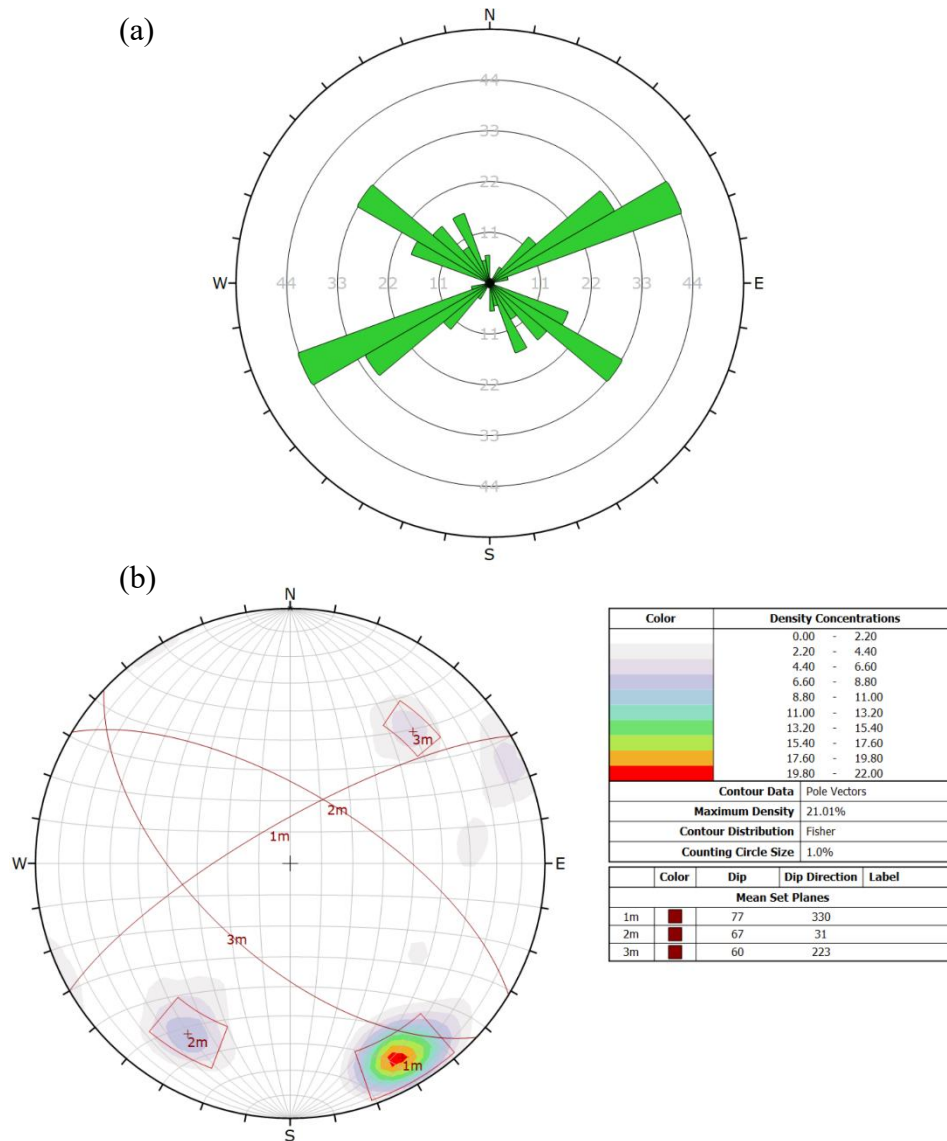


Figura 5.5. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Haru superior. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Haru intermedio

La tarea de identificación de fallas mayores y menores en el subsector Haru intermedio, permitió el reconocimiento de 11 fallas menores de espesor promedio de 6,5 cm, mínimo de 5 cm y máximo de 9 cm, relleno de harina de falla y, parcialmente, con presencia de mineralización masiva de calcopirita y pirita. A partir del análisis estereográfico, el diagrama de rosetas muestra una orientación principal NW y una secundaria NNE (Fig. 5.6a). La estereografía de densidad de polos permite identificar una tendencia principal representada por el plano N15E/47NW y, dos secundarias en los planos N30W/57NE y N23W/51SW (Fig. 5.6b).

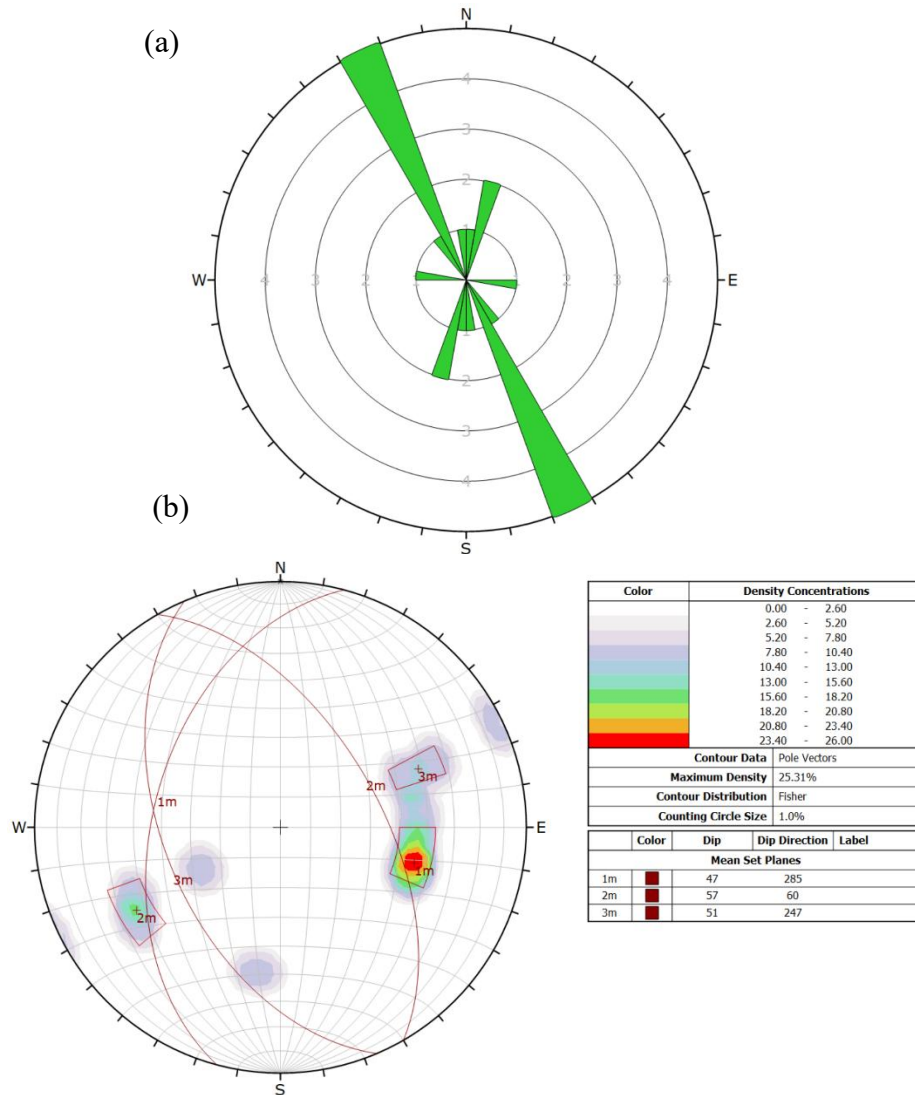


Figura 5.6. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Haru intermedio. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

El procesamiento de la nube de puntos de subsector Haru intermedio, posibilitó el reconocimiento de 958 planos de discontinuidades, de orientación preferencial NE y secundaria NW, de acuerdo con el diagrama de rosetas (Fig. 5.7a). Las familias principales, observada en el estereograma de densidad de polos, corresponde a los planos N13W/59SW y N18E/52NW. Además, las familias secundarias se encuentran representadas en los planos N48W/58NE y N25E/86NW (Fig. 5.7b).

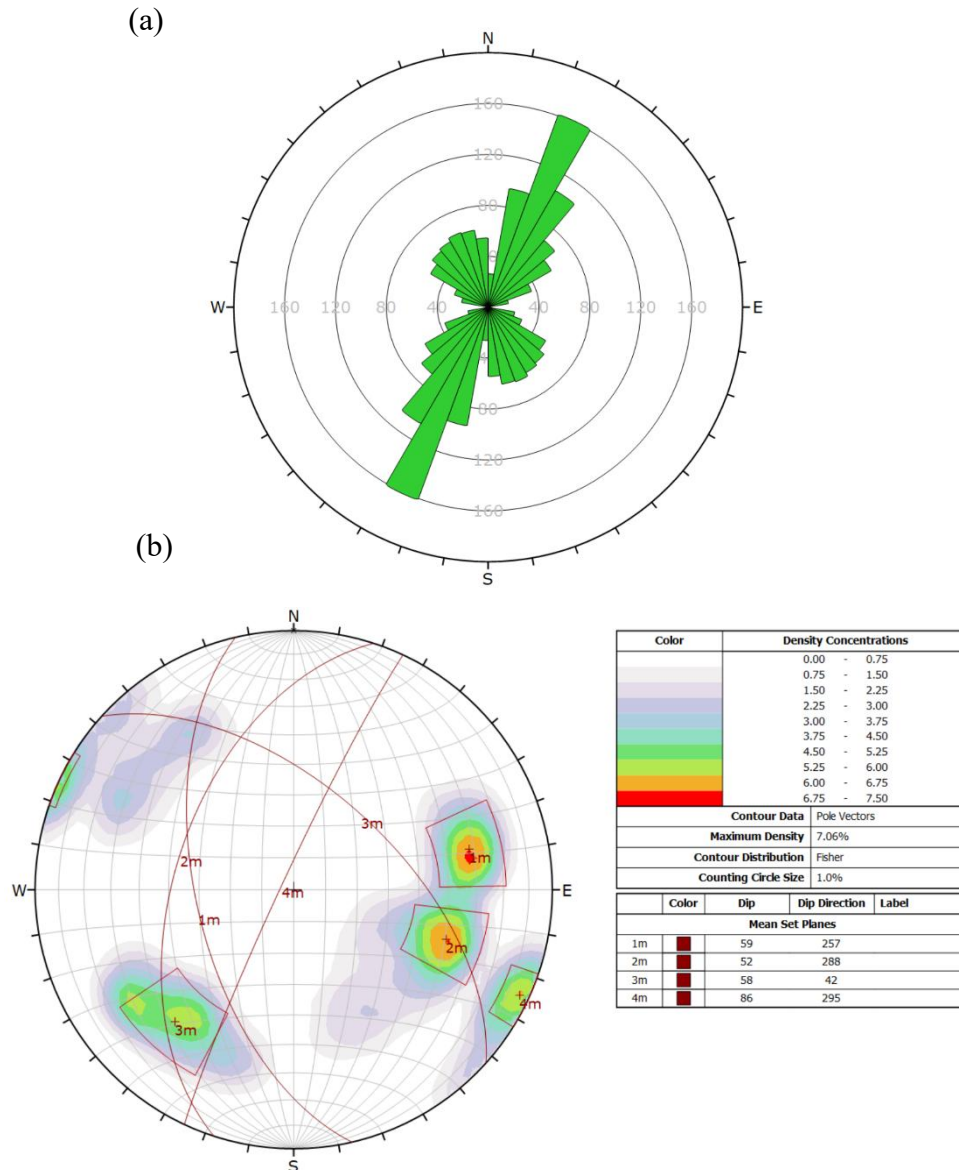


Figura 5.7. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Haru intermedio. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Haru inferior

En base al levantamiento de estructuras en el subsector Haru inferior se detectaron 16 fallas menores de 5,5 cm de espesor promedio, mínimo de 2 cm y máximo de 9 cm, principalmente, con relleno de harina de falla. En dos fallas se reconoció mineralización de calcopirita masiva, como relleno parcial. Por medio del análisis de discontinuidades, de acuerdo con el diagrama de rosetas, se observan dos orientaciones NE, N-S y E-O (Fig. 5.8a). El estereograma de densidad de polos muestra una tendencia principal, representado por el plano N35E/39NW, en conjunto con planos de múltiples orientaciones, pero de inclinaciones oblicuas con un promedio de 51° (Fig. 5.8b).

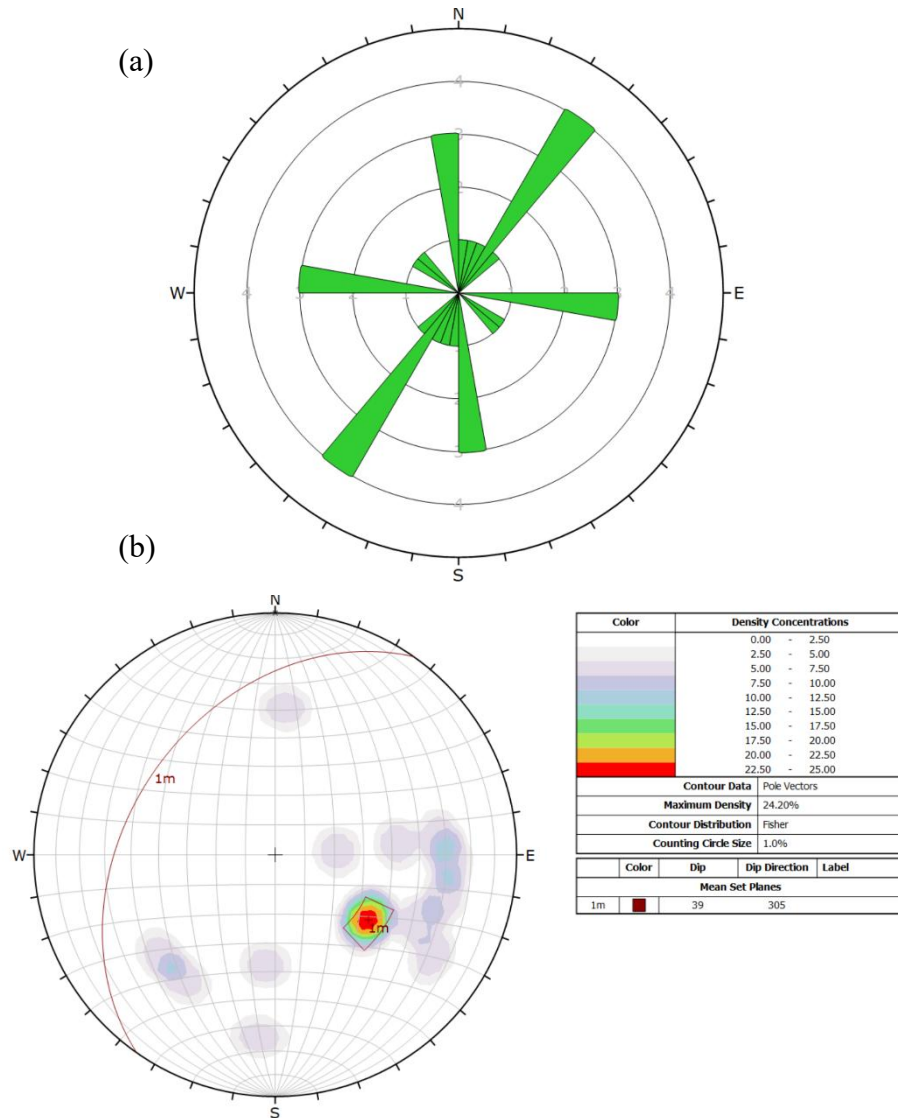


Figura 5.8. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Haru inferior. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

A través del procesamiento de la nube de puntos del subsector Haru inferior, fue posible reconocer un total de 1161 discontinuidades, de orientación preferencial NE y secundaria NW, según el diagrama de rosetas (Fig. 5.9a). En el estereograma de densidad de polos, se muestran 2 familias principales representadas en los planos N27E/72NW y N67E/79NW. Además, se observan 2 familias secundarias en los planos N50W/80NE y N32E/75SE (Fig. 5.9b).

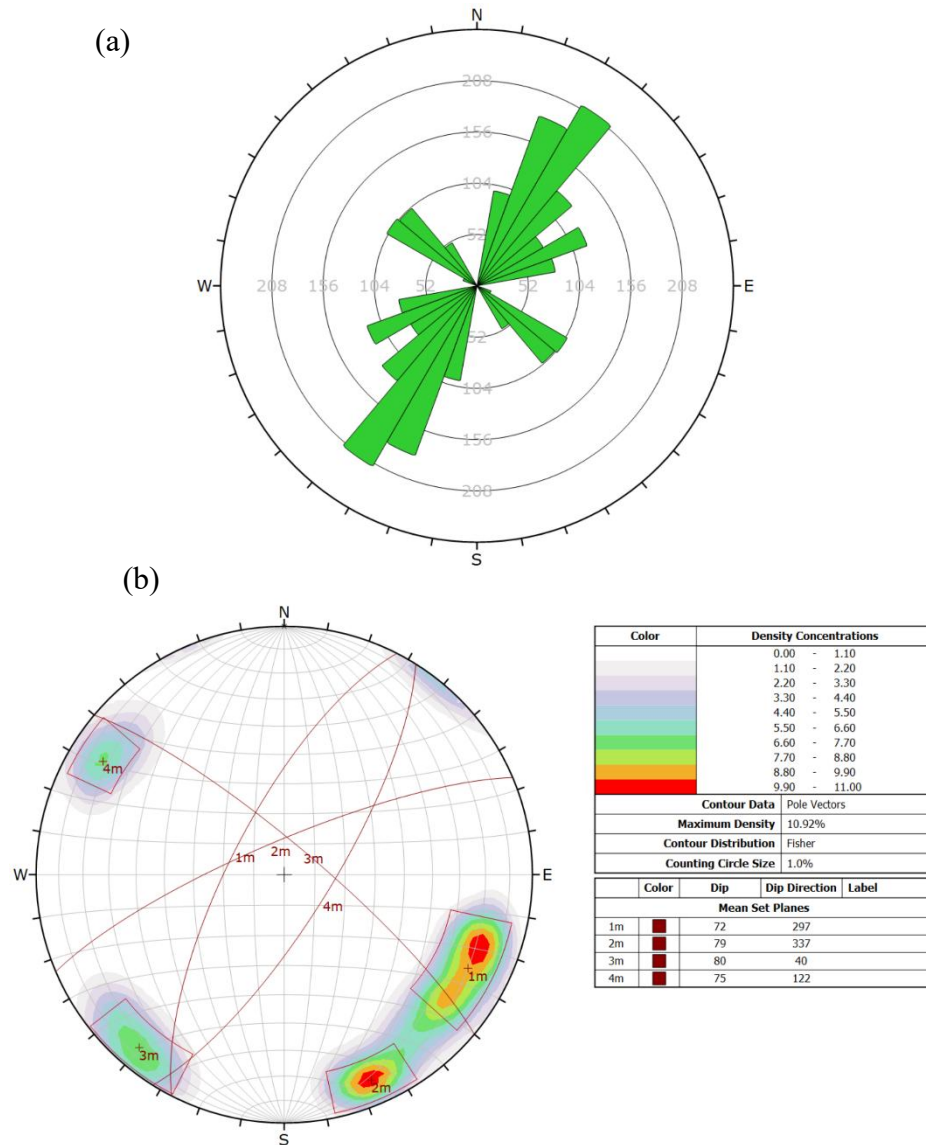


Figura 5.9. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Haru inferior. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Haru general

En base a la proyección estereográfica de la totalidad de discontinuidades identificadas, tanto en el levantamiento en terreno como por medio de PointStudio, se reconoció una orientación principal NE y una secundaria NW, según diagrama de rosetas (Fig. 5.10a). Al observar el estereograma de densidad de polos se determinaron 2 familias principales, contenidas en los planos N26E/75NW y N65E/78NW (Fig. 5.10b). Adicionalmente, se muestran 2 familias secundarias en los planos N46W/73NE y N32E/75SE (Tabla 5.1)

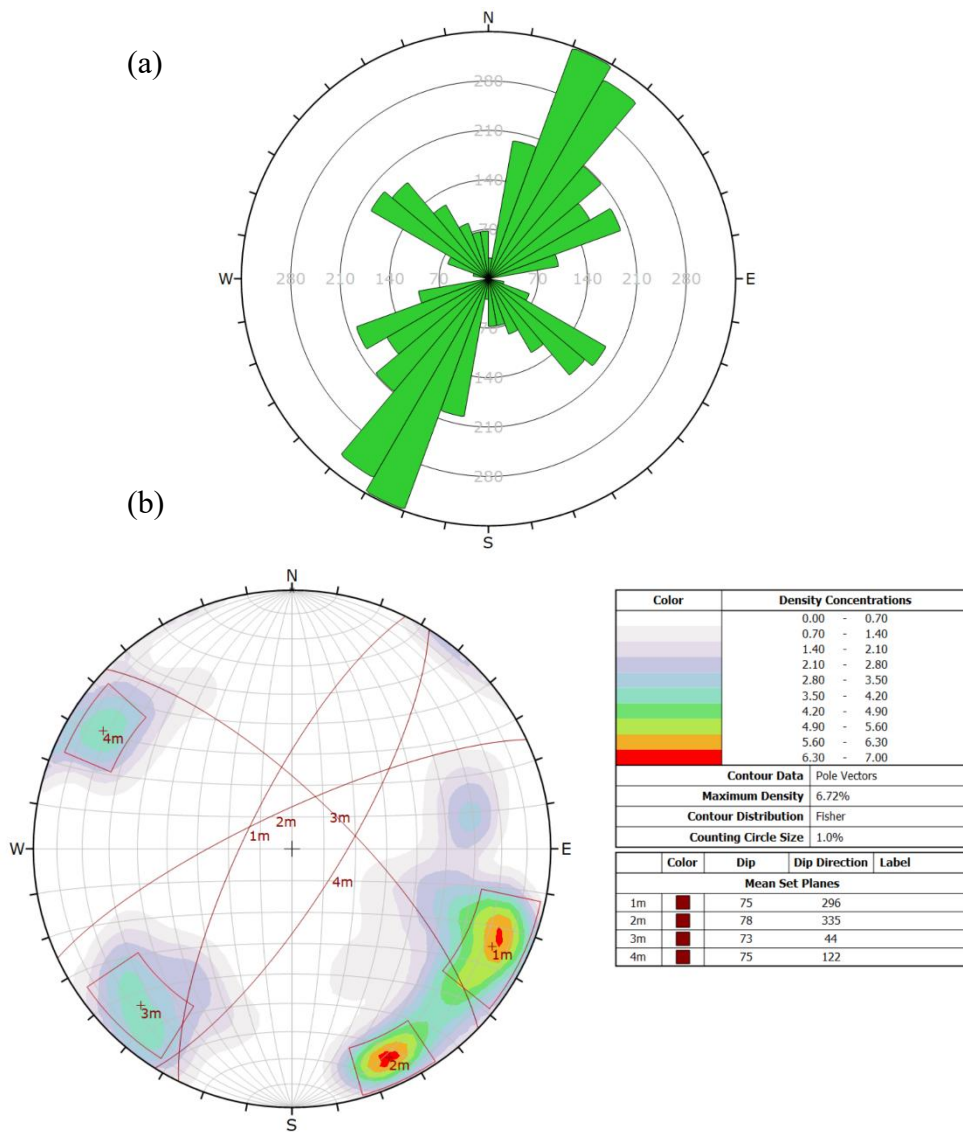


Figura 5.10. Proyección estereográfica de la totalidad de discontinuidades identificadas, en terreno y en PointStudio, sector Haru. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Tabla 5.1. Resumen de familias de discontinuidades reconocidas en el sector Haru.

Haru				
Sets	Dip	DipDir	Rumbo	Buzamiento
1	75	296	N26E	75NW
2	78	335	N65E	78NW
3	73	44	N46W	73NE
4	75	122	N32E	75SE

Al comparar las discontinuidades reconocidas en el conjunto de subsectores pertenecientes al sector Haru, es posible identificar una cierta correlación entre la información levantada en terreno con los datos obtenidos del software PointStudio, principalmente, en lo que respecta a las orientaciones preferenciales. Las discontinuidades capturadas presentan una orientación general NE, con inclinaciones de alto ángulo a oblicuas (47° - 80°), subverticales en algunos casos ($>80^{\circ}$). Sin embargo, es notable la influencia del conjunto de datos del subsector Haru inferior, en detrimento de los otros subsectores, debido al gran número de datos capturados.

5.2.2. Índices geotécnicos

Haru superior

Se definieron 5 celdas (HSU-C1 A C5), que presentan una calidad geotécnica regular a buena (Tabla 5.2), con un índice GSI mínimo de 56 y máximo de 66. El índice de Q varía desde un mínimo de 6,67 a un máximo de 11,25. En terreno se observaron, en general, dos familias de discontinuidades más una aleatoria, planos de discontinuidad suaves-ondulados y sin relleno, con patinas de hematita y, escasamente, carbonatos. La totalidad de las celdas se encontraban secas y presentan una composición litológica de tipo andesita, con alteración moderada de clorita, leve de óxidos de hierro. La celda C1 se encuentra ubicada en un cruzado, la C2 presenta una ubicación mixta entre cruzado y acceso, y de la celda C3 a la C5 se ubican en el acceso.

Tabla 5.2. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Haru superior.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
HSU-C1	Cruzado	68%	71%	73%	16	70%	7.83	REGULAR	56	58	60	REGULAR
HSU-C2	Cruz/Acc	62%	64%	66%	18	65%	7.11	REGULAR	56	58	60	REGULAR
HSU-C3	Acceso	68%	72%	75%	16	70%	7.94	REGULAR	59	61	63	BUENA
HSU-C4	Acceso	55%	60%	65%	21	58%	6.67	REGULAR	58	60.5	63	BUENA
HSU-C5	Acceso	65%	68%	70%	17	68%	11.25	BUENA	62	64	66	BUENA

Haru intermedio

Se reconocieron 10 celdas (HIT-C1 a C10), que muestran una calidad geotécnica regular (Tabla 5.3). El índice GSI mínimo es 55 y máximo de 64, mientras que el índice Q varía desde un mínimo de 5,75 a un máximo de 8,72. Se detectaron dos familias de discontinuidades y una aleatoria, planos suaves-ondulados, pátinas de hematita, ocasionalmente, especularita y calcopirita diseminada. El empeoramiento de las clasificación de Q se debe a la presencia de especularita en los planos de discontinuidad.

De la celda HIT-C1 a C3 la composición litológica corresponde a filitas, en tanto el resto de las celdas presentan una composición de andesitas. La totalidad de las celdas se ubican en túneles de acceso y se encontraban secas.

Tabla 5.3. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Haru intermedio.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
HIT-C1	Acceso	58%	61%	63%	20	60%	6.72	REGULAR	55	56.5	58	REGULAR
HIT-C2	Acceso	56%	60%	63%	18	65%	6.61	REGULAR	57	59	61	REGULAR
HIT-C3	Acceso	63%	66%	68%	17	68%	7.28	REGULAR	58	60.5	63	BUENA
HIT-C4	Acceso	66%	69%	72%	16	70%	7.67	REGULAR	61	62.5	64	BUENA
HIT-C5	Acceso	75%	79%	82%	13	78%	8.72	REGULAR BUENA	61	62.5	64	BUENA
HIT-C6	Acceso	70%	74%	78%	15	73%	8.22	REGULAR BUENA	60	61.5	63	BUENA
HIT-C7	Acceso	67%	70%	73%	17	68%	7.78	REGULAR	58	60.5	63	BUENA
HIT-C8	Acceso	68%	72%	75%	15	73%	5.96	REGULAR MALA	56	58	60	REGULAR
HIT-C9	Acceso	66%	69%	72%	17	68%	5.75	REGULAR MALA	55	56.5	58	REGULAR
HIT-C10	Acceso	65%	69%	72%	17	68%	7.61	REGULAR	58	59.5	61	REGULAR

Haru inferior

Se definieron 7 celdas (HIF-C1 a C7), las que muestran una calidad geotécnica general regular (Tabla 5.4). El índice GSI mínimo es 52 y máximo 64, a la vez que el índice Q varía desde un mínimo de 5,21 a un máximo de 8,17. En general, reconocieron dos familias de discontinuidades y una aleatoria, planos suaves-ondulados, pátinas de hematita y, escasamente, presencia de especularita. Al igual que en el subsector de Haru intermedio,

el empeoramiento de las clasificación de Q se debe a la presencia de especularita en los planos de discontinuidad.

La composición litológica de las celdas C1, C6 y C7 es andesita, mientras que desde la celda C2 a C5 la composición es filita. La totalidad de las celdas se ubican en vías de acceso, a excepción de la celda C5, y se encontraban secas.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
HIF-C1	Acceso	70%	74%	77%	15	73%	8.17	REGULAR BUENA	62	63	64	BUENA
HIF-C2	Acceso	68%	72%	75%	16	70%	7.94	REGULAR	59	60.5	62	BUENA
HIF-C3	Acceso	61%	64%	66%	18	65%	7.06	REGULAR	56	57.5	59	REGULAR
HIF-C4	Acceso	63%	66%	68%	18	65%	5.46	REGULAR MALA	55	56.5	58	REGULAR
HIF-C5	Cruzado	60%	63%	65%	19	63%	5.21	REGULAR MALA	52	53.5	55	REGULAR
HIF-C6	Acceso	64%	67%	69%	17	68%	7.39	REGULAR	57	58.5	60	REGULAR
HIF-C7	Acceso	65%	68%	70%	16	70%	7.50	REGULAR	58	60.5	63	BUENA

Tabla 5.4. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Haru inferior.

5.3. Geotecnia Esperanza

5.3.1. Discontinuidades

Esperanza 1 A

La información de discontinuidades levantada en terreno consiste en 19 fallas, 17 fallas menores y 2 mayores. Las fallas menores presentan un espesor promedio de 4,5 cm, mínimo de 2 cm y máximo de 8 cm, con relleno de harina de falla y, parcialmente, con presencia de hematita-especularita. Las fallas mayores disponen una orientación NNW y NNE, de espesor promedio de 18 cm, con rellenos de harina de falla. En el caso de la falla mayor NNE se observa un leve halo de hematita y relleno parcial de calcopirita masiva. En el diagrama de rosetas se observa una orientación preferencial NNE (Fig. 5.11a). La proyección estereográfica, en su apartado de densidad de polos, muestra una familia principal contenida en el plano N17E/69NW, con familias secundarias expresadas en los planos N20W/65NE y N3E/80W (Fig. 5.11b).

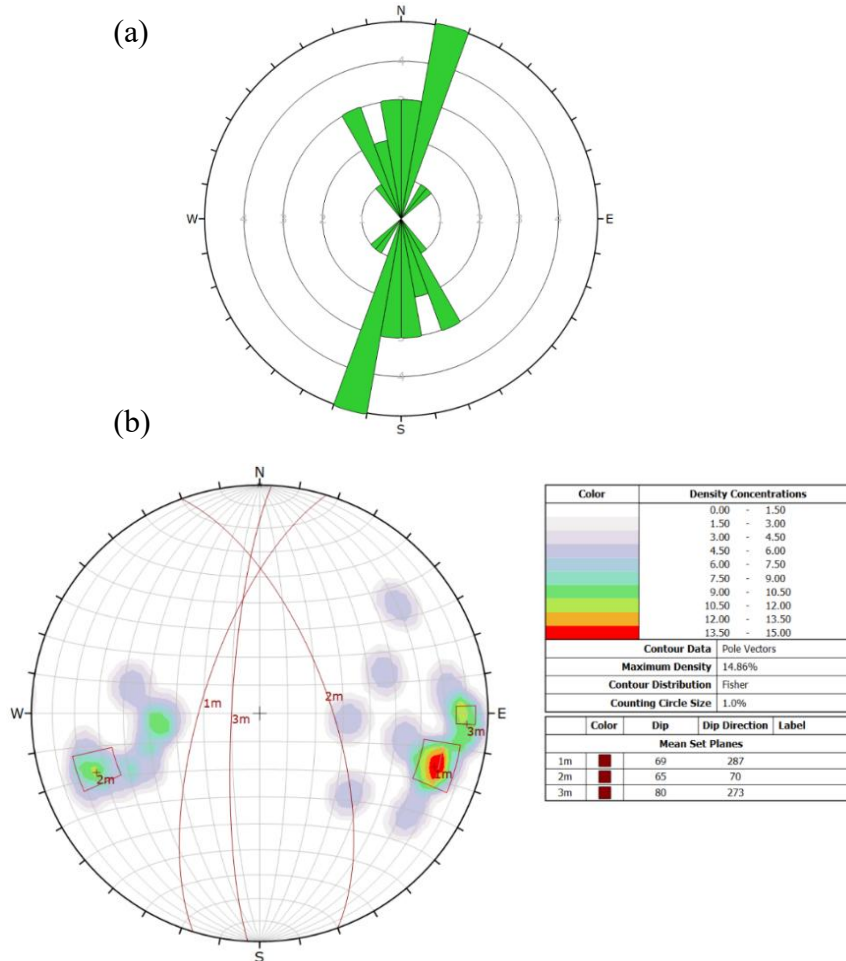


Figura 5.11. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores, subsector Esperanza 1 A. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Debido a limitaciones en la disponibilidad de equipos y tiempo, principalmente, del personal calificado para el levantamiento mediante escáner, no fue posible contar con una nube de puntos del subsector Esperanza 1 A. Esto impidió la generación de una superficie e identificación de discontinuidades en PointStudio.

Esperanza 1 B

La tarea de identificación de fallas mayores y menores en el subsector Esperanza 1 B, permitió el reconocimiento de 15 fallas, 10 menores y 5 mayores. Las fallas menores de espesor promedio de 4,2 cm, mínimo de 2 cm y máximo de 6 cm, relleno de harina de falla y, en ocasiones con presencia de carbonatos. Las fallas mayores presentan, principalmente orientaciones NW-NNW, de espesor promedio 11,2 cm, con relleno de

harina de falla, hematita, especularita y, parcialmente, calcopirita-pirita masiva. A partir del análisis estereográfico, el diagrama de rosetas muestra una orientación principal NW (Fig. 5.12a). La estereografía de densidad de polos no permite identificar una familia principal, pero muestra una orientación preferencial NW de las discontinuidades, con inclinaciones de 50° a 69° para las fallas que buzanan al SW. Las fallas que inclinan hacia el NE presentan buzamientos de 53° a 73° (Fig. 5.12b).

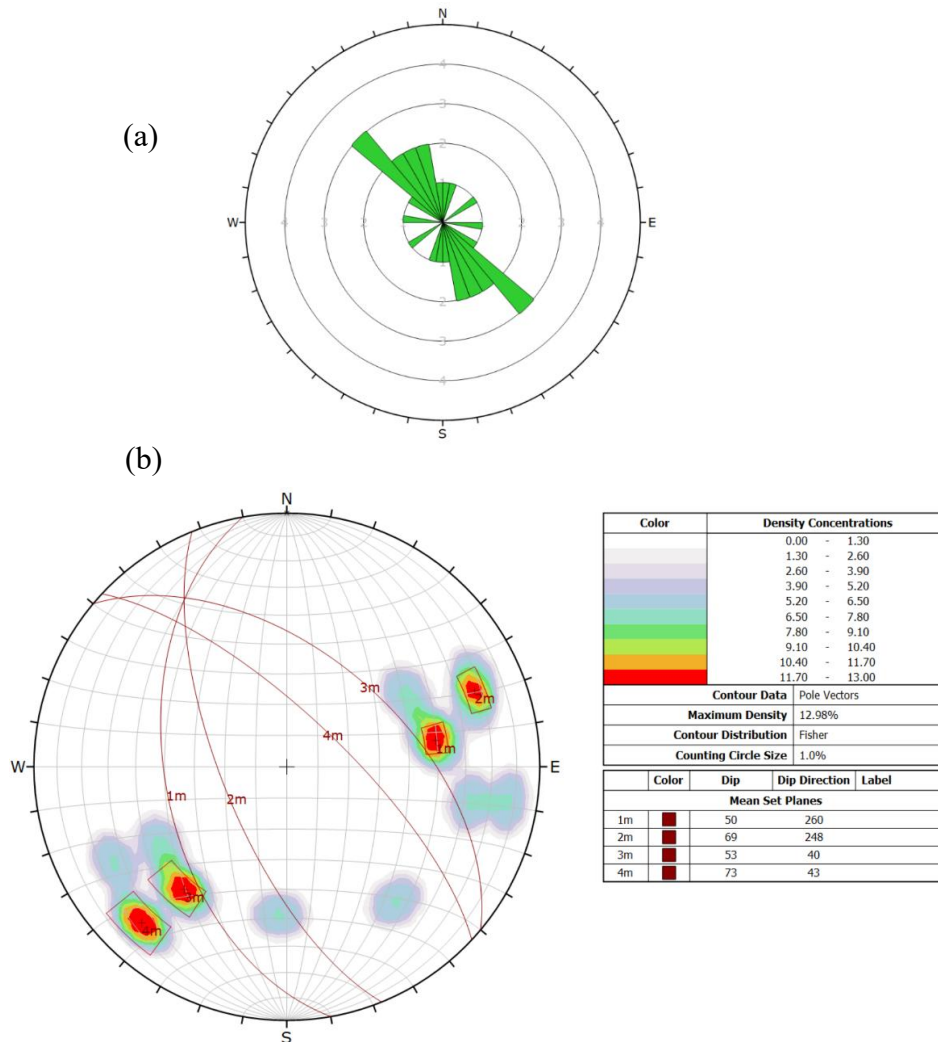


Figura 5.12. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Esperanza 1 B. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Debido a limitaciones en la disponibilidad de equipos y tiempo, principalmente, del personal calificado para el levantamiento mediante escáner, no fue posible contar con una nube de puntos del subsector Esperanza 1 B. Esto impidió la generación de una superficie e identificación de discontinuidades en PointStudio.

Esperanza 3

En base al levantamiento de estructuras en el subsector Haru superior se detectaron 13 fallas, 12 menores y 1 mayor. Las fallas menores de 4 cm de espesor promedio, mínimo de 2 cm y máximo de 6 cm, con rellenos de harina de falla. La falla mayor presenta una orientación NNW, espesor de 14 cm y relleno de specularita, con calcopirita-pirita masiva parcial. En el análisis de estas discontinuidades, de acuerdo con el diagrama de rosetas, se observa una orientación preferencial NW-NNW (Fig. 5.13a). El estereograma de densidad de polos muestra una familia principal, representado por el plano N16W/76SW, con 2 familias secundarias en los planos N22W/27SW y N63W/71SW (Fig. 5.13b).

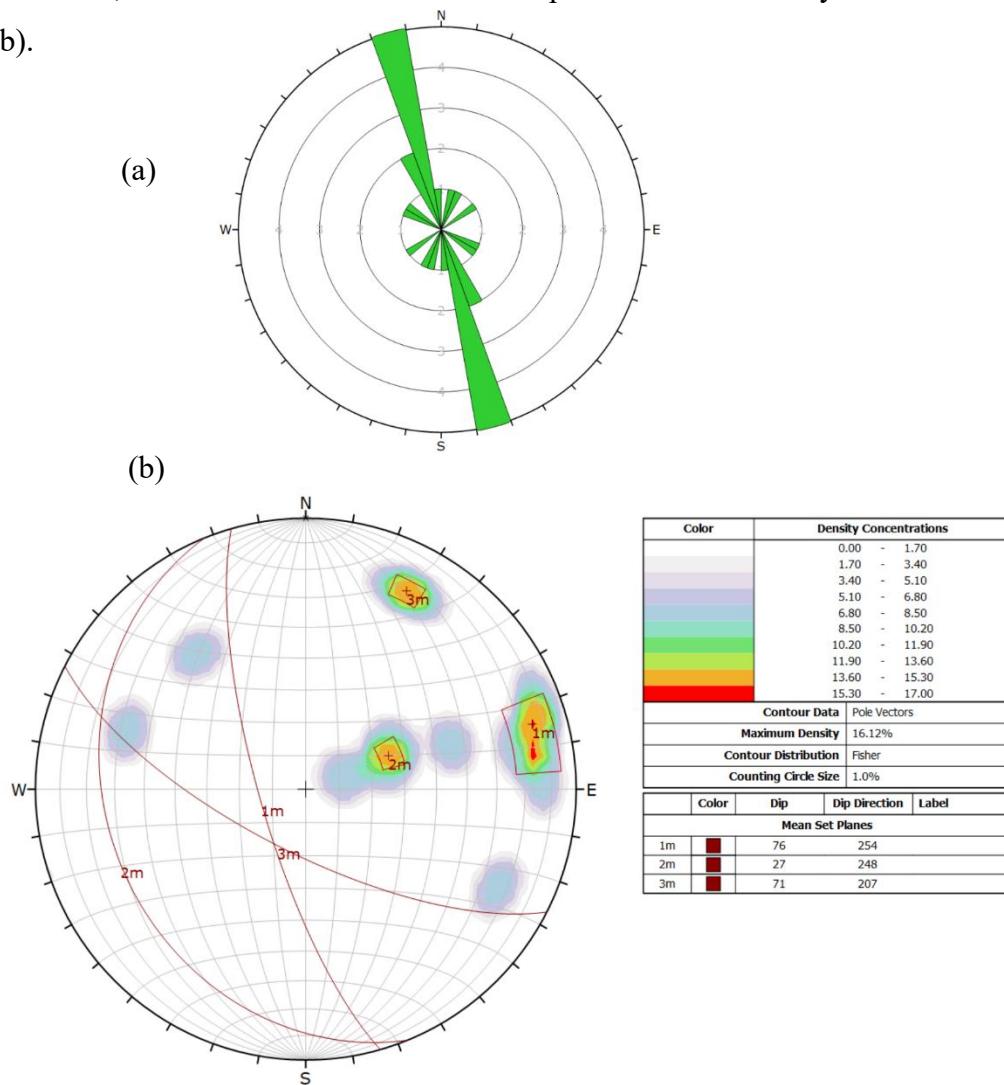


Figura 5.13. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores del subsector Esperanza 3. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

El procesamiento de la nube de puntos de subsector Haru intermedio, posibilitó el reconocimiento de 347 planos de discontinuidades, de orientación preferencial ~N-S y secundaria NW, de acuerdo con el diagrama de rosetas (Fig. 5.14a). La familia principal, observada en el estereograma de densidad de polos, corresponde al plano N3E/84W. Además, identificó una familia secundaria contenida en el plano N42W/86NE (Fig. 5.14b).

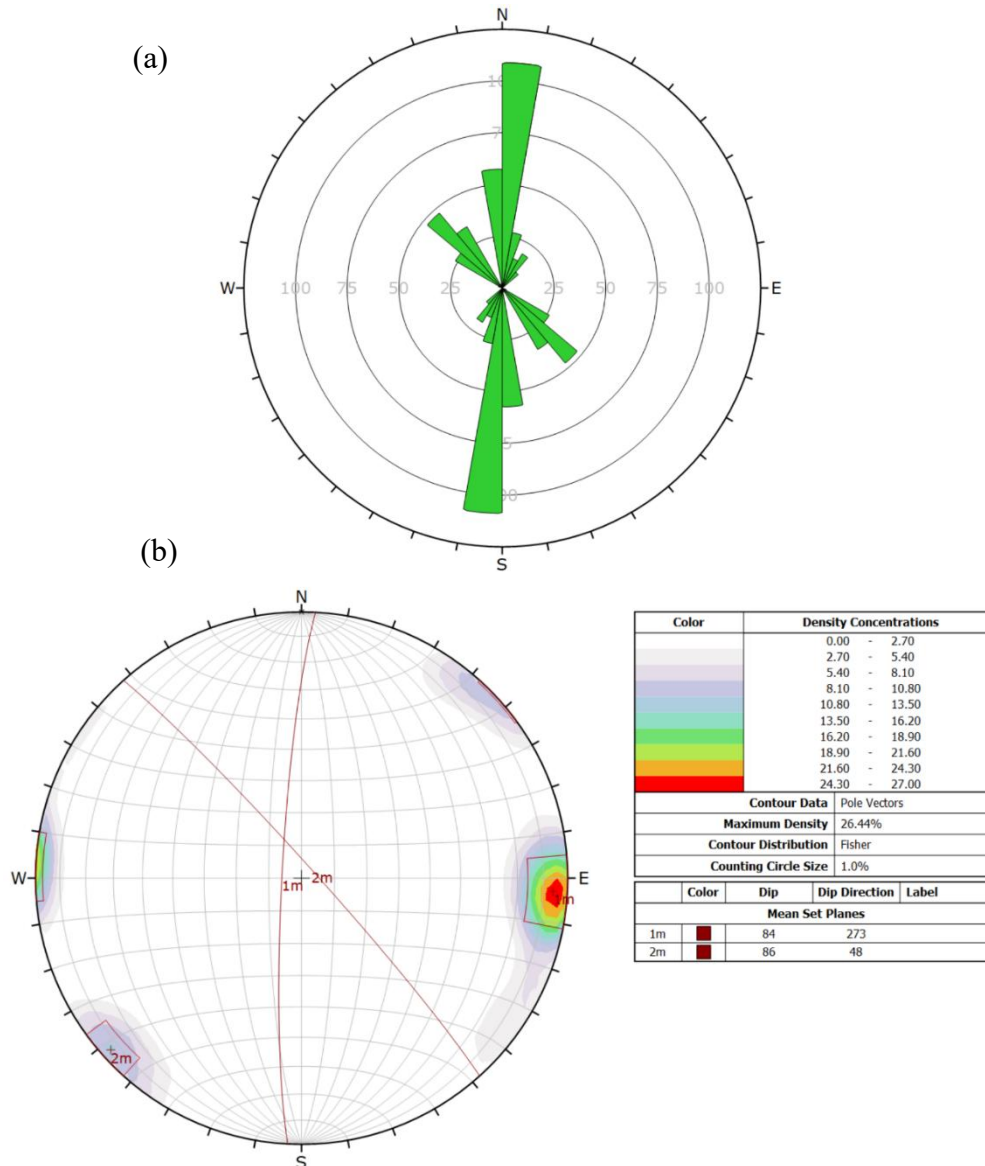


Figura 5.14. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Esperanza 3. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Esperanza general

Debido a la ausencia de identificación de discontinuidades en PointStudio por la falta de nube de puntos en dos de las tres subsectores pertenecientes al sector Esperanza, se decidió comparar sólo los datos de terreno, fallas mayores y menores, para evitar el sesgo que induciría el considerar el procesamiento de la nube de puntos del subsector Esperanza 3. En base a la proyección estereográfica de la totalidad de fallas mayores y menores identificadas, se reconoció una orientación principal NNW, según diagrama de rosetas (Fig. 5.15b). Al observar el estereograma de densidad de polos se determinaron 3 familias, contenidas en los planos N14W/49SW, N3E/79W y N15E/68NW (Fig. 5.15b; Tabla 5.5).

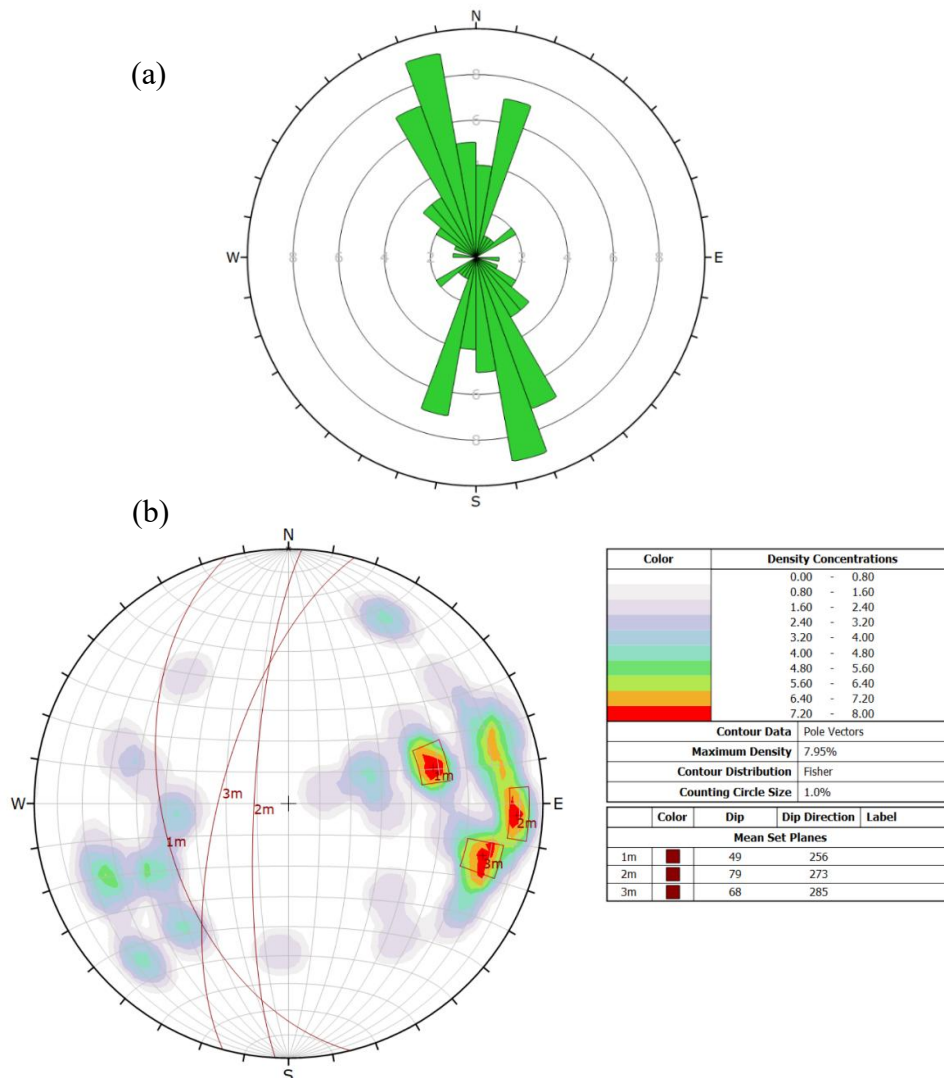


Figura 5.15. Proyección estereográfica del total de fallas mayores y menores reconocidas en el sector Esperanza. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Tabla 5.5. Resumen de familias de discontinuidades reconocidas en el sector Esperanza.

Esperanza				
Sets	Dip	DipDir	Rumbo	Buzamiento
1	49	256	N14W	49SW
2	79	273	N3E	79W
3	68	285	N15E	68NW

5.3.2. Índices geotécnicos

Esperanza 1 A

Se reconocieron 16 celdas (E1A-C1 a C16), en donde, se reconoce una variación en la calidad del macizo, pero que presenta una calidad general regular (Tabla 5.6). El índice GSI mínimo es 51 y máximo de 65, mientras que el índice Q que varía desde un mínimo de 5,2 a un máximo de 12,9. Se detectaron dos familias de discontinuidades y una aleatoria, planos suaves-ondulados, secos, pátinas de especularita y, ocasionalmente, yeso.

Litológicamente, la totalidad de celdas se componen por andesitas, y la mayoría se ubica en vías de acceso, a excepción de las celdas C8, C9 y C11.

Tabla 5.6. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Esperanza 1A.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
E1A-C1	Acceso	75%	78%	80%	12	80.0	12.9	BUENA	61	63	65	BUENA
E1A-C2	Acceso	73%	76%	78%	13	77.5	8.4	REGULAR BUENA	60	61.5	63	BUENA
E1A-C3	Acceso	72%	74%	76%	13	77.5	8.2	REGULAR BUENA	59	61.5	64	BUENA
E1A-C4	Acceso	65%	70%	75%	16	70.0	7.8	REGULAR	56	58	60	REGULAR
E1A-C5	Acceso	63%	66%	68%	17	67.5	5.5	REGULAR MALA	53	54.5	56	REGULAR
E1A-C6	Acceso	62%	65%	67%	18	65.0	5.4	REGULAR MALA	51	53	55	REGULAR
E1A-C7	Acceso	62%	65%	67%	18	65.0	7.2	REGULAR	52	53.5	55	REGULAR
E1A-C8	Cruzado	62%	65%	67%	18	65.0	7.2	REGULAR	54	56	58	REGULAR
E1A-C9	Cruzado	63%	66%	68%	18	65.0	7.3	REGULAR	55	57	59	REGULAR
E1A-C10	Acceso	62%	65%	67%	17	67.5	7.2	REGULAR	55	58	61	REGULAR
E1A-C11	Cruzado	61%	64%	66%	18	65.0	7.1	REGULAR	55	57	59	REGULAR
E1A-C12	Acceso	60%	63%	65%	19	62.5	5.2	REGULAR MALA	53	55.5	58	REGULAR
E1A-C13	Acceso	64%	66%	67%	16	70.0	5.5	REGULAR MALA	53	55	57	REGULAR
E1A-C14	Acceso	63%	65%	67%	17	67.5	5.4	REGULAR MALA	52	54.5	57	REGULAR
E1A-C15	Acceso	70%	73%	75%	16	70.0	6.0	REGULAR	56	58	60	REGULAR
E1A-C16	Acceso	68%	71%	74%	15	72.5	5.9	REGULAR MALA	55	57	59	REGULAR

Esperanza 1 B

En el presente subsector se definieron 11 celdas (E1B-C1 a C11), que presentan una calidad general de regular a regular malo (Tabla 5.7). El índice GSI mínimo es 51 y máximo de 62, mientras que el índice Q varía desde un mínimo de 5,4 a un máximo de

8,1. Se detectaron dos familias de discontinuidades y una aleatoria, planos suaves-ondulados, secos, pátinas de especularita, hematita y, ocasionalmente, yeso.

En cuanto a la litología, la totalidad de las celdas se encuentran compuestas por andesitas, y la mayoría se ubica en vías de acceso, a excepción de las celdas C3 a C6.

Tabla 5.7. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Esperanza 1B.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
E1B-C1	Acceso	70%	73%	75%	14	75.0	8.1	REGULAR BUENA	59	60.5	62	BUENA
E1B-C2	Acceso	68%	72%	75%	15	72.5	7.9	REGULAR	57	59	61	REGULAR
E1B-C3	Cruzado	65%	68%	70%	17	67.5	5.6	REGULAR MALA	53	55	57	REGULAR
E1B-C4	Cruzado	67%	71%	74%	16	70.0	7.8	REGULAR	57	59	61	REGULAR
E1B-C5	Cruzado	62%	65%	67%	18	65.0	5.4	REGULAR MALA	52	54	56	REGULAR
E1B-C6	Cruzado	65%	69%	72%	16	70.0	5.7	REGULAR MALA	53	54.5	56	REGULAR
E1B-C7	Acceso	65%	69%	72%	17	67.5	7.6	REGULAR	54	56.5	59	REGULAR
E1B-C8	Acceso	68%	72%	75%	15	72.5	7.9	REGULAR	57	59	61	REGULAR
E1B-C9	Acceso	65%	69%	72%	16	70.0	7.6	REGULAR	55	57.5	60	REGULAR
E1B-C10	Acceso	65%	69%	72%	17	67.5	5.7	REGULAR MALA	52	53.5	55	REGULAR
E1B-C11	Acceso	62%	65%	68%	19	62.5	5.4	REGULAR MALA	51	52.5	54	REGULAR

Esperanza 3

Se definieron 9 celdas (E3-C1 A C9), que presentan una calidad geotécnica regular (Tabla 5.8), con un índice GSI mínimo de 50 y máximo de 62. El índice de Q varía de 5,8 mínimo a un 7,5 máximo. En terreno se observaron , dos familias de discontinuidades más una aleatoria y planos de discontinuidad suaves-ondulados, sin embargo, en las celdas C8 y C9 se observó que la mayoría de los planos en estas celdas eran de tipo rugoso-planar, encontrándose secos. No se reconoció presencia de rellenos, sólo patinas de hematita y, escasamente, carbonatos.

La totalidad de las celdas presentan una composición litológica de tipo andesita, con alteración moderada de clorita. Por el estado de avance las labores asociadas a subsector, todas las celdas se encuentran ubicadas en la labor de acceso.

Tabla 5.8. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Esperanza 3.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
E3-C1	Acceso	65%	68%	70%	18	65.0	7.5	REGULAR	52	53.5	55	REGULAR
E3-C2	Acceso	60%	63%	66%	19	62.5	7.0	REGULAR	51	52.5	54	REGULAR
E3-C3	Acceso	62%	65%	68%	18	65.0	7.2	REGULAR	52	54	56	REGULAR
E3-C4	Acceso	58%	62%	66%	19	62.5	6.9	REGULAR	54	55.5	57	REGULAR
E3-C5	Acceso	60%	63%	65%	19	62.5	6.9	REGULAR	55	56.5	58	REGULAR
E3-C6	Acceso	63%	66%	68%	18	65.0	7.3	REGULAR	53	56	59	REGULAR
E3-C7	Acceso	65%	69%	73%	16	70.0	5.8	REGULAR MALA	50	53.5	57	REGULAR
E3-C8	Acceso	73%	77%	80%	14	75.0	6.4	REGULAR	56	59	62	REGULAR
E3-C9	Acceso	70%	73%	75%	17	67.5	6.0	REGULAR	55	57.5	60	REGULAR

5.4. Geotecnia Farellones

5.4.1. Discontinuidades

Farellones intermedio

La información de discontinuidades levantada en terreno consiste en 35 fallas, 31 fallas menores y 4 mayores. Las fallas menores presentan un espesor promedio de 5 cm, mínimo de 2 cm y máximo de 9 cm, con relleno de harina de falla y, parcialmente, con presencia de hematita-especularita o carbonatos. Las fallas mayores disponen una orientación ~N-S (Fig. 5.16a), de espesor promedio de 12 cm, con rellenos de harina de falla y leve mineralización masiva de calcopirita-pirita. El estereograma de densidad de polos muestra una familia principal contenida en el plano N7W/72W y una familia secundaria expresada en el plano N4E/35W (Fig. 5.16b).

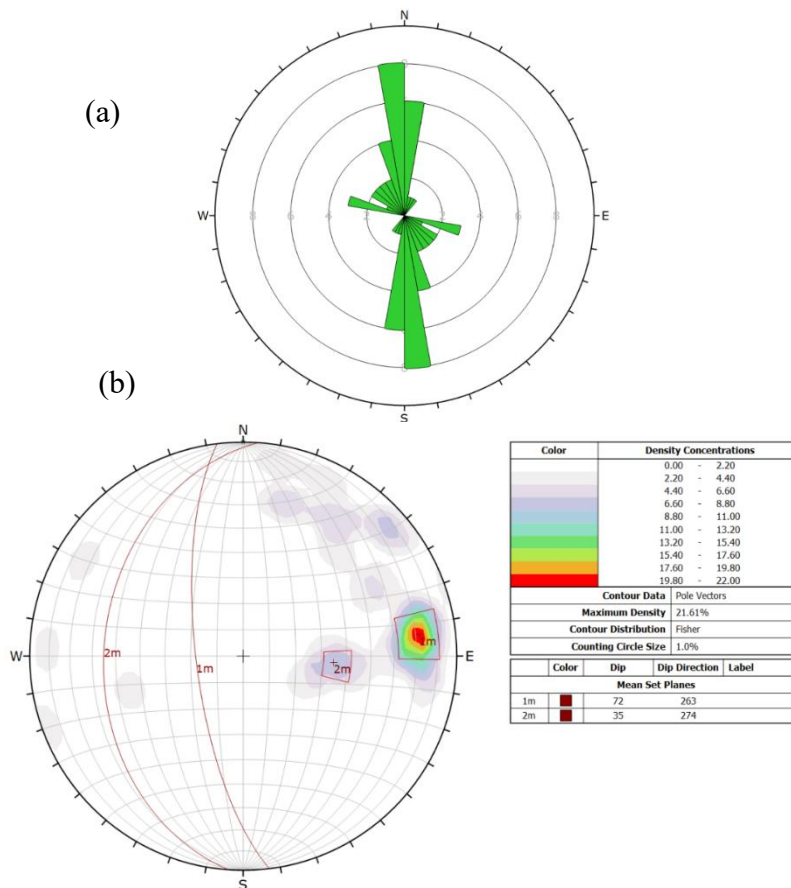


Figura 5.16. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores reconocidas en el subsector Farellones intermedio. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

A través del procesamiento de la nube de puntos del subsector Farellones intermedio, fue posible reconocer un total de 1148 discontinuidades, de orientación preferencial NE y secundarias W-E y NW según el diagrama de rosetas (Fig. 5.17a). En el estereograma de densidad de polos, se muestran una familia principal representada en el plano N64E/87NW. Además, se observan 2 familias secundarias en los planos N33W/89SW y N81W/69NE (Fig 5.17b).

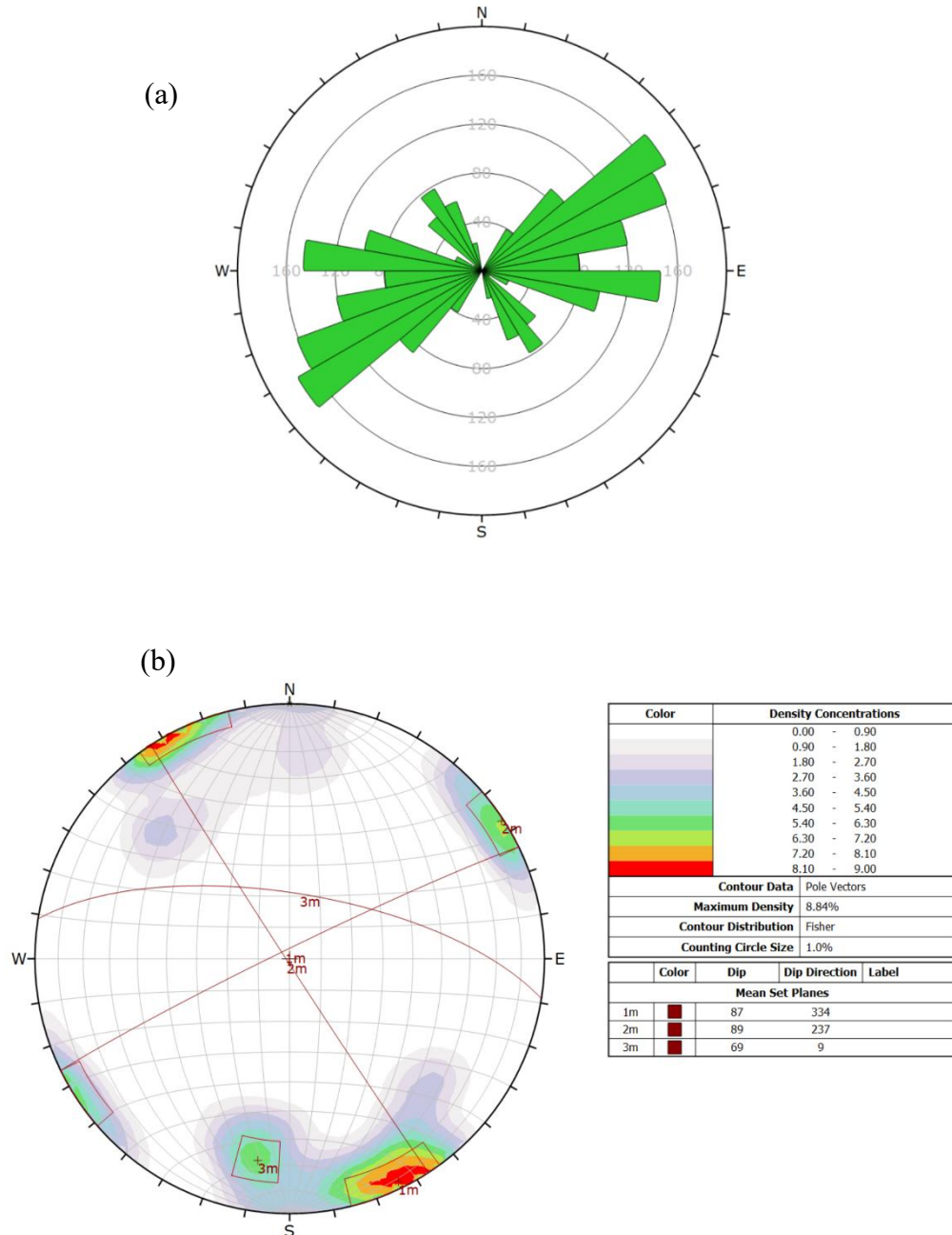


Figura 5.17. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Farellones intermedio. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Farellones inferior

En base al levantamiento de estructuras en el subsector se detectaron 13 fallas, 6 menores y 7 mayores. Las fallas menores presentan un 3,4 cm, mínimo de 2 cm y máximo de 5 cm, principalmente, con relleno de harina de falla. En el caso de las fallas mayores, se encuentran rellenas de harina de falla, con presencia de especularita y, parcialmente, leve presencia de carbonatos y mineralización masiva de calcopirita. Por medio del análisis de discontinuidades, de acuerdo con el diagrama de rosetas, se observa una orientación principal NW y otra secundaria NE (Fig.5.18a). El estereograma de densidad de polos muestra una tendencia principal, representado por el plano N28W/64SW, y otra secundaria contenida en el plano N1W/52W (Fig.5.18b).

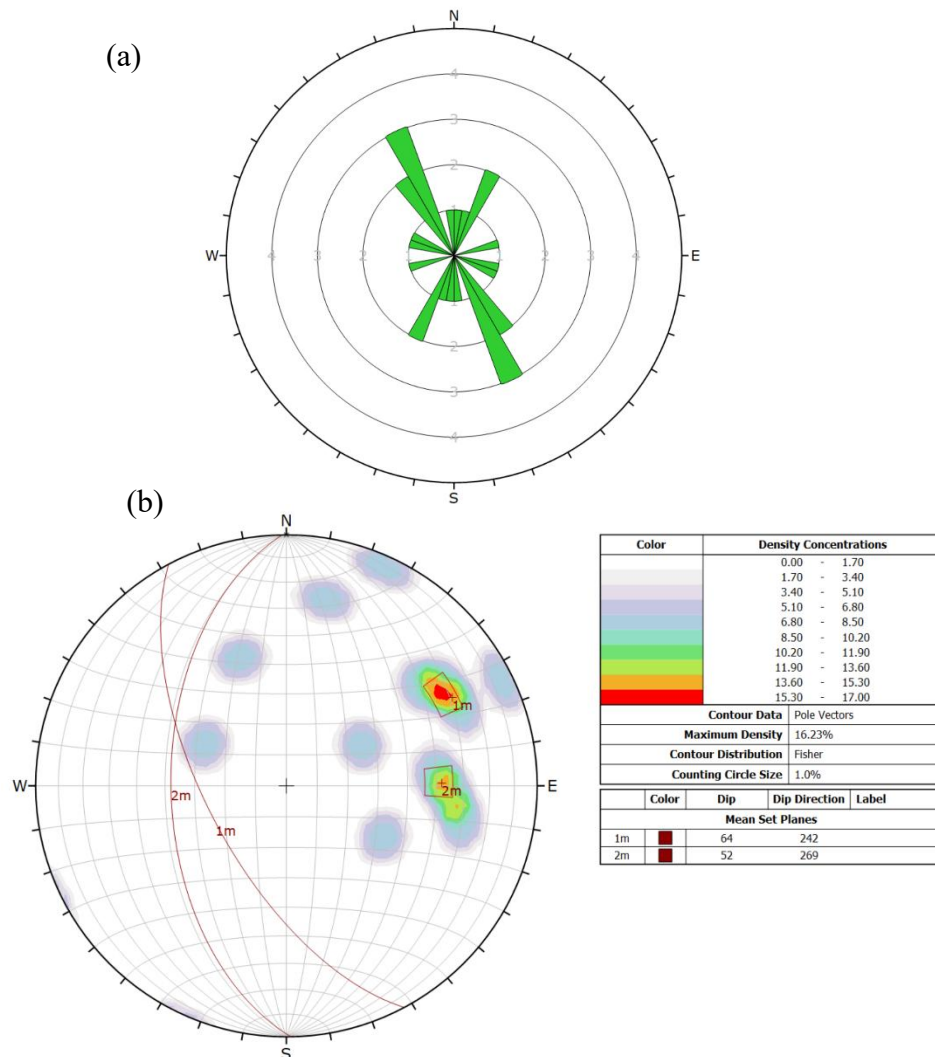


Figura 5.18. Proyección estereográfica de fallas mayores y menores reconocidas en el subsector Farellones inferior. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

El procesamiento de la nube de puntos de subsector Farellones inferior, permitió el reconocimiento de 1688 planos de discontinuidades, de orientaciones preferenciales NEE y W-E, con una orientación secundaria ~N-S, de acuerdo con el diagrama de rosetas (Fig. 5.19a). La familia principal, observada en el estereograma de densidad de polos, corresponde al plano N70E/86NW. Además, se reconoce una familia secundaria presente en el plano N2W/83W (Fig. 5.19b).

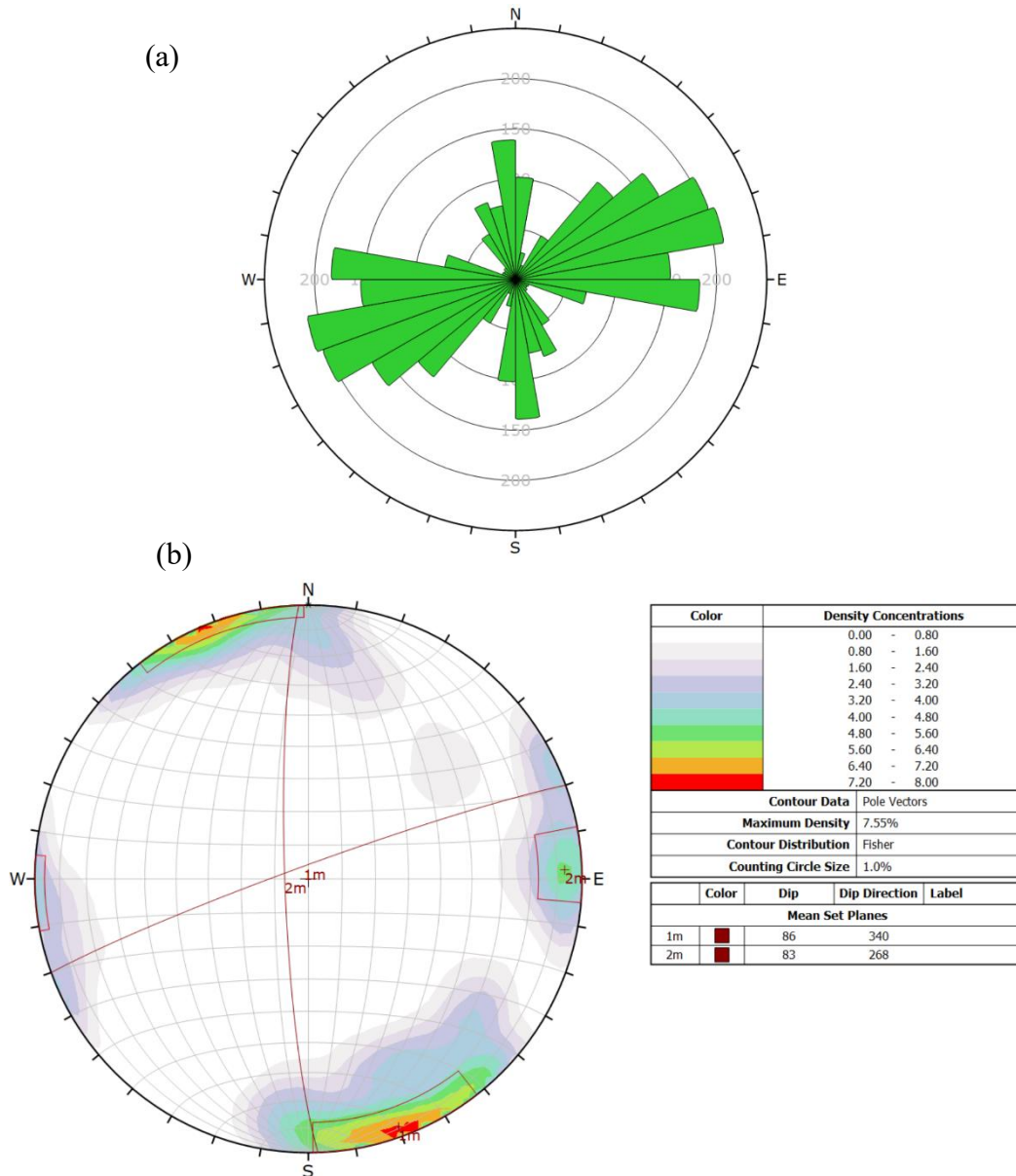


Figura 5.19. Proyección estereográfica de discontinuidades identificadas en PointStudio, subsector Farellones inferior. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Farellones general

Aplicando la proyección estereográfica de la totalidad de discontinuidades identificadas, tanto en el levantamiento en terreno como por medio de PointStudio, se reconoció dos orientaciones principales NE y W-E, además, de una secundaria NNW, según diagrama de rosetas (Fig. 5.20a). Al observar el estereograma de densidad de polos se determinó una familia principal contenida en el plano N68E/87NW, y una familia secundaria presente en el plano N30W/88SW (Fig. 5.20b; Tabla 5.9).

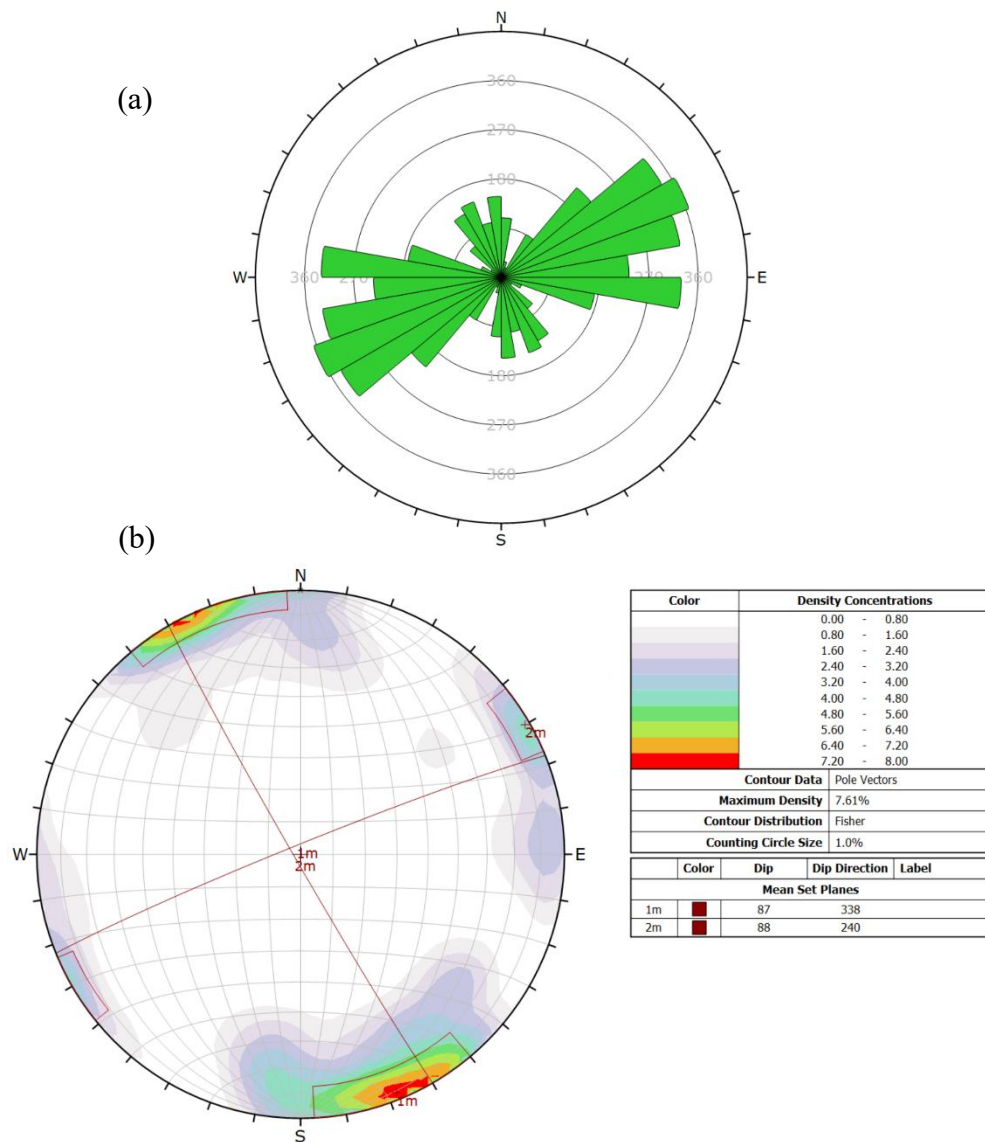


Figura 5.20. Proyección estereográfica de la totalidad de discontinuidades identificadas, en terreno y en PointStudio, sector Farellones. (a) Diagrama de rosetas. (b) Densidad de polos.

Tabla 5.9. Resumen de familias de discontinuidades reconocidas en el sector Farellones.

Farellones				
Sets	Dip	DipDir	Rumbo	Buzamiento
1	87	338	N68E	86NW
2	88	240	N30W	88SW

En el sector de Farellones, existe una notable diferencia entre las tendencias reconocidas para fallas menores y mayores medidas en terreno, y discontinuidades detectadas en PointStudio. Las fallas presentan tendencias principales de orientación NNW a NW, con buzamientos de alto ángulo a oblicuos (72° - 35°). Por otra parte, las discontinuidades reconocidas por el programa presentan familias de orientación principal NE y secundaria NW, con inclinaciones subverticales (83° - 89°).

Cabe mencionar que durante detección de discontinuidades en PointStudio en las nubes de puntos del sector Farellones, se observó que el programa tiende a reconocer un mayor número de planos con dirección perpendicular a subperpendicular de la orientación de las labores procesadas.

5.4.2. Índices geotécnicos

Farellones intermedio

Se reconocieron 12 celdas, las que se dividen en tres conjuntos (FINT1, FINT2 y FINT3), ya que, por la extensión del subsector se decidió realizar un mapeo selectivo, focalizando ciertas labores, perpendiculares entre sí, para optimizar tiempo e información a levantar. En general, se observa una calidad geotécnica regular a regular mala (Tabla 5.10). El índice GSI mínimo es 46 y máximo de 66, mientras que el índice Q varía de un mínimo de 3,6 a un máximo de 8,4. Las celdas de calidad regular a regular buena presentan dos familias de discontinuidades y una aleatoria, planos suaves-ondulados y pátinas leves de hematita. En el caso de las celdas de calidad regular mala y mala, presentan desde dos familias de discontinuidades y una aleatoria, a tres familias de discontinuidades, con planos rugoso-planares, secos y presencia de especularita.

La totalidad de las celdas presentan una composición de andesitas. Desde la celda FINT1 C4 a la FINT2 C2, y la celda FINT3 C1, se ubican en vías de acceso, con el resto de las celdas ubicadas en cruzados.

Tabla 5.10. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Farellones intermedio.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
FINT1-C1	Cruzado	65%	68%	70%	18	65.0	8.4	REGULAR BUENA	60	63	66	BUENA
FINT1-C2	Cruzado	60%	63%	65%	19	62.5	6.9	REGULAR	56	59	61	REGULAR
FINT1-C3	Cruzado	63%	65%	66%	18	65.0	7.2	REGULAR	58	60	62	REGULAR
FINT1-C4	Acceso	64%	66%	68%	18	65.0	8.3	REGULAR BUENA	59	62	64	BUENA
FINT1-C5	Acceso	65%	68%	71%	17	67.5	5.7	REGULAR MALA	57	59.5	62	REGULAR
FINT1-C6	Acceso	60%	63%	65%	21	57.5	6.9	REGULAR	53	56	58	REGULAR
FINT2-C1	Acceso	70%	75%	80%	18	65.0	6.3	REGULAR	52	57	62	REGULAR
FINT2-C2	Acceso	65%	68%	70%	19	62.5	5.6	REGULAR MALA	49	54	59	REGULAR
FINT2-C3	Cruzado	60%	65%	70%	21	57.5	3.6	MALA	46	51	56	REGULAR
FINT3-C1	Acceso	68%	72%	75%	18	65.0	4.0	MALA	50	55	60	REGULAR
FINT3-C2	Cruzado	70%	73%	75%	16	70.0	8.1	REGULAR BUENA	55	60	65	REGULAR
FINT3-C3	Cruzado	62%	67%	72%	18	65.0	5.6	REGULAR MALA	47	52	57	REGULAR

Farellones inferior

Se definieron 17 celdas que, al igual que el subsector de Farellones intermedio, se agruparon en conjuntos (FINF1, FINF2, FINF3 y FINF4), debido al mapeo selectivo, focalizando ciertas labores, perpendiculares entre sí, para optimizar tiempo e información a levantar. Las celdas una calidad geotécnica regular a regular mala (Tabla 5.11), con un índice GSI mínimo de 49 y máximo de 70. El índice de Q varía desde un mínimo de 3,0 a un máximo de 12,7. Las celdas de calidad regular buena a buena presentan desde dos familias de discontinuidades más una aleatoria a dos familias de discontinuidades, planos de discontinuidad rugosos-planares y pátinas de hematita. En el caso de las celdas de calidad regular a mala, contienen desde dos familias de discontinuidades y una aleatoria, hasta tres familias de discontinuidades, algunos planos rugosos-planares y suave-ondulados, secos, además de pátinas de hematita y/o especularita.

La totalidad de las celdas presentan una composición litológica de tipo andesita, con alteración moderada de clorita. La distribución entre celdas ubicadas en vías de acceso y cruzados es equivalente.

Tabla 5.11. Resumen de índices geotécnicos determinados en el subsector de Farellones inferior.

Celdas	Ubicación	RQD %					Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)			Min	Med	Max	Clasificación GSI
FINF1-C1	Acceso	70%	73%	75%	16	70.0	9.1	REGULAR BUENA	61	64	67	BUENA
FINF1-C2	Acceso	63%	66%	69%	17	67.5	5.5	REGULAR MALA	55	57.5	60	REGULAR
FINF1-C3	Cruzado	60%	63%	65%	20	60.0	7.8	REGULAR	59	62.5	66	BUENA
FINF1-C4	Cruzado	65%	68%	70%	17	67.5	12.7	BUENA	64	67	70	BUENA
FINF2-C1	Cruzado	55%	60%	65%	20	60.0	4.4	REGULAR MALA	51	54	57	REGULAR
FINF2-C2	Cruzado	60%	63%	65%	21	57.5	4.6	REGULAR MALA	53	56	59	REGULAR
FINF2-C3	Acceso	75%	78%	80%	14	75.0	9.7	REGULAR BUENA	64	67	70	BUENA
FINF2-C4	Acceso	65%	68%	70%	18	65.0	5.6	REGULAR MALA	59	63	67	BUENA
FINF3-C1	Cruzado	60%	65%	70%	17	67.5	8.1	REGULAR BUENA	59	63	67	BUENA
FINF3-C2	Cruzado	60%	65%	70%	18	65.0	5.4	REGULAR MALA	55	59.5	64	REGULAR
FINF3-C3	Acceso	55%	60%	65%	22	55.0	5.0	REGULAR MALA	49	52.5	56	REGULAR
FINF3-C4	Acceso	60%	63%	65%	19	62.5	5.2	REGULAR MALA	52	54	56	REGULAR
FINF3-C5	Acceso	52%	55%	58%	22	55.0	4.6	REGULAR MALA	50	53	56	REGULAR
FINF4-C1	Cruzado	53%	57%	60%	21	57.5	4.7	REGULAR MALA	51	54.5	58	REGULAR
FINF4-C2	Cruzado	50%	54%	58%	23	52.5	3.0	MALA	49	52	55	REGULAR
FINF4-C3	Acceso	60%	64%	68%	18	65.0	8.0	REGULAR	60	64	68	BUENA
FINF4-C4	Acceso	65%	68%	70%	18	65.0	8.4	REGULAR BUENA	63	66	69	BUENA

5.5. Definición de dominios geotécnicos

En base al levantamiento geotécnico mediante celdas y considerando la homogeneidad de características geotécnicas observada dentro de cada sector, se decidió realizar una división a través de dominios geotécnicos considerando los índices Q y GSI. Se definió cada sector como un dominio geotécnico particular, a excepción del sector Haru, ya que este presenta un cambio litológico, por lo tanto, se dividió en dos dominios Haru And y Haru Fil (Tabla 5.12)

Tabla 5.12. Resumen de índices geotécnicos de dominios.

Dominios	Q			GSI		
	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx
Haru Fil	5,21	6,61	7,94	52	57,7	63
Haru And	5,75	7,70	11,25	55	60,3	66
Esperanza	5,20	6,90	12,90	50	56,4	65
Farellones	3,00	6,50	12,70	46	58,5	70

Haru And

El dominio se compone por andesitas alteradas a biotita-clorita con intensidad moderada, de calidad regular a buena con un índice Q promedio de 7,7 y GSI promedio 60,3. Se observan dos familias de discontinuidades más una familia aleatorio, lo que se

respalda en la información estructural levantada en el sector que indica dos familias principales de rumbo NE y dirección de inclinación NW, además, de familias secundarias de rumbo NE y NW, de dirección de inclinación SE y NE, respectivamente. Los buzamientos de las discontinuidades son de alto ángulo ($>70^\circ$). Los planos de discontinuidades presentan, principalmente pátinas de hematita, con rugosidad suave-ondulada.

Haru Fil

Litológicamente, el presente dominio se compone por filitas de biotita, y posee una calidad regular a regular mala con un índice Q promedio de 6,61 y GSI promedio de 57,7. En general, comparte características con el dominio Haru And en cuanto al número de familias y condición de planos de discontinuidad, pero su principal diferencia se reconoce en el grado de fracturamiento, lo que se expresa en que en el dominio Haru Fil se observa un RQD de peor calidad si se compara con el definido para el dominio Haru And, promediando 63% y 69% respectivamente.

Esperanza

El dominio está formado por andesitas alteradas a biotita-clorita con intensidad moderada, presenta una calidad regular con un GSI promedio de 56,4 y Q promedio de 6,9. Al igual que los dominios de Haru, se reconocen dos familias de discontinuidades y planos suave-ondulados. Un aspecto relevante del dominio es la mayor presencia de alteración en las paredes de las discontinuidades, con pátinas de especularita en los planos formados por estructuras. El rumbo de las discontinuidades varía entre NW y NNE, con una dirección de inclinación SW y NW, respectivamente.

Farellones

El macizo rocoso que comprende este dominio se compone por andesitas alteradas a biotita-clorita, y posee una calidad geotécnica regular, de acuerdo con los índices GSI promedio de 58,5 y Q promedio de 6,5. En base a las características vistas en terreno, se observan dos familias de discontinuidades y una aleatoria, con sectores donde se observan

hasta tres familias, que coinciden con las celdas de peor calidad geotécnica definido en el estudio ($Q < 4$). Según el levantamiento discontinuidades, en el sector se reconocen estructuras de rumbo NW y NE, con una dirección de inclinación SW y NW, respectivamente. El buzamiento de las estructuras es subvertical ($> 85^\circ$) y la rugosidad de los planos es de tipo rugosa-planar, con pátinas de especularita y hematita.

5.6. Indicaciones de fortificación

Aplicando la metodología de fortificación asociada al método Q de Barton (véase en subcapítulo 2.3.5. y anexo 2), se realizaron indicaciones de fortificación para cada subsector que compone a los sectores de estudio, debido a la necesidad de diferenciar el propósito y la temporalidad de cada labor estudiada. Se utilizó un valor promedio de Q para las celdas ubicadas en vías de acceso y un valor de Q promedio para celdas dispuestas en cruzados, a las que se les asignó un valor de ESR (*Excavation Support Ratio*) de 1,3 y 1,6 respectivamente (Tabla 5.13). El ESR aplicado se determinó asumiendo una postura conservadora, con el fin de permitir eventuales cambios que puedan surgir con respecto al uso final que tendrá cada labor.

Tabla 5.13. Variables aplicadas para la definición de fortificación, según el método de Q de Barton, para cada subsector estudiado.

Subsectores	Ubicación	Ancho en m/ ESR	Q promedio
Haru superior	Accesos	3,85	8,24
	Cruzados	3,13	7,11
Haru intermedio	Accesos	3,85	7,23
Haru inferior	Accesos	3,85	7,25
	Cruzados	3,13	5,21
Esperanza 1A	Accesos	3,85	7,00
	Cruzados	3,13	7,20
Esperanza 1B	Accesos	3,85	7,20
	Cruzados	3,13	6,10
Esperanza 3	Accesos	3,85	6,80
Farellones intermedio	Accesos	3,85	6,10
	Cruzados	3,13	6,60
Farellones inferior	Accesos	3,85	6,80
	Cruzados	3,13	6,30

Si se considera que el ancho de la labor debe tener 5 metros, al realizar la división con el ESR correspondiente a labores en cruzados y accesos, se obtiene un valor de dimensión equivalente 3,13 ($ESR=1,6$) y 3,85 ($ESR=1,3$), respectivamente.

Adicionalmente, se incorporó a las estimación de fortificación, las celdas con el valor de Q más bajo ($Q < 4,7$) con la finalidad de reconocer el sostenimiento necesario en las condiciones más adversas del estudio (Tabla 5.14).

Tabla 5.14. Variables aplicadas para la definición de fortificación, según el método de Q de Barton, para las celdas de menor calidad geotécnica.

Celdas	Ubicación	Ancho en m/ ESR	Q
FINT3-C1	Accesos	3,85	4.0
FINF3-C5			4.6
FINT2-C3	Cruzados	3,13	3.6
FINF2-C1			4.4
FINF2-C2			4.6
FINF3-C5			4.7
FINF4-C2			3.0

Según el gráfico de calidad del macizo rocoso y fortificación (Fig. 5.21), la totalidad de los subsectores estudiados, presentan una calidad geotécnica que sólo requiere de acuñadura sistemática de las labores. Sin embargo, como parte de la actitud conservadora mencionada, se sugiere considerar la instalación de fortificación si las condiciones del macizo lo ameritan, en particular, si el índice de Q es menor a 5,0. Este valor de referencia de Q no es arbitrario, ya que se desprende de la comparación de los subsectores estudiados en el gráfico.

En el caso de las celdas, la recomendación de fortificación para aquellas localizadas en accesos, corresponde a instalación sistemática de pernos de 2,4 m con un espaciamiento de 2,1 m, junto con hormigón proyectado de 5-6 cm de espesor. De acuerdo al gráfico, las celdas ubicadas en cruzados no requieren de fortificación, sin embargo, debido a la mala calidad geotécnica se sugiere la instalación de pernos y malla, del mismo modo que lo mencionado para la recomendación de subsectores.

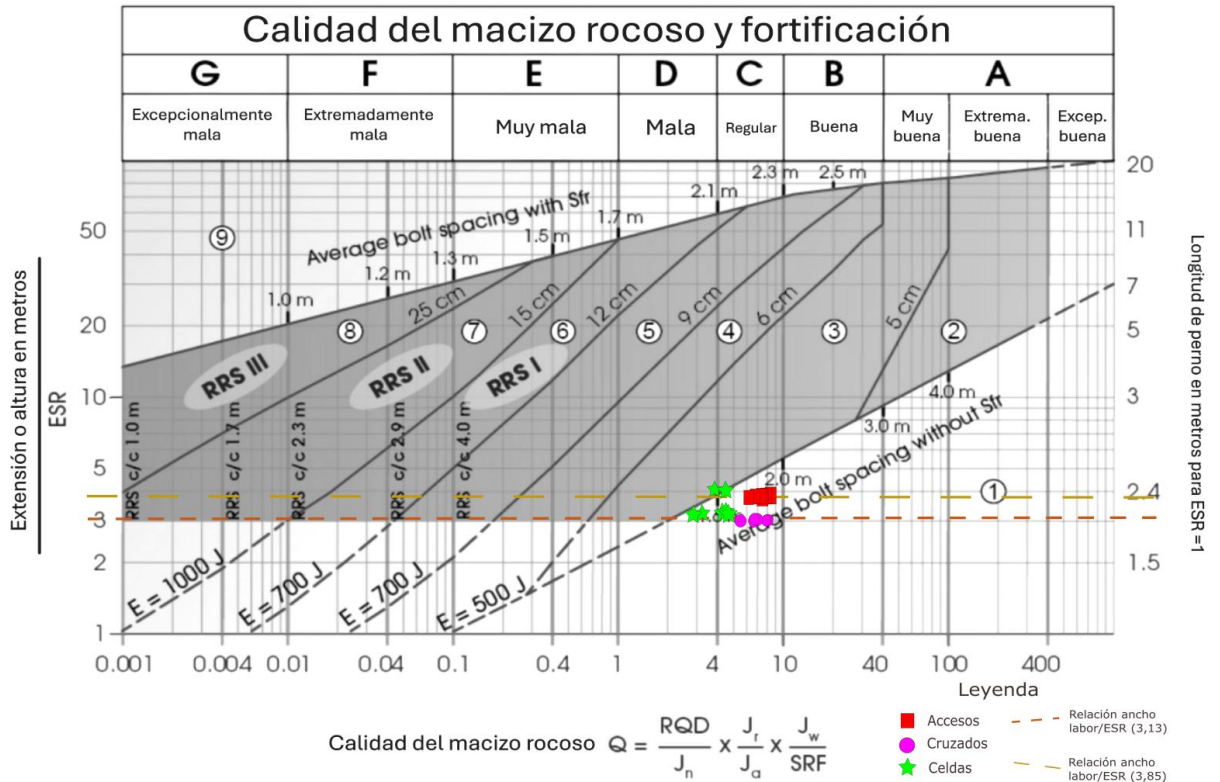


Figura 5.21. Gráfico de calidad del macizo rocoso y fortificación. Incorpora los puntos de intersección entre las rectas de los promedios de Q y la relación ancho-ESR. Modificado de NGI (2022).

La información con respecto a las indicaciones de fortificación se encuentra resumida en las tablas 5.15 y 5.16. Como se mencionó con anterioridad, se indica el sostenimiento para los subsectores estudiados y para las celdas de menor calidad geotécnica.

Tabla 5.15. Resumen de indicaciones de fortificación para subsectores de estudio.

Subsectores	Indicaciones
Haru superior	Acuñadura sistemática, evaluación periódica sin fortificación. Se deja a criterio del encargado de la evaluación y monitoreo, la instalación de pernos y/o mallas de contención, en caso de reconocer en terreno su pertinencia.
Haru intermedio	
Haru inferior	
Esperanza 1A	
Esperanza 1B	
Esperanza 3	
Farellones intermedio	
Farellones inferior	

Tabla 5.16. Resumen de indicaciones de fortificación para celdas de menor calidad geotécnica.

Celdas	Indicaciones
FINT3-C1	Instalación sistemática de pernos de 2,4 m, con un espaciamiento de 2,1 m y en conjunto con hormigón proyectado 5-6 cm de espesor.
FINF3-C5	Se sugiere la instalación de pernos puntuales, en caso de observar pertinencia.
FINT2-C3	Acuñadura sistemática, evaluación periódica sin fortificación. Se sugiere, debido a la mala calidad geotécnica, considerar la instalación de mallas y pernos de 2,4 m o 3,5 m con un espaciamiento de 1,6 m, si se observaran condiciones que lo ameriten.
FINF2-C1	
FINF2-C2	
FINF3-C5	
FINF4-C2	

CAPÍTULO 6: DISCUSIONES

6.1. Distribución de las litologías

Las litologías caracterizadas en este estudio presentan similitudes específicas con descripciones previas, sugiriendo una cierta continuidad litológica. La andesita, por ejemplo, contiene biotitas secundarias alteradas a clorita y plagioclasas alteradas a sericita, comparable a la andesita biotitizada-cloritizada descrita por Solís (2016).

Las filitas, a su vez, comparten características composicionales y estructurales, como la orientación y composición de micas, con las unidades metasedimentarias reportadas tanto por Solís (2016) como por Pérez (2019). La presencia de metamorfismo de bajo grado en estas rocas a cotas inferiores de lo previamente reportado, indica una distribución más amplia y compleja de estas facies metamórficas en el distrito. La orientación preferencial de las micas y los indicadores de cizalle relacionados a vetillas con contenido de minerales opacos, sugieren un control estructural en el desarrollo de las alteraciones en las rocas de la Formación Punta del Cobre. A partir de las características composicionales y la evidencia de cizalle, es posible sugerir como protolito a las intercalaciones sedimentarias clásticas del miembro Andesita inferior (véase en Capítulo 4). Sin embargo, no fue posible observar el tipo de contacto entre filita y andesita en la superficie expuesta de los túneles.

Es importante mencionar que los estudios previos se centraron en niveles superiores de la mina, limitados por el desarrollo de túneles existentes en ese momento. No obstante, el desarrollo mayor de túneles en la actualidad hacia niveles más profundos permitió el reconocimiento no tan solo de rocas andesíticas, sino que también de filitas en el interior de la unidad geológica Andesitas (SCMAK, 2018), por lo que se plantea la necesidad de revisar la división de unidades geológicas del yacimiento.

6.2. Discontinuidades y metodologías de captura

En general, las orientaciones de discontinuidades NE y NW son predominantes, con manteos subverticales a oblicuos (86° - 49°). La asociación entre fallas de orientación

NNW y la mineralización de mena, sugiere una influencia de las discontinuidades en la distribución de los minerales de interés económico del depósito. Sin embargo, se requiere un análisis más detallado para ser concluyente, incluyendo el estudio de indicadores cinemáticos y petrografía de vetas principales y asociadas, lo que excede los límites del presente estudio.

El análisis comparativo de la orientación y buzamiento de estructuras, utilizando metodologías de captura en terreno y el *software* PointStudio, evidencia variaciones relevantes en las tendencias generales. Un ejemplo de esto ocurre en el subsector de Farellones intermedio, donde las fallas mayores y menores muestran tendencias de NNW a NNE, mientras que los datos digitales indican tendencias de NW a NE, con una diferencia en el rumbo de 26° a 50°, respectivamente. Cabe destacar que se utilizó la herramienta semiautomática de captura de discontinuidades "Extraer", lo que permitió recopilar una gran cantidad de información. Sin embargo, durante el uso del programa se observó que este tiende a identificar con mayor facilidad discontinuidades en planos perpendiculares o semi perpendiculares a la orientación del túnel, lo que introdujo un sesgo en los resultados, especialmente notorio en subsectores de baja calidad en su escaneo. Se redujo el sesgo, mediante la revisión exhaustiva de los datos, no obstante, se reconoce que factores como la baja resolución de la nube de puntos, polución en el sector y la presencia de fortificación, limitan la capacidad del programa de reconocer correctamente las discontinuidades del macizo. Por lo tanto, debido a la gran importancia de la adecuada caracterización de estructuras, en particular, para garantizar la estabilidad de las labores, no se recomienda el uso del *software* en sectores en donde se presenten los factores mencionados, por lo que se sugiere priorizar el mapeo en terreno.

6.3. Dominios geotécnicos en UGT 5.

Mientras que los antecedentes, la definición de la unidad geotécnica 5, indicaban una buena calidad geotécnica general (GSI:59; Q:9,0), los resultados del levantamiento geotécnico en los subsectores muestran una menor calidad geotécnica, con valores de GSI entre 56 a 60 y valores de Q promedio entre 6,6 a 7,7. Los elementos principales que influyen en el empeoramiento de la calidad geotécnica del macizo se asocian a la presencia

de alteraciones de micas en planos de discontinuidades y variaciones en el grado de fracturamiento. La diferencia entre los índices geotécnicos de estudio anteriores, con este trabajo, podrían radicar en el mayor desarrollo actual de las labores en los sectores de mayor profundidad de la mina,

La definición de dominios geotécnicos permitió reconocer diferencias entre los sectores de estudio. En el sector Haru, la diferenciación litológica derivó en la división de los dominios Haru And (GSI:60,3; Q:7,70) y Haru Fil (GSI:57,7; Q:6,61), observándose una mejor calidad geotécnica en Haru And, lo que también se evidencia en los valores de RQD, que muestra un mayor grado de fracturamiento en Haru Fil. Por otro lado, el dominio Esperanza se caracteriza por una calidad geotécnica regular (GSI:56,4; Q:6,9), presentando mayor alteración superficial en las discontinuidades, en donde la presencia de especularita en los planos de discontinuidad podría ser un factor que influye en la menor calidad del macizo rocoso en este dominio. Finalmente, el dominio Farellones, con una calidad geotécnica también regular (GSI:58,5; Q:6,5), contiene zonas con conjuntos de discontinuidades que alcanzan hasta tres familias, coincidiendo con las celdas de peor calidad ($Q < 4$) determinadas en el análisis. Adicionalmente, la rugosidad baja a media de los planos de discontinuidad, además de la presencia de especularita y hematita, constituyen factores que afectan la calidad del macizo en este dominio.

En el sector de Farellones se determinaron valores de GSI entre 46 y 60, con un promedio de 58,5, lo que se asemeja a lo establecido por FF-Geomechanics (2020) en su estudio geotécnico-estructural de este sector, donde señalan que el macizo rocoso en general es de buena calidad geotécnica, con GSI promedio que varía entre 54 y 66, mencionando la presencia de celdas de mala calidad debido a un intenso cizallamiento.

En cuanto a las indicaciones de fortificación, se evaluaron considerando cada subsector de estudio, incorporando a las celdas de peor calidad ($Q < 4,7$) con un enfoque conservador, en caso de realizar un cambio posterior en la finalidad de la labor, utilizando valores de ESR de 1,3 para labores de accesos y 1,6 para labores de cruzados. Si bien la aplicación del método de Q de Barton indica que la totalidad de los subsectores, utilizando un Q promedio, no requieren de la instalación obligatoria de fortificación, se recomienda

acuñadura sistemática y se propone la instalación de fortificación adicional (pernos y malla) en zonas donde el índice Q sea inferior a 5,0, considerando las condiciones más desfavorables observadas en el estudio y lo mostrado en el gráfico de fortificación.

Para las celdas de peor calidad ubicadas en accesos, se recomienda la instalación sistemática de pernos de 2,4 m con un espaciamiento de 2,1 m, junto con hormigón proyectado de 5-6 cm de espesor. En el caso de los cruzados, a pesar de que el gráfico no indica la necesidad de fortificación, se sugiere evaluar la instalación de pernos y malla en función del valor de Q específico de cada zona.

Es importante señalar que el estudio presenta algunas limitaciones, en particular, con respecto al mapeo geotécnico selectivo realizado, ya que, si bien resultó eficiente en términos de tiempo e información, podría no ser completamente representativo de la complejidad geotécnica de estos sectores.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La caracterización petrográfica realizada, permitió reconocer dos litologías en el nivel 50, las que corresponden a andesita biotitizada-cloritizada y filita de biotita. La distribución reconocida indica una cierta continuidad litológica, ya que, tanto la andesita como la filita presentan similitudes con estudios previos, destacándose la composición y alteraciones de la andesita, así como también las características composicionales de la filita. Sin embargo, la identificación de metamorfismo de bajo grado a menores cotas de lo previamente reportado sugiere una distribución de la litología más compleja en el depósito. Se resalta la influencia de controles estructurales y procesos hidrotermales en las alteraciones y metamorfismo, pero se reconoce la necesidad de identificar el contacto entre filita y andesita para confirmar la relación litológica.

El análisis de las discontinuidades indicó la presencia de familias de estructuras con manteos subverticales a oblicuos (86° - 49°), de orientación predominante NW y NE, además de la presencia de fallas NNW asociadas a la mineralización de calcopirita.

A partir del mapeo geotécnico de los sectores de estudio, fue posible determinar valores de GSI promedio que varían entre 56 a 60 y valores de Q promedio entre 6,6 a 7,7. Al comparar los datos geotécnicos capturados, estos muestran una calidad geotécnica general menor en comparación con estudios previos, que definieron la UGT 5 con un GSI 59 y Q 9,0 (véase subcapítulo 4.5), lo que se atribuye a presencia de minerales como especularita en las discontinuidades y un mayor grado de fracturamiento. Las diferencias reconocidas en los parámetros geotécnicos y las litologías detectadas, permitió la subdivisión de los sectores de estudios en los dominios geotécnicos Haru And (GSI:60,3; Q:7,70), Haru Fil (GSI:57,7; Q:6,61), Esperanza (GSI:56,4; Q:6,9) y Farellones (GSI:58,5; Q:6,5).

En términos de la fortificación según el método Q de Barton (véase en subcapítulo 2.3.5. y anexo 2) se indica que, en general, no se requiere fortificación extensiva para los sectores de estudio, priorizando la acuñadura sistemática en todas las áreas. Se propuso la instalación de fortificación adicional (pernos y malla), en lugares donde se determine un índice Q inferior a 5, en base a lo observado tanto en terreno como en el gráfico de fortificación de Q de Barton. En lugares donde se definieron celdas con un índice $Q < 5$, se

indicó una fortificación de instalación de pernos 2,4 m y malla en las vías de acceso, mientras que para las celdas ubicadas en cruzados se indicó considerar la incorporación de sostenimiento, de acuerdo con las condiciones propias del sector.

Se sugiere efectuar una revisión de la distribución litológica en otros sectores de la mina, considerando las litologías andesita biotitizada-cloritizada y filita de biotita presentadas en este estudio, con énfasis en los contactos entre estas rocas y su extensión tanto lateral como vertical. Esto contribuiría a comprender de mejor forma la geometría del yacimiento y explorar la influencia de la litología en la estabilidad, en particular, para las labores del nivel de explotación actual.

Si bien el mapeo geotécnico selectivo implementado en este estudio demostró ser eficiente en términos de tiempo, presenta limitaciones en cuanto a la representatividad de las condiciones geotécnicas del macizo rocoso, por lo que, para futuros levantamientos se recomienda la implementación de un mapeo sistemático en áreas clave de la mina, cubriendo una mayor proporción de las labores.

Se propone realizar una evaluación en otros sectores de la mina para determinar si el umbral de fortificación general propuesto ($Q < 5$) es adecuado, de acuerdo con las condiciones específicas de cada sector.

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS

Aguilar, J., 2008. Caracterización geotécnica y estructural de la rampa de exploración y del túnel de drenaje, mina Chuquicamata. Memoria para optar al título de Geólogo Universidad de Chile. Santiago, Chile, 134 p.

Arévalo, C., 1999. The Coastal Cordillera/Precordillera Boundary in the Tierra Amarilla area (27°20'-27°40'S/70°05'-70°20'W), northern Chile, and the structural setting of the Candelaria Cu-Au ore deposit. Tesis doctoral. Kingston University. 364 p.

Arévalo, C., 2005. Carta Los Loros, región de Atacama, escala 1:100000. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.

Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Pringle, M., Taylor, G., 2006. Structural Setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au deposit, Chilean Andes (27°30' S). *Economic Geology*. 101, 819-841.

Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., Palma, G., 2017. Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: a Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews*. 81, 62–78.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 6(4), 189-236.

Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 39, 185-216.

Barton, M., 2013. Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. *Treatise on Geochemistry*. 2 ed., vol. 13, 515–541.

Bieniawski, Z., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, New York. 272 p.

Brady, B., Brown, E., 2006. Rock Mechanics For Underground Mining. Chapman and Hall. 647 p.

Brown, E., 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods. Pergamon Press.

Castillo, E., del Real, I., Roa, C., 2023. Critical mineral versus major minerals: a comparative study of exploration budgets. Mineral Economics. 1-12.

Chen, H., Kurtis Kyser, T., Clark, A., Chen, H., Kyser, T., Clark, A., 2011. Contrasting fluids and reservoirs in the contiguous Marcona and Mina Justa iron oxide-Cu (-Ag-Au) deposits, south-central Perú. 46, 677–706.

Corvalán, J. 1974. Estratigrafía del Neocomiano marino de la región al sur de Copiapó, Provincia de Atacama. Revista Geológica de Chile. Vol. 1, 13-36.

Couture, J., Cole, G., Zhang, B., Nilsson, J., Dance, A., Scott, C., Vidal, M., 2017. Technical Report for the Candelaria Copper Mining Complex, Atacama Province, Region III, Chile. Reporte técnico para Lundin Mining Corporation.

Deere, D., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology). 1 (1), 16-22.

Deere, D.W., Deere D.U., 1989. Rock quality designation (RQD): After twenty years. Reporte técnico para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos. 101 p.

del Real, I., Thompson, J. F., Carriedo, J., 2018. Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. Ore Geology Reviews. 102, 106–153.

del Real, I., 2019. Lithological, structural and hydrothermal evolution of the Candelaria-Punta del Cobre iron oxide-Cu-Au district, northern Chile. Tesis doctoral en Ciencias Geológicas. Universidad de Cornell. 262 p.

del Real, I., Allmendinger, R., Thompson, J., Creixell, C., 2023. Evidence for transpression during formation of the Candelaria Punta del Cobre IOCG – district and regional implications. *Journal of South American Earth Sciences*. 126.

E-Mining Technology, 2008. Informe extendido de caracterización del macizo rocoso, mina subterránea Atacama Kozan. Informe inédito. Tierra Amarilla, Chile, 31 p.

Egaña, M., 2008. Geoestadística aplicada a parámetros geotécnicos. Memoria para optar al título de Ingeniero civil de minas, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 96 p.

FF-Geomechanics, 2020. Informe modelo estructural y geotécnico del sector Farellones de mina Atacama Kozan. Informe inédito. Tierra Amarilla, Chile, 81 p.

González de Vallejo, L., 2004. Ingeniería Geológica. Pearson Education. 744 p.

Grigaliunas, M., 2016. Diseño óptimo de minería subterránea auto-soportada. Tesis de Magister en Minería. Universidad de Chile. 71 p.

Groves, D., Bierlein, F., Meinert, L., Hitzman, M., 2010. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*. 105 (3), 641–654.

Hitzman, M., Oreskes, N., Einaudi, M., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*. 58 (1-4), 241–287.

Hoek, E., 1994. Strength of Rock and Rock Masses. *ISRM News Journal*, 2, 4-16.

Hoek, E., Carter, T., Diederichs, M., 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium.

Hoffstetter, R., Fuenzalida, H., Cecioni, G., 1957. *Lexique Stratigraphique International. Amerique Latine*. Vol. 5, 444 p.

Hudson, J., 1989. Rock Mechanics Principles in Engineering Practice. CIRIA Ground Engineering Report, Underground Construction. 72 p.

Ichii, Y., Abe, A., Ichige, Y., Matsunaga, J., Miyoshi, M., 2007. Copper exploration of the Atacama Kozan Mine, Region III, Chile. *Shigen-Chishitsu*. 57(1), 1-14.

ISRM, 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 319-368.

Knipping, J., Bilenker, L., Simon, A., Reich, M., Barra, F., Deditius, A., Lundstrom, C., Bindeman, I., Munizaga, R., 2015. Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology* 43 (7), 591–594.

Levi, B., Aguirre, L., 1981. Ensilic spreading-subsidence in the Mesozoic and Paleogene of Central Chile. *Journal of the Geological Society of London*. 138, 75-81.

Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne. 1422-1446.

Marschik, R., Singer, B., Munizaga, F., Tassinari, C., Moritz, R., Fontboté, L., 1997. Age of Cu(-Fe) mineralization and thermal evolution of the Punta del Cobre district. Chile. *Mineralium Deposita*. 32, 531-546.

Marschik, R., Leveille, R., Martin, W., 2000. La Candelaria and the Punta del Cobre District, Chile: Early Cretaceous Iron-Oxide Cu-Au (-Zn-Ag) Mineralization. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*. PGC Publishing. 1, 163-175.

Marschik, R., Fontboté, L., 2001. The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre-Candelaria area, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*. 14, 401–433.

Marschik, R., Söllner, F., 2006. Early cretaceous U-Pb zircon ages for the Copiapó plutonic complex and implications for the IOCG mineralization at Candelaria, Atacama Region, Chile. *Mineralium Deposita*. 41(8), 785–801.

Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Deckart, K., Charrier, R., 2016. Tectonic styles and crustal shortening of the Central Andes “Pampean” flat-slab segment in northern Chile (27–29°S). *Tectonophysics*. 667, 144-162.

Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España, 2015. *Guía sobre Control Geotécnico en Minería Subterránea*. 172 p.

Montané, S., 2020. *Metodología para diseño y secuenciamiento óptimo semiautomático de rampas en minería subterránea*. Tesis de Magíster en Minería. Universidad de Chile. 80 p.

Mourgues, F., 2004. Advances in ammonite biostratigraphy of the marine Atacama basin (Lower Cretaceous), northern Chile, and its relationship with the Neuquén basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. 17 (1), 3–10.

NGI, 2022. *Using the Q-system, Rock mass classification and support design*. Handbook. Oslo, Noruega, 56 p.

Niu, G., He, X., Xu, H., Dai, S., 2024. Development of Rock Classification Systems: A Comprehensive Review with Emphasis on Artificial Intelligence Techniques. *Eng.* 5 (1), 217-245.

Ortíz, F., Araya, R., Franquesa, F., Moraga, A., Zentilli, M., 1966. *Informe geológico del distrito minero Punta del Cobre*. Instituto de Investigaciones Geológicas, comisión Copiapó.

Palmström A, 1982. The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing. *Proc. int. Congr. IAEG, New Delhi*. 221 - 228.

Palmström, A., 2005. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 362-377.

Pérez, P., 2019. Estudio petrográfico, mineralógico y estructural de las unidades de andesitas superiores y el manto mineralizado del sector norte de la Sociedad Contractual Minera Atacama Kozan, Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile. Tesis de pregrado de Geología. Universidad de Atacama. 110 p.

Rieger, A., Marschik, R., Díaz, M., Holzl, S., Chiaradia, M., Akker, B., Spangenberg, J., 2010. The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the Mantoverde district, northern Chile. *Economic Geology*. 105 (7), 1271–1299.

Rupprecht, S., 2012. Mine development–access to deposit. Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 101-120.

Ryan, P., Lawrence, A., Jenkins, R., Matthews, J., Zamora, J., Marino, E., Urqueta, I., 1995. The Candelaria copper-gold deposits. En *Porphyry copper deposits of the American cordillera*. 20, 625-645.

SCMAK, 2018. Informe consolidado Proyecto de continuidad de explotación mina subterránea, S.C.M. Atacama Kozan. Informe Inédito. Tierra Amarilla, Chile, 164 p.

Segerstrom, K., Ruiz, C., 1962. Geología del Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. *Carta Geológica de Chile*.

Seymour, N., Singleton, J., Gomila, R., Arancibia, G., Ridley, J., Gevedon, M., Stockli, D., Semana, S., 2024. Sodic-calcic alteration and transpressional shear along the Atacama fault system during IOCG mineralization, Copiapó, Chile. *Mineralium Deposita*. 59, 1295–1323.

Sillitoe, R., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*. 38 (7), 787–812.

Skirrow, R., 2021. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. *Ore Geology Reviews*. 140, 36p.

Solís, D., 2016. Litología, alteración y mineralización de la unidad de explotación del yacimiento Atacama Kozan, III región de Atacama, Chile. Tesis de pregrado de Geología. Universidad de Atacama. 88 p.

Suorineni, F., Kaiser, Henning, J., 2008. Safe rapid drifting-support selection. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 23, 682-699.

Tilling, R., 1976. El batolito andino cerca de Copiapó, provincia de Atacama. *Geología y Petrología, Revista Geológica de Chile*. 24 p.

Ullrich, T., Clark, A., 1999. The Candelaria Cu/Au deposit, III Región, Chile: paragenesis, geochronology and fluid composition. *Mineral Deposits*. 201-204.

Vargas, J., Koppe, J., Pérez, S., 2014. Monte Carlo simulation as a tool for tunneling planning. *Tunneling and Underground Space Technology*. 40, 203-209.

Villaescusa, E., 2014. *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. CRC Press Taylor & Francis Group. 541 p.

Williams, P., Barton, M., Johnson, D., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N., Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, spacetime distributions, and possible modes of origin. *Economic Geology*. 100, 371–405.

ANEXOS

1. Parámetros Q de Barton.

Tabla 1.1. Valores asociados a parámetro J_n . Obtenido de Egaña (2008).

Caso	Condición	J_n	
- AUMENTA LA BILOGICIDAD DEL MACIZO →	A	Macizos rocosos masivos, sin o con muy pocas estructuras.	0.5 a 1
	B	Macizos rocosos con un único set de estructuras.	2
	C	Macizos rocosos con un set de estructuras <u>más</u> estructuras aleatorias.	3
	D	Macizos rocosos con dos sets de estructuras.	4
	E	Macizos rocosos con dos sets de estructuras <u>más</u> estructuras aleatorias.	6
	F	Macizos rocosos con tres sets de estructuras.	9
	G	Macizos rocosos con tres sets de estructuras <u>más</u> estructuras aleatorias.	12
	H	Macizos rocosos con cuatro o más sets de estructuras, con muchas estructuras aleatorias, con bloques cúbicos, etc.	15
	I	Macizo rocoso totalmente desintegrado, similar a un suelo granular.	20

Tabla 1.2. Valores asociados a parámetro J_r . Obtenido de Egaña (2008).

Caso	Condición	J_r	
--- DISMINUYE LA RUGOSIDAD DE LA ESTRUCTURA ---→	(a) Hay contacto entre las cajas de la estructura. (b) Desplazamientos de corte menores que 10 cm producen contacto entre las cajas de la estructura.		
	A	Estructuras discontinuas o que presentan puentes de roca.	4
	B	Estructuras ondulosas y rugosas (o irregulares).	3
	C	Estructuras ondulosas y lisas.	2
	D	Estructuras ondulosas y pulidas	1.5
	E	Estructuras planas y rugosas.	1.5
	F	Estructuras planas y lisas.	1.0
	G	Estructuras planas y pulidas	0.5
	(c) Los desplazamientos de corte no producen contacto entre las cajas de la estructura.		
	H	Estructura con rellenos arcillosos de espesor suficiente como para impedir el contacto entre las cajas de la estructura.	1.0
I	Estructura con rellenos de roca molida y/o materiales granulares de espesor suficiente como para impedir el contacto entre las cajas de la estructura.	1.0	

Tabla 1.3. Valores asociados a parámetro J_w . Obtenido de Egaña (2008).

Caso	Condición	p_{se} (MPa)	J_w	
AUMENTAN LAS INFILTRACIONES	A	Túneles secos o con infiltraciones menores (e.g. 5 l/min localmente o solo en algunos sectores)	< 0.1	1
	B	Infiltraciones y presiones moderadas, que ocasionalmente causan el lavado del relleno de las estructuras.	0.1 a 0.25	0.66
	C	Infiltraciones y presiones importantes en roca competente con estructuras sin relleno.	0.25 a 1.0	0.50
	D	Infiltraciones y presiones importantes que causan lavado de los rellenos de las estructuras.		0.33
	E	Infiltraciones muy importantes y a presión gavilladas por las tronaduras, pero decaen con el tiempo.	> 1.0	0.1 a 0.2
	F	Infiltraciones excepcionalmente altas con presiones que continúan sin decaer con el tiempo.		0.05 a 0.1

Tabla 1.4. Valores asociados a parámetro J_a . Obtenido de Egaña (2008).

Caso	Condición	ϕ_{res}	J_a	
AUMENTA LA ALTERACIÓN DE LA ESTRUCTURA	(a) Hay contacto entre las cajas de la estructura.			
	A	Estructuras bien trabadas y selladas con rellenos duros, impermeables, y que no se ablandan (e.g. cuarzo, epidota, etc.).		0.75
	B	Estructuras con cajas no alteradas, que solo presentan pátinas locales.	25° a 35°	1
	C	Estructuras con cajas ligeramente alteradas. Pátinas de materiales que no se ablandan y libres de finos: arenas, roca molida, etc.	25° a 30°	2
	D	Estructuras con pátinas limo arenosas, con poco contenido de arcillas, que no se ablandan.	20° a 25°	3
	E	Estructuras con pátinas de minerales arcillosos de baja fricción y que se ablandan (e.g. caolinita, micas, etc.). Estructuras con pátinas de clorita, talco, yeso, grafito, etc. Estructuras con pequeñas cantidades de arcillas expansivas (pátinas discontinuas, de 1 a 2 mm de potencia).	8° a 16°	4
	(b) Desplazamientos de corte menores que 10 cm producen contacto entre las cajas de la estructura.			
	F	Estructuras con rellenos de arenas y/o roca molida, libres de arcilla.	25° a 30°	4
	G	Estructuras con rellenos de arcillas muy preconsolidadas, que no se ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	16° a 24°	6
	H	Estructuras con rellenos de arcillas algo a poco preconsolidadas, que se ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	12° a 16°	8
	J	Estructuras con rellenos de arcillas expansivas (e.g. montmorillonita, rellenos continuos, con espesores < 5 mm). El valor de J_a depende del contenido de arcilla, de la exposición al agua, etc.	6° a 12°	8 a 12
	(c) Los desplazamientos de corte no producen contacto entre las cajas de la estructura.			
	K	Estructuras con rellenos potentes de roca brechizada y salbanda arcillosa (ver G, H, J para descripciones del material arcilloso).	6° a 24°	8 a 12
	L	Estructuras con rellenos potentes de arenas limosas o limo-arcillosas, con poco contenido de arcillas (que no se ablandan).		5
	M	Estructuras con rellenos potentes de salbanda arcillosa (ver G, H, J para descripciones del material arcilloso).	6° a 24°	13 a 20

Tabla 1.5. Valores asociados a parámetro SRF. Obtenido de Egaña (2008).

Caso	Condición	SRF		
(a) Zonas débiles intersectan la posición que tendrá la excavación subterránea, lo que puede causar aflojamiento (loosening) del terreno cuando se desarrolle la excavación subterránea.				
A	Aparecen múltiples zonas débiles que contienen salbanda arcillosa o roca químicamente desintegrada, con roca suelta en su periferia (a cualquier z).	10.0		
B	Aparece una zona débil que contiene salbanda arcillosa o roca químicamente desintegrada, con roca suelta en su periferia ($z \leq 50$ m).	5.0		
C	Aparece una zona débil que contiene salbanda arcillosa o roca químicamente desintegrada, con roca suelta en su periferia ($z > 50$ m).	2.5		
D	Aparecen múltiples zonas débiles, con roca suelta en su periferia, en un macizo rocoso competente y libre de arcilla (a cualquier z).	7.5		
E	Aparece una zona débil, con roca suelta en su periferia, en un macizo rocoso competente y libre de arcilla ($z \leq 50$ m).	5.0		
F	Aparece una zona débil, con roca suelta en su periferia, en un macizo rocoso competente y libre de arcilla ($z > 50$ m).	2.5		
G	Macizo rocoso muy fracturado, con estructuras abiertas que definen bloques en forma de cubos (a cualquier z).	5.0		
(b) Macizos rocosos competentes, problemas de concentración de esfuerzos.				
		UCS/S_1	TS/S_1	SRF
H	Estado tensional de magnitud baja, estructuras superficiales abiertas.	> 200	< 0.01	2.5
J	Estado tensional de magnitud moderada, condición de esfuerzos es favorable.	10 a 200	0.01 a 0.3	1.0
K	Estado tensional de magnitud alta, estructuras bien trabadas (usualmente favorable para la estabilidad, aunque puede presentar problemas en las cajas).	5 a 10	0.3 a 0.4	0.5 a 2.0
L	Macizo rocoso masivo que presenta lajamientos moderados 1 hora después del desarrollo de la excavación subterránea.	3 a 5	0.5 a 0.65	5 a 50
M	Macizo rocoso masivo que presenta lajamientos e incluso estallidos de roca poco después del desarrollo de la excavación subterránea.	2 a 3	0.65 a 1.0	50 a 200
N	Macizos rocosos que sufren notorios estallidos de roca y deformaciones inmediatas después del desarrollo de la excavación subterránea.	< 2	> 1	200 a 400
(c) Macizos rocosos que fluyen plásticamente (squeezing rock).				
O	El flujo plástico genera presiones moderadas.	5 a 10		
P	El flujo plástico genera presiones importantes.	10 a 20		
(d) Macizos rocosos expansivos (swelling rock), expansión o hinchamiento debido a reacciones químicas causadas por las aguas.				
Q	El hinchamiento genera presiones moderadas.	5 a 10		
R	El hinchamiento genera presiones importantes.	10 a 15		

2. Estimación de sostenimiento requerido de un túnel según Q de Barton (NGI, 2022).

El método para evaluar el sostenimiento necesario de una excavación requiere conocer las características geotécnicas del macizo rocoso, por medio del índice de calidad de roca Q, y dos factores que representan la dimensión equivalente de lo excavado, el *Excavation Support Ratio* (ESR) y la dimensión. El ESR es un factor que permite categorizar una excavación, de acuerdo con su uso final y nivel de seguridad requerido (Tabla 2.1); mientras que la dimensión puede representar el ancho o alto del túnel en metros.

Tabla 2.1. Factor ESR. Modificado de NGI (2022).

CATEGORÍA DE EXCAVACIONES	DESCRIPCIÓN	ESR
A	Excavaciones mineras temporales	3- 5
B	Piques mineros	2.0-2.5
C	Aberturas mineras permanentes, túneles de agua para hidroeléctricas, túneles, galerías y socavones para grandes excavaciones.	1.6
D	Cámaras de almacenamiento, plantas de tratamiento de agua, túneles carreteros y ferrocarrileros menores, tuneles de acceso.	1.3
E	Túneles carreteros y ferrocarriles mayores, refugios de defensa civil, portales y cruces de túnel, etc.	1.0
F	Estaciones nucleoeeléctricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deportes y reuniones, fábricas, etc.	0.80
G	Cavernas y aberturas subterráneas muy importantes con una larga vida útil, ≈ 100 años, o sin acceso para mantenimiento.	0.50

Para el caso del presente estudio se consideró como factor de dimensión, el ancho de la excavación promedio que corresponde a 5 metros. En los sectores evaluados se diferenciaron las excavaciones entre túneles de acceso (labores que conectan los túneles principales con los sectores de explotación) y cruzados (labores que conectan el caserón con los accesos), por lo tanto, los valores del ESR utilizados fueron 1,3 para accesos y 1,6 para cruzados.

La dimensión equivalente de una excavación se obtiene con la siguiente ecuación:

$$D_e = \frac{(\text{ancho o alto}) \text{ m}}{\text{ESR}}$$

La combinación de Q, el ESR y la dimensión equivalente permite determinar tanto el tipo como características del sostenimiento necesario, evaluando los factores por medio un gráfico de sostenimiento (Fig. 2.1).

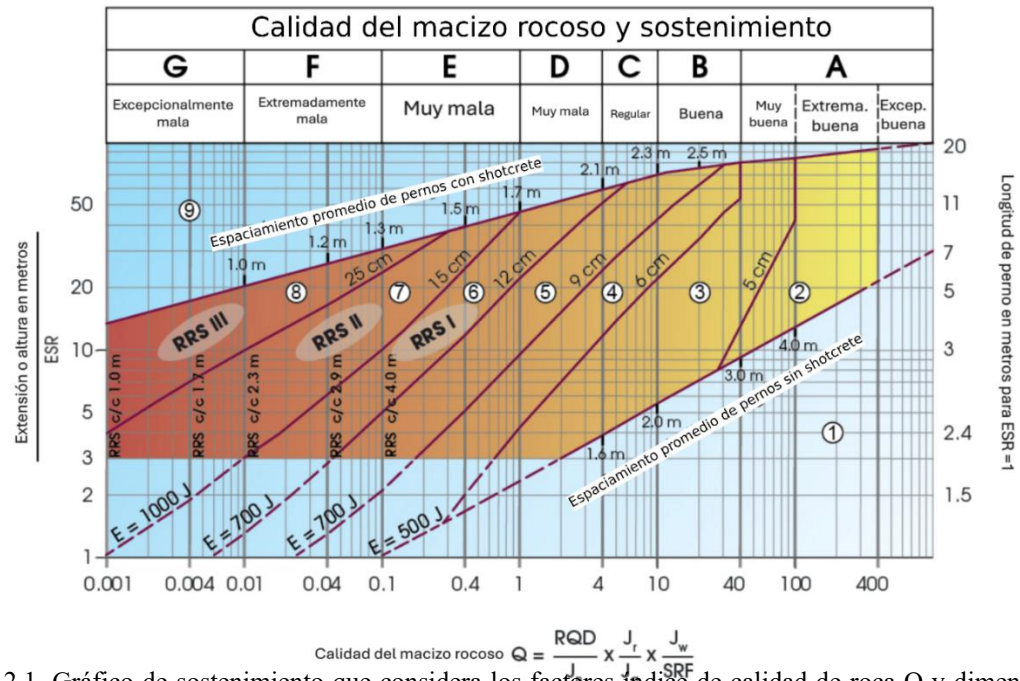


Figura 2.1. Gráfico de sostenimiento que considera los factores índice de calidad de roca Q y dimensión equivalente. Modificado NGI (2022).

El gráfico de sostenimiento clasifica el sostenimiento en nueve categorías, numeradas del 1 al 9 (Tabla 2.2). El eje horizontal representa el índice de calidad de roca Q, mientras que el eje vertical representa los valores de la dimensión equivalente. Al evaluar estos factores para cada excavación, se obtiene una categoría de sostenimiento específica, y es posible extraer directamente desde la gráfica características como el espaciamiento promedio de pernos.

Tabla 2.1. Categorías de fortificación de acuerdo con el gráfico de sostenimiento. Modificado de NGI (2022).

CATEGORÍAS DE FORTIFICACIÓN	
1	Sin fortificación o pernos puntuales
2	Pernos puntuales
3	Pernos sistemáticos, shotcrete con fibras 5-6 cm
4	Shotcrete con fibras y pernos 6-9 cm
5	Shotcrete con fibras y pernos 9-12 cm
6	Shotcrete con fibras y pernos 12-15 cm + arcos reforzados de shotcrete y pernos
7	Shotcrete con fibras y pernos >15 cm + arcos reforzados de shotcrete y pernos
8	Revestimiento de hormigón
9	Evaluación especial

3. Estimación de resistencia del macizo rocoso. Modificado de Brown (1981), obtenido de Aguilar (2008).

Clase	Descripción	Identificación de terreno	IRS (MPa)
R0	Roca Extremadamente Blanda	El material se puede marcar con la uña.	0,25 a 1
R1	Roca Muy Blanda	El material se desmenuza al ser golpeado con la punta del martillo geológico. Con un cortaplumas es fácil tallar el material.	1 a 5
R2	Roca Blanda	Al golpear con la punta del martillo geológico se producen pequeñas marcas en el material. Es difícil tallar el material con un cortaplumas.	5 a 25
R3	Roca Moderadamente Resistente	No se puede tallar el material con un cortaplumas. Se requiere un golpe fuerte del martillo geológico para fracturar el material.	25 a 50
R4	Roca Resistente	Se requiere más de un golpe del martillo geológico para fracturar el material.	50 a 100
R5	Roca Muy Resistente	Se requiere muchos golpes con el martillo geológico para fracturar el material.	100 a 250
R6	Roca Extremadamente Resistente	Al golpear el material con el martillo geológico este no se fractura, y solo saltan esquirlas.	> 250

4. Tabla de datos geotécnicos levantados. Elaboración propia.

Sector	Celdas	RQD %					Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)								Min	Med	Max	Clasificación GSI
FAR INT 1	FINT1-C1	65%	68%	70%	18	65.0	6	1.5	2	1	1	8.4	REGULAR BUENA	60	63	66	BUENA
FAR INT 1	FINT1-C2	60%	63%	65%	19	62.5	6	2	3	1	1	6.9	REGULAR	56	59	61	REGULAR
FAR INT 1	FINT1-C3	63%	65%	66%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.2	REGULAR	58	60	62	REGULAR
FAR INT 1	FINT1-C4	64%	66%	68%	18	65.0	6	1.5	2	1	1	8.3	REGULAR BUENA	59	62	64	BUENA
FAR INT 1	FINT1-C5	65%	68%	71%	17	67.5	6	1.5	3	1	1	5.7	REGULAR MALA	57	59.5	62	REGULAR
FAR INT 1	FINT1-C6	60%	63%	65%	21	57.5	6	2	3	1	1	6.9	REGULAR	53	56	58	REGULAR
FAR INT 2	FINT2-C1	70%	75%	80%	18	65.0	6	1.5	3	1	1	6.3	REGULAR	52	57	62	REGULAR
FAR INT 2	FINT2-C2	65%	68%	70%	19	62.5	6	2	4	1	1	5.6	REGULAR MALA	49	54	59	REGULAR
FAR INT 2	FINT2-C3	60%	65%	70%	21	57.5	9	2	4	1	1	3.6	MALA	46	51	56	REGULAR
FAR INT 3	FINT3-C1	68%	72%	75%	18	65.0	9	1.5	3	1	1	4.0	MALA	50	55	60	REGULAR
FAR INT 3	FINT3-C2	70%	73%	75%	16	70.0	6	2	3	1	1	8.1	REGULAR BUENA	55	60	65	REGULAR
FAR INT 3	FINT3-C3	62%	67%	72%	18	65.0	6	2	4	1	1	5.6	REGULAR MALA	47	52	57	REGULAR
FAR INF 1	FINF1-C1	70%	73%	75%	16	70.0	6	1.5	2	1	1	9.1	REGULAR BUENA	61	64	67	BUENA
FAR INF 1	FINF1-C2	63%	66%	69%	17	67.5	6	1.5	3	1	1	5.5	REGULAR MALA	55	57.5	60	REGULAR
FAR INF 1	FINF1-C3	60%	63%	65%	20	60.0	6	1.5	2	1	1	7.8	REGULAR	59	62.5	66	BUENA
FAR INF 1	FINF1-C4	65%	68%	70%	17	67.5	4	1.5	2	1	1	12.7	BUENA	64	67	70	BUENA
FAR INF 2	FINF2-C1	55%	60%	65%	20	60.0	9	2	3	1	1	4.4	REGULAR MALA	51	54	57	REGULAR
FAR INF 2	FINF2-C2	60%	63%	65%	21	57.5	9	2	3	1	1	4.6	REGULAR MALA	53	56	59	REGULAR
FAR INF 2	FINF2-C3	75%	78%	80%	14	75.0	6	1.5	2	1	1	9.7	REGULAR BUENA	64	67	70	BUENA
FAR INF 2	FINF2-C4	65%	68%	70%	18	65.0	6	1.5	3	1	1	5.6	REGULAR MALA	59	63	67	BUENA
FAR INF 3	FINF3-C1	60%	65%	70%	17	67.5	6	1.5	2	1	1	8.1	REGULAR BUENA	59	63	67	BUENA
FAR INF 3	FINF3-C2	60%	65%	70%	18	65.0	6	1.5	3	1	1	5.4	REGULAR MALA	55	59.5	64	REGULAR
FAR INF 3	FINF3-C3	55%	60%	65%	22	55.0	6	1.5	3	1	1	5.0	REGULAR MALA	49	52.5	56	REGULAR
FAR INF 3	FINF3-C4	60%	63%	65%	19	62.5	6	1.5	3	1	1	5.2	REGULAR MALA	52	54	56	REGULAR
FAR INF 3	FINF3-C5	52%	55%	58%	22	55.0	6	1.5	3	1	1	4.6	REGULAR MALA	50	53	56	REGULAR
FAR INF 4	FINF4-C1	53%	57%	60%	21	57.5	6	1.5	3	1	1	4.7	REGULAR MALA	51	54.5	58	REGULAR
FAR INF 4	FINF4-C2	50%	54%	58%	23	52.5	9	2	4	1	1	3.0	MALA	49	52	55	REGULAR
FAR INF 4	FINF4-C3	60%	64%	68%	18	65.0	6	1.5	2	1	1	8.0	REGULAR	60	64	68	BUENA
FAR INF 4	FINF4-C4	65%	68%	70%	18	65.0	6	1.5	2	1	1	8.4	REGULAR BUENA	63	66	69	BUENA
HARU 3A	HSU-C1	68%	71%	73%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.8	REGULAR	56	58	60	REGULAR
HARU 3A	HSU-C2	62%	64%	66%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.1	REGULAR	56	58	60	REGULAR
HARU 3A	HSU-C3	68%	72%	75%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.9	REGULAR	59	61	63	BUENA
HARU 3A	HSU-C4	55%	60%	65%	21	57.5	6	2	3	1	1	6.7	REGULAR	58	60.5	63	BUENA
HARU 3A	HSU-C5	65%	68%	70%	17	67.5	6	2	2	1	1	11.3	BUENA	62	64	66	BUENA

Continuación de tablas de datos geotécnicos.

Sector	Celdas	RQD %					Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)								Min	Med	Max	Clasificación GSI
HARU 1-2	HIT-C1	58%	61%	63%	20	60.0	6	2	3	1	1	6.7	REGULAR	55	56.5	58	REGULAR
HARU 1-2	HIT-C2	56%	60%	63%	18	65.0	6	2	3	1	1	6.6	REGULAR	57	59	61	REGULAR
HARU 1-2	HIT-C3	63%	66%	68%	17	67.5	6	2	3	1	1	7.3	REGULAR	58	60.5	63	BUENA
HARU 1-2	HIT-C4	66%	69%	72%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.7	REGULAR	61	62.5	64	BUENA
HARU 1-2	HIT-C5	75%	79%	82%	13	77.5	6	2	3	1	1	8.7	REGULAR BUENA	61	62.5	64	BUENA
HARU 1-2	HIT-C6	70%	74%	78%	15	72.5	6	2	3	1	1	8.2	REGULAR BUENA	60	61.5	63	BUENA
HARU 1-2	HIT-C7	67%	70%	73%	17	67.5	6	2	3	1	1	7.8	REGULAR	58	60.5	63	BUENA
HARU 1-2	HIT-C8	68%	72%	75%	15	72.5	6	2	4	1	1	6.0	REGULAR MALA	56	58	60	REGULAR
HARU 1-2	HIT-C9	66%	69%	72%	17	67.5	6	2	4	1	1	5.8	REGULAR MALA	55	56.5	58	REGULAR
HARU 1-2	HIT-C10	65%	69%	72%	17	67.5	6	2	3	1	1	7.6	REGULAR	58	59.5	61	REGULAR
HARU 4-6	HIF-C1	70%	74%	77%	15	72.5	6	2	3	1	1	8.2	REGULAR BUENA	62	63	64	BUENA
HARU 4-6	HIF-C2	68%	72%	75%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.9	REGULAR	59	60.5	62	BUENA
HARU 4-6	HIF-C3	61%	64%	66%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.1	REGULAR	56	57.5	59	REGULAR
HARU 4-6	HIF-C4	63%	66%	68%	18	65.0	6	1.5	3	1	1	5.5	REGULAR MALA	55	56.5	58	REGULAR
HARU 4-6	HIF-C5	60%	63%	65%	19	62.5	6	2	4	1	1	5.2	REGULAR MALA	52	53.5	55	REGULAR
HARU 4-6	HIF-C6	64%	67%	69%	17	67.5	6	2	3	1	1	7.4	REGULAR	57	58.5	60	REGULAR
HARU 4-6	HIF-C7	65%	68%	70%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.5	REGULAR	58	60.5	63	BUENA
ESPERANZA 3	E3-C1	65%	68%	70%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.5	REGULAR	52	53.5	55	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C2	60%	63%	66%	19	62.5	6	2	3	1	1	7.0	REGULAR	51	52.5	54	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C3	62%	65%	68%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.2	REGULAR	52	54	56	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C4	58%	62%	66%	19	62.5	6	2	3	1	1	6.9	REGULAR	54	55.5	57	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C5	60%	63%	65%	19	62.5	6	2	3	1	1	6.9	REGULAR	55	56.5	58	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C6	63%	66%	68%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.3	REGULAR	53	56	59	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C7	65%	69%	73%	16	70.0	6	2	4	1	1	5.8	REGULAR MALA	50	53.5	57	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C8	73%	77%	80%	14	75.0	6	1.5	3	1	1	6.4	REGULAR	56	59	62	REGULAR
ESPERANZA 3	E3-C9	70%	73%	75%	17	67.5	6	1.5	3	1	1	6.0	REGULAR	55	57.5	60	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C1	75%	78%	80%	12	80.0	4	2	3	1	1	12.9	BUENA	61	63	65	BUENA
ESPERANZA 1A	E1A-C2	73%	76%	78%	13	77.5	6	2	3	1	1	8.4	REGULAR BUENA	60	61.5	63	BUENA
ESPERANZA 1A	E1A-C3	72%	74%	76%	13	77.5	6	2	3	1	1	8.2	REGULAR BUENA	59	61.5	64	BUENA
ESPERANZA 1A	E1A-C4	65%	70%	75%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.8	REGULAR	56	58	60	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C5	63%	66%	68%	17	67.5	6	2	4	1	1	5.5	REGULAR MALA	53	54.5	56	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C6	62%	65%	67%	18	65.0	6	2	4	1	1	5.4	REGULAR MALA	51	53	55	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C7	62%	65%	67%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.2	REGULAR	52	53.5	55	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C8	62%	65%	67%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.2	REGULAR	54	56	58	REGULAR

Continuación de tablas de datos geotécnicos.

Sector	Celdas	RQD %					Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Clasificación Q	GSI			
		Min	Prom	Max	Jv	RQD % (Jv)								Min	Med	Max	Clasificación GSI
ESPERANZA 1A	E1A-C9	63%	66%	68%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.3	REGULAR	55	57	59	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C10	62%	65%	67%	17	67.5	6	2	3	1	1	7.2	REGULAR	55	58	61	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C11	61%	64%	66%	18	65.0	6	2	3	1	1	7.1	REGULAR	55	57	59	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C12	60%	63%	65%	19	62.5	6	2	4	1	1	5.2	REGULAR MALA	53	55.5	58	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C13	64%	66%	67%	16	70.0	6	2	4	1	1	5.5	REGULAR MALA	53	55	57	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C14	63%	65%	67%	17	67.5	6	2	4	1	1	5.4	REGULAR MALA	52	54.5	57	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C15	70%	73%	75%	16	70.0	6	2	4	1	1	6.0	REGULAR	56	58	60	REGULAR
ESPERANZA 1A	E1A-C16	68%	71%	74%	15	72.5	6	2	4	1	1	5.9	REGULAR MALA	55	57	59	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C1	70%	73%	75%	14	75.0	6	2	3	1	1	8.1	REGULAR BUENA	59	60.5	62	BUENA
ESPERANZA 1B	E1B-C2	68%	72%	75%	15	72.5	6	2	3	1	1	7.9	REGULAR	57	59	61	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C3	65%	68%	70%	17	67.5	6	2	4	1	1	5.6	REGULAR MALA	53	55	57	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C4	67%	71%	74%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.8	REGULAR	57	59	61	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C5	62%	65%	67%	18	65.0	6	2	4	1	1	5.4	REGULAR MALA	52	54	56	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C6	65%	69%	72%	16	70.0	6	2	4	1	1	5.7	REGULAR MALA	53	54.5	56	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C7	65%	69%	72%	17	67.5	6	2	3	1	1	7.6	REGULAR	54	56.5	59	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C8	68%	72%	75%	15	72.5	6	2	3	1	1	7.9	REGULAR	57	59	61	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C9	65%	69%	72%	16	70.0	6	2	3	1	1	7.6	REGULAR	55	57.5	60	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C10	65%	69%	72%	17	67.5	6	2	4	1	1	5.7	REGULAR MALA	52	53.5	55	REGULAR
ESPERANZA 1B	E1B-C11	62%	65%	68%	19	62.5	6	2	4	1	1	5.4	REGULAR MALA	51	52.5	54	REGULAR

5. Ejemplo de mapa geotécnico, subsector Haru inferior, escala 1:500. Elaboración propia.

