



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE
RESISTENCIA AL CORTE MEDIANTE EL MÉTODO DE
BARTON BANDIS EN ESTRUCTURAS EN RAJO DON LUIS
CODELCO-DIVISIÓN ANDINA, REGIÓN DE VALPARAÍSO,
CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Francisca Alanys Marileo Rodríguez

Profesor Patrocinante:	Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra
Profesional Guía:	Sr. Alejandro Espinoza Sanhueza
Profesores Comisión:	MSc. Abraham Elías González Martínez Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Concepción, 2023

ÍNDICE

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Formulación del problema	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo General	1
1.2.2. Objetivos Específicos	1
1.3. Ubicación y accesos	1
1.4. Método de trabajo	3
1.4.1. Etapa Gabinete I	3
1.4.2. Etapa Terreno	3
1.4.3. Etapa Gabinete II.....	3
1.5. Trabajos Anteriores	4
1.6. Agradecimientos	5
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	6
2.1. Rocas Estratificadas	6
2.1.1. Formación Río Colina	6
2.1.2. Formación Río Damas.....	6
2.1.3. Formación Lo Valdés	7
2.1.4. Formación Lo Prado	7
2.1.5. Formación Veta Negra	8
2.1.6. Formación Las Chilcas	9
2.1.7. Formación Colimapu.....	9
2.1.7. Formación Lo Valle.....	10
2.1.8. Formación Abanico	11
2.1.9. Formación Farellones	11
2.2. Rocas Intrusivas	12
2.2.1. Plutón Río Blanco-San Francisco.....	12
2.2.2. Cuerpos subvolcánicos	13
2.3. Cuaternario	13

2.3.1. Unidad Volcánica Antigua	13
2.3.2. Ignimbrita Pudahuel	13
2.3.3. Unidad Volcánica Nueva.....	14
2.4. Depósitos no consolidados.....	14
2.3.1. Depósitos gravitacionales.....	14
2.3.2. Depósitos glaciares.....	15
2.3.3. Depósitos fluviales, fluvioglaciares y aluviales	15
2.3.4. Depósitos lacustres	15
2.4. Geología Estructural	15
3. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL.....	18
3.1. Evolución tectónica.....	18
3.1.1. Eoceno tardío a Mioceno temprano: cuencas de extensión e intraarco.....	18
3.1.2. Mioceno temprano a Plioceno temprano: inversión tectónica, plutonismo y pórfidos	18
3.2. Franja metalogénica.....	19
3.3. Grupos Litológicos Geotécnicos	20
3.3.1. Grupo Andesita: Andesitas (AND)	20
3.3.2. Grupo Intrusivo: Granodiorita Río Blanco (GDRB).....	21
3.3.3. Grupo Intrusivo Duro: Granodiorita Cascada (GDCC)	21
3.3.4. Grupo Diorita: Diorita (DIOR).....	21
3.3.5. Grupo Pórfido.....	22
3.3.6. Grupo Brecha	23
3.3.7. Grupo Chimeneas	26
3.4. Mineralización y alteración	27
3.4.1. Alteración Biotítica de fondo (FBt).....	27
3.4.2. Alteración Biotita-Clorita de fondo (FBt-Cl).....	28
3.4.3. Alteración Clorita-Epidota de fondo (FCl-Ep).....	28
3.4.4. Biotítica o Feldespato Potásico penetrativa (Fk-Bt o Bt-Fk).....	28
3.4.5. Sericita gris verde penetrativa (SGV)	29
3.4.6. Cuarzo sericítica penetrativa (QS)	29
3.4.7. Argílica penetrativa (Arg)	29

3.5. Unidades Geotécnicas	29
3.5.1. Roca Primaria	29
3.5.2. Roca Secundaria	30
3.5.3. Chimenea Volcánica.....	30
3.6. Geología Estructural	30
3.6.1. Categorización de fallas en Yacimiento Río Blanco.....	30
3.6.2. Geocronología Estructural.....	31
4. MARCO TEÓRICO	33
4.1. Mecanismos de falla	33
4.1.1. Falla planar	33
4.1.2. Falla en cuña.....	33
4.1.3. Volcamientos.....	34
4.2. Método de Mohr-Coulomb	35
4.3. Método de Barton-Bandis	35
4.3.1. Determinación de parámetros de Barton Bandis	36
5. METODOLOGÍA	45
5.1. Obtención de datos	45
5.1.1. Ángulo de fricción básico.....	45
5.1.2. Coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (JRC)	47
5.1.3. Resistencia a la compresión de las discontinuidades (JCS)	48
5.1.4. Tensión normal.....	49
6. RESULTADOS	51
6.1. Ángulo de fricción básico	51
6.1.1. Andesita.....	51
6.1.2. Intrusivo.....	52
6.1.3. Intrusivo Duro	53
6.1.4. Diorita.....	54
6.1.5. Pórfido	54
6.1.6. Brechas	55
6.1.7. Chimeneas	56

6.2. JRC	58
6.2.1 Andesita.....	59
6.2.2. Intrusivo.....	60
6.2.3. Intrusivo Duro	60
6.2.4. Diorita.....	61
6.2.5. Pórfido	62
6.2.6. Chimenea Dacítica	62
6.3. JCS	63
6.3.1. Andesita.....	64
6.3.2. Intrusivo.....	65
6.3.3. Intrusivo Duro	67
6.3.4. Diorita.....	68
6.3.5. Pórfido	70
6.3.6. Chimenea Dacítica	71
6.4. Tensión Normal	73
6.4.1. Andesita.....	73
6.4.2. Intrusivo.....	74
6.4.3. Intrusivo Duro	75
6.4.4. Diorita.....	76
6.4.5. Pórfido	77
6.4.6. Chimenea Dacítica	78
6.5. Resistencia al corte mediante Barton Bandis	79
6.5.1. Andesita.....	80
6.5.2. Intrusivo.....	80
6.5.3. Intrusivo Duro	81
6.5.4. Diorita.....	81
6.5.5. Pórfido	82
6.5.6. Chimenea Dacítica	82
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
8. REFERENCIAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa ubicación área de estudio.	2
Figura 2. Mapa geológico simplificado del área de estudio con los principales sistemas de fallas y tendencia de pliegues. RB-SF: Batolito Río Blanco-San Francisco. Extraído de Piquer y otros (2015).	17
Figura 3. Franjas metalogénicas del norte de Chile	19
Figura 4. Grupos litológicos geotécnicos y su ubicación en el área de estudio.	20
Figura 5. Modelo de alteraciones del yacimiento.....	28
Figura 6. Perfil de unidades geotécnicas	30
Figura 7. Estructuras en rajo Don Luis. Fallas de Orden 0 en amarillo, Fallas de orden 1 en azul, Fallas de Orden 2 en rojo y Fallas de Orden 3 en verde.	31
Figura 8. Condición para la rotura plana (González de Vallejo y otros, 2002).....	33
Figura 9. Condición para la rotura en cuña (González de Vallejo y otros, 2002).	34
Figura 10. Esquema de talud con estructura favorable al volcamiento (González de Vallejo y otros, 2002).	34
Figura 11. Envolvente de Mohr-Coulomb.....	35
Figura 12. Perfiles de rugosidad de Barton y Chubey (1977).	38
Figura 13. Corrección de escala de JRC (Barton y otros, 1981).	39
Figura 14. Relación entre amplitud máxima de la discontinuidad y longitud del perfil (Barton, 1981).	40
Figura 15. Funcionamiento del Martillo de Schmidt.	41
Figura 16. Gráfico de Deere y Miller (1966)	42
Figura 17. Corrección de escala para JCS (Barton y otros, 1981)	43
Figura 18. Método de Barton (1982) y método de Stimpson (1981)	45
Figura 19. A. Probetas alineadas de manera horizontal previo al tilt test. B. Tilt test.	46
Figura 20. A. Medición de JRC en la pared. B. Medición de JRC en una muestra de la discontinuidad.	47
Figura 21. Comparación perfil medido con tabla de perfiles de rugosidad de Barton y Chubey (1977).	48

Figura 22. Dron Phantom 4 RTK	50
Figura 23. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Andesita.	52
Figura 24. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Intrusivo.	52
Figura 25. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Intrusivo Duro.	53
Figura 26. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Diorita.	54
Figura 27. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Pórfido.....	55
Figura 28. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Brechas.....	56
Figura 29. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Chimenea Dacítica.	57
Figura 30. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Chimenea Riolítica.	58
Figura 31. Histograma de JRC obtenido en terreno para Andesita.	59
Figura 32. Histograma de JRC obtenido en terreno para Intrusivo.	60
Figura 33. Histograma de JRC obtenido en terreno para Intrusivo Duro.....	61
Figura 34. Histograma de JRC obtenido en terreno para Diorita.	61
Figura 35. Histograma de JRC obtenido en terreno para Pórfido.	62
Figura 36. Histograma de JRC obtenido en terreno para Chimenea Dacítica.	63
Figura 37. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Andesita.....	64
Figura 38. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Andesita.	65
Figura 39. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo.....	66
Figura 40. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo.	66
Figura 41. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo Duro.	67
Figura 42. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo Duro.....	68
Figura 43. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Diorita.....	69
Figura 44. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Diorita.	69
Figura 45. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Pórfido.	70

Figura 46. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Pórfido.....	71
Figura 47. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Chimenea Dacítica.	72
Figura 48. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Chimenea Dacítica.	72
Figura 49. Cuñas de Andesita en Fase 6.	73
Figura 50. Cuñas en Intrusivo.	74
Figura 51. Cuñas de Intrusivo Duro.	75
Figura 52. Cuñas en Diorita en Sector Rampa Santa Teresa.....	76
Figura 53. Cuñas en Pórfido don Luis en banco 3821.	77
Figura 54. Cuñas en Chimenea Dacítica	79
Figura 55. Envolverte de resistencia al corte en Andesita.....	80
Figura 56. Envolverte de resistencia al corte en Intrusivo.....	80
Figura 57. Envolverte de resistencia al corte en Intrusivo Duro	81
Figura 58. Envolverte de resistencia al corte en Diorita.....	81
Figura 59. Envolverte de resistencia al corte en Pórfido	82
Figura 60. Envolverte de resistencia al corte en Chimenea Dacítica.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de rocas de acuerdo con su resistencia a la compresión (ISRM, 1978).	43
Tabla 2. Resumen de resultados de ángulo de fricción básico medido y ajustado.....	51
Tabla 3. Resultados ángulo de fricción básico para Andesita.	51
Tabla 4. Resultados ángulo de fricción básico para Intrusivo.	53
Tabla 5. Resultados ángulo de fricción básico para Intrusivo Duro.....	53
Tabla 6. Resultados de ángulo de fricción básico para Diorita.	54
Tabla 7. Resultados de ángulo de fricción básico para Pórfido.....	55
Tabla 8. Resultados de ángulo de fricción básico para Brechas.....	56
Tabla 9. Resultados de ángulo de fricción básico para Chimenea Dacítica.	57
Tabla 10. Resultados de ángulo de fricción básico para Chimenea Riolítica.....	58

Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos para JRC con peine de Barton para cada grupo litológico.	59
Tabla 12. Resultados de JRC para Andesita.	59
Tabla 13. Resultados de JRC para Intrusivo.	60
Tabla 14. Resultados de JRC para Intrusivo Duro.	60
Tabla 15. Resultados de JRC para Diorita.	62
Tabla 16. Resultados de JRC para Pórfido.	62
Tabla 17. Resultados de JRC para Chimenea Dacítica.	63
Tabla 18. Resumen de resultados de Rebote de Martillo de Schmidt de tipo N (R_N) y Rebote de Martillo de Schmidt de tipo L (R_L).	63
Tabla 19. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Andesita.	65
Tabla 20. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Intrusivo.	67
Tabla 21. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Intrusivo Duro.	68
Tabla 22. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Diorita.	69
Tabla 23. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Pórfido.	71
Tabla 24. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Chimenea Dacítica.	72
Tabla 25. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Andesita.	74
Tabla 26. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Intrusivo.	75
Tabla 27. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Intrusivo Duro.	76
Tabla 28. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Diorita.	77
Tabla 29. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Pórfido.	78
Tabla 30. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Chimenea Dacítica.	79

RESUMEN

En el Rajo don Luis en CODELCO-División Andina, el macizo rocoso está controlado por mecanismos de fallas tales como cuñas, fallamientos planos y volcamientos, por lo que se deben conocer los parámetros geotécnicos de éste para evitar posibles eventos geotécnicos.

En este estudio se utiliza el método de Barton Bandis, el cual es un criterio para conocer la resistencia al corte de las estructuras y se calculan los parámetros necesarios para emplearlo.

Se conoce el ángulo de fricción de cada una de las litologías de la mina mediante ensayos de *tilt test* en probetas de sondajes de distintos lugares del rajo. Se hace la prueba 5 veces en cada probeta, se grafica en un histograma de frecuencias y luego se obtienen medidas estadísticas de los valores. El valor utilizado en la ecuación de Barton Bandis es la mediana, ya que es lo recomendado por la ISRM (Alejano y otros, 2018).

Se definen las orientaciones preferenciales de las discontinuidades para las litologías características del rajo: Andesita, Intrusivo, Intrusivo Duro, Diorita, Pórfido y Chimenea Dacítica, y se mide la rugosidad de las discontinuidades (JRC) con un peine de Barton.

También se calcula el valor de la resistencia a la compresión uniaxial de las discontinuidades (JCS) utilizando el Martillo de Schmidt directamente en las discontinuidades en terreno de las litologías: Andesita, Intrusivo, Intrusivo Duro, Diorita, Pórfido y Chimenea Dacítica, para luego aplicar la fórmula de Deere y Miller (1966) y obtener el JCS. Con todos estos datos se construye un histograma de frecuencias y se calculan medidas estadísticas.

Además, se efectúan vuelos de detalle con dron, luego se procesa y se trabaja con estas imágenes en el programa *PointStudio 2022.0.1* con el fin de adquirir el valor del volumen y área de algunas de las cuñas presentes en las paredes de distinta litología, para calcular la tensión normal.

Con todos los datos mencionados anteriormente es posible aplicar el método de Barton Bandis y graficar la envolvente de resistencia al corte de las estructuras para cada litología.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del problema

En la minería a rajo abierto se debe evaluar la estabilidad del talud con el propósito de evitar accidentes que puedan afectar la seguridad de los trabajadores y la continuidad de los procesos mineros, para esto se deben analizar distintos parámetros geotécnicos y estructuras que puedan afectar al macizo rocoso y su estabilidad.

El rajo Don Luis de CODELCO-División Andina tiene ángulos interrampa de 58° (Equipo Geomecánica Minas Rajo y Subterránea, 2022), que son considerados dentro de los más agresivos en la minería, esto es posible por la alta competencia del macizo rocoso (Equipo Geomecánica Minas Rajo y Subterránea, 2022), sin embargo, independiente de la competencia de la roca, el macizo rocoso es frágil y está controlado por mecanismos de fallas que están asociados principalmente a control estructural, manifestándose por modos de cuñas, fallas planas y localmente volcamiento (Skarmeta y otros, 2017), por lo que se requiere conocer los parámetros geotécnicos del macizo rocoso. Estos parámetros deben ser analizados para poder reducir los riesgos asociados a un evento geotécnico no deseado. Estos análisis se realizarán a través del método de Barton Bandis.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar la envolvente de resistencia al corte de las discontinuidades en Rajo Don Luis a través del método de Barton Bandis.

1.2.2. Objetivos Específicos

Determinación de parámetros propios de Barton Bandis: ángulo de fricción, JRC, JCS y tensión normal.

1.3. Ubicación y accesos

El yacimiento Río Blanco-Los Bronces corresponde a un depósito tipo pórfido de Cu-Mo localizado en el sector de las nacientes del río Blanco y río San Francisco. La propiedad minera

se encuentra compartida entre la filial Sur Andes de Anglo American y División Andina de CODELCO Chile.

División Andina está ubicada en la alta cordillera de Los Andes entre los 3.070 y 4.000 m s.n.m., a 50 km al sureste de la comuna de Los Andes y a 55 km al noreste de Santiago. Se encuentra emplazada en el valle de Aconcagua, en la región de Valparaíso. División Andina incluye la mina subterránea Río Blanco y el rajo Don Luis (Figura 1).

El acceso a División Andina desde Los Andes es a través del camino Internacional (Ruta 60), en el km 30 se debe tomar la ruta E-767 con dirección a la localidad de Saladillo, donde a 32 km al sur de esta localidad está ubicado el rajo Don Luis.

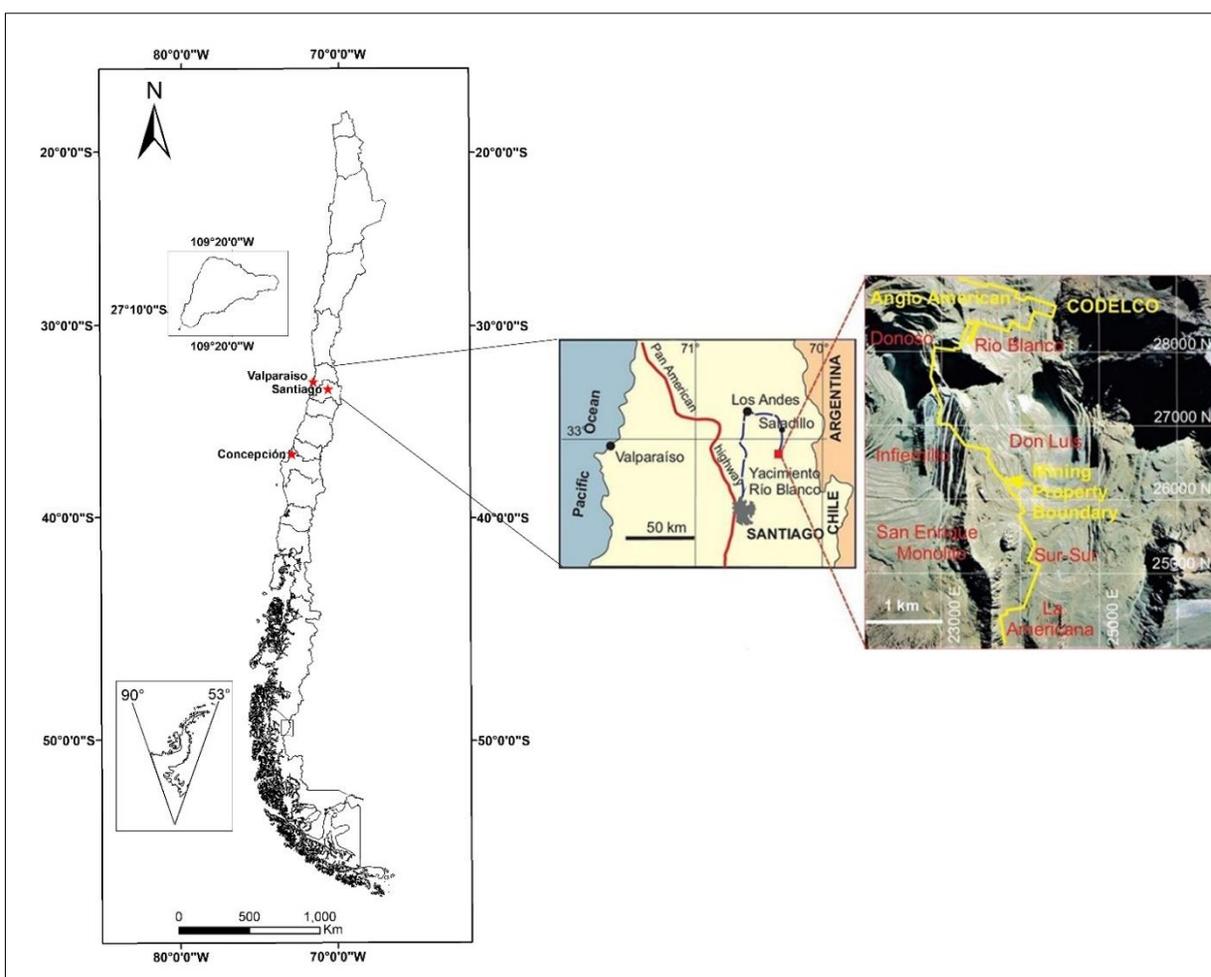


Figura 1. Mapa ubicación área de estudio.

1.4. Método de trabajo

Para el desarrollo de este trabajo se pueden determinar las siguientes etapas:

1.4.1. Etapa Gabinete I

- Consistió en la recopilación de información bibliográfica relacionada con el tema; método de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis, para la determinación de cada parámetro, además de buscar información del área para confeccionar el marco geológico y teórico de este estudio.
- Se filtran todos los datos de los sondajes de la campaña AGD quinquenio 2020-2024, para identificar a qué litología corresponde cada probeta de sondaje y seleccionar las que se utilizarán para realizar ensayos de inclinación o *tilt test*.

1.4.2. Etapa Terreno

- Se midieron las orientaciones de las discontinuidades de cada grupo litológico geotécnico con brújula estructural para determinar las orientaciones preferenciales con el fin de determinar con peine de Barton el coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (JRC) de las orientaciones en cada grupo litológico geotécnico.
- Se hicieron *tilt test* para conocer el ángulo de fricción básico de las discontinuidades, mediante pruebas con probetas de sondaje.
- Con un dron se mapearon las discontinuidades, con el fin de obtener el dato de tensión normal.
- Con el Martillo de Schmidt se determinó el número de rebotes del martillo de las discontinuidades en terreno.

1.4.3. Etapa Gabinete II

- Se determina el parámetro JRC mediante la comparación con la tabla de perfiles de rugosidad de Barton y Chubey (1977).
- Mediante ecuaciones de Deere y Miller (1966) se obtiene el valor de JCS con valores de rebote de Martillo de Schmidt obtenidos en terreno.
- Se calcula el parámetro de tensión normal con datos de tonelaje y área de cuñas entregados por el programa *PointStudio 2022.0.1* mediante análisis de imágenes de vuelo de dron.
- Con la integración de los resultados de todos los parámetros en la ecuación de Barton Bandis se grafica la envolvente de resistencia al corte.

1.5. Trabajos Anteriores

Los principales estudios relacionados con la geología del yacimiento Río Blanco se inician con el trabajo de Aguirre (1960) que estudia la geología de los Andes de Chile Central en la Provincia de Aconcagua y detallan Formación Farellones; en 1964 Vergara y Latorre definen el Complejo pliocénico Río Blanco, el cual incluye las unidades Chimenea Dacítica y Riolítica presentes en División Andina, y Blondel y otros (1989) describen el Complejo Subvolcánico Río Blanco, estudiando brechas, Chimenea Dacítica y Riolítica.

Frikken (2003) describe el yacimiento Río Blanco y los eventos de mineralización y alteración asociados al complejo de brechas hidrotermales; en el 2005 Deckart y otros efectuaron dataciones radiométricas mediante U/Pb en circones de las unidades intrusivas del yacimiento Río Blanco. Ese mismo año Frikken y otros (2005) estudian el complejo de brechas, su mineralización, alteración e inclusiones fluidas.

Toro y otros (2012) confeccionan un modelo de evolución magmática-hidrotermal y desarrollo del yacimiento Río Blanco-Los Bronces y el año 2017 Skarmeta y otros (2017) construyen el modelo de geología estructural, jerarquizando los distintos tipos de estructuras del yacimiento.

En CODELCO-División Andina el primer trabajo relacionado sobre resistencia al corte de estructuras y cálculo de parámetros es de Farias (2006), quién ejecutó un backanalysis para obtener parámetros de fricción y cohesión de estructuras en rajo Don Luis de Intrusivo Duro, Pórfido Don Luis y Brecha de Turmalina. Karzulovic (2007) realizó un estudio de resistencia al corte de estructuras para el proyecto de expansión de División Andina donde se hizo un backanalysis de estructuras y determinó parámetros de ángulo básico de fricción. El año 2019 Espinoza efectuó un nuevo backanalysis, mediante software SWEDGE con el fin de determinar los datos de cohesión y fricción en estructuras del Grupo Litológico Intrusivo, Intrusivo Duro y Diorita en rajo Don Luis, y recientemente, Hirsch (2022) obtuvo parámetros cohesión y fricción un backanalysis de inestabilidades con lo cual, recomienda utilizar método de Barton Bandis, debido a que la cohesión es baja.

1.6. Agradecimientos

Agradezco a la División Andina de CODELCO por permitirme desarrollar mi Memoria de Título, a la Superintendencia de Geomecánica por su gran recibimiento y por acogerme durante 6 meses. Especialmente a mi tutor Alejandro Espinoza que fue fundamental en el desarrollo de este trabajo, por su ayuda en terreno, en la obtención de datos y en todo ámbito; a Luis Quiñones por su guía, en especial en la parte teórica de esta memoria; a Rodrigo Calvo por su colaboración en terreno y con los levantamientos, que permitieron efectuar este trabajo y, además, por enseñarme a manejar un dron; a Alejandro Sat por la construcción del instrumento para medir los ángulos de fricción, por los desayunos, por la buena disposición y su amistad; a Christian Lagos por su apoyo con la teoría del Martillo de Schmidt y a Fernando Ortiz por su buen recibimiento y consejos. También agradezco a Cristian Santander, Felipe Hernández y Francisco Poblete. Además, a Geosinergía por facilitar el Martillo de Schmidt para el realizamiento de este trabajo y a los geólogos de Geosinergía, Diego y Nicolás, por ayudar con los levantamientos y procesamiento de los vuelos de dron. A la Superintendencia de Geología, en especial a Elinor Book por su simpatía y ayuda en ubicación de las probetas de sondaje.

Al profesor Ramiro Bonilla por aceptar ser el Profesor Patrocinante de esta Memoria y por su buena disposición, al profesor Luis Quinzio por su revisión minuciosa de este trabajo y al profesor Abraham González por aceptar ser parte de la comisión de revisión.

También agradezco a mis amigos Sebastián y Camila por el apoyo y a todos los compañeros que de alguna manera aportaron en el proceso de la carrera.

A mi familia, mi madre Ruth Isolina, mi hermano Pedro Tomás y mis abuelos Ruth María y José Sebastián por ser mi pilar fundamental, sin ellos nada de esto sería posible.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1. Rocas Estratificadas

2.1.1. Formación Río Colina

Definida por González (1963) en el valle del río Colina, e distribuye en Chile Central cerca del límite chileno-argentino como afloramientos discontinuos. Su base es desconocida (Thiele, 1980 y Mardones, 2019) y su techo es concordante con la Formación Río Damas (Thiele, 1980). Corresponde a una secuencia de calizas y lutitas calcáreas, lutitas fisibles, areniscas y conglomerados finos con intercalaciones de rocas volcánicas y presenta lentes de yeso. Su espesor es de 800 m (Thiele, 1980). Su ambiente es marino profundo, reductor, con variaciones rítmicas en el aporte sedimentario. En los niveles superiores el ambiente es más somero, esto se representa por la presencia de yeso (Mardones, 2019).

De acuerdo con los fósiles presentes en esta unidad se le asigna una edad Caloviano-Oxfordiano (Thiele, 1980; Álvarez y otros 1997). Se correlaciona con el Miembro Santa Helena de la Formación Nacientes del Teno (Klohn, 1960), con el miembro medio de la Formación Lagunillas (Aguirre, 1960) y con el miembro superior de la Formación Valle Grande (Groeber, 1946; González y Vergara, 1962).

2.1.2. Formación Río Damas

Klohn (1960) la definió en el valle del río Damas en la provincia de Colchagua, se distribuye a lo largo de la Cordillera de los Andes de Chile Central, como una franja elongada en dirección N-S según Thiele (1980). Sobreyace concordantemente al miembro superior de la Formación Nacientes del Teno (Klohn, 1960) y a la Formación Río Colina (González, 1963; Thiele 1980) e infrayace, concordantemente a la Formación Lo Valdés (González, 1963; Thiele, 1980; Calderón y otros, 2009). Está compuesta por conglomerados y brechas conglomerádicas, potentes intercalaciones de areniscas y limonitas, además de niveles de rocas volcánicas andesíticas, su espesor es de 3.000 m (Thiele, 1980). Su ambiente es continental, subaéreo y lacustre (Thiele, 1980).

Por sus relaciones de contacto se asigna una edad Kimmeridgiano (Thiele, 1980), no obstante, Rossel y otros (2014) extienden la edad al Titoniano tardío, en base a dataciones radiométricas en

circones detríticos efectuadas al techo de la secuencia. Se correlaciona con el miembro superior de Formación Lagunillas (Aguirre, 1960).

2.1.3. Formación Lo Valdés

Fue definida por González (1963) en la localidad homónima en el valle del río Volcán, tributario del Río Maipo. Se distribuye en Chile Central como una franja continua en dirección N-S a lo largo de la Cordillera Principal. Infrayace concordantemente a la Formación Río Damas (González, 1963) y a la Formación Colimapu (Thiele, 1980; Palma, 1991; Mardones, 2016). Sobreyace del mismo modo a la Formación Baños Morales (Salazar y Stinnesbeck, 2015). Litológicamente está constituida por fangolitas, lutitas y areniscas finas calcáreas, fosilíferas, con intercalaciones de rocas volcánicas basálticas y andesíticas, lutitas rojas y niveles de yeso. Su espesor aproximado es de 1.400 m (Thiele, 1980) y su ambiente es de plataforma estable, debido a que es una secuencia rica en calizas y, además, que hay ausencia de turbiditas y depositaciones sedimentarias líticas (Giambiagi y otros, 2002).

En base a fósiles de ammonites se le asigna una edad de Titoniano inferior a medio, hasta Hauteriviano (Biró, 1964; Tavera, 1968; Thiele, 1980; Hallam y otros, 1986). Su edad fue precisada a Titoniano superior-Hauteriviano superior por Salazar (2012) y Salazar y Stinnesbeck (2015). Se correlaciona con la Formación San José (Aguirre, 1960) y con la Formación Baños del Flaco (Klohn, 1960).

2.1.4. Formación Lo Prado

En el sur de la cuesta Lo Prado, Thomas (1958) define la Formación Lo Prado, que se encuentra también en sectores de cuesta Barriga, puntilla Peñaflor, al noroeste de Peñaflor y oeste de San Vicente de Naltagua (Sellés y Gana, 2001). Constituye, además, una franja continua desde el Túnel Lo Prado hasta la localidad de Cabildo (Boyce, 2015). Infrayace a la Formación Veta Negra concordantemente. Hacia el norte se encuentra intruida por granitoides de la Superunidad Illapel (Rivano y otros, 1993).

Su litología corresponde a tobas de lapilli que poseen fragmentos dacíticos y andesíticos, tobas cineríticas con esquirlas de vidrio y trozos de pómez colapsados, e intercalaciones de lavas

dacíticas y andesíticas de anfíbol y piroxeno, autobrechizadas, con niveles de rocas sedimentarias: calizas bioclásticas y areniscas sp. explosiva intermedia a ácida con carácter ignimbrítico (Sellés y Gana, 2001).

Se establece una edad máxima de Berriasiano debido a la su fauna fósil de *Argentiniceras malargüense* (Steuer), *Cuyaniceras acanthiolum* Leanza, *Favrella* sp., *Olcostephanus* sp., *Spiticeras* sp. y *Thurmaniceras* sp. (Piracés y MaksaeV, 1977). Otros autores la asignan específicamente al Berriasiano superior por la presencia de *Spiticeras* (*Kilianiceras*) sp. y *Cuyaniceras* sp. (Covacevich, 1975; Nasi y Thiele, 1982; Covacevich, 1994).

2.1.5. Formación Veta Negra

Definida por Thomas (1958), corresponde a una unidad volcánica y subvolcánica, que aflora principalmente en las cumbres más altas de la cordillera de la Costa, principalmente al sur del río Maipo. Se distribuye desde la cuesta La Dormida hasta Alto Lipangue, también en cerro Bustamante y en la zona al sur del yacimiento Lo Aguirre (Wall y otros, 1999). Sobreyace concordantemente la Formación Lo Prado y subyace, en discordancia a la Formación Las Chilcas (Thomas, 1958; Sellés y Gana, 2001). Veta Negra está cortada por intrusivos graníticos datados entre 91-96 Ma. (Wall y otros, 1999).

Thomas (1958) divide Formación Veta Negra en dos miembros: Miembro Purehue, con un espesor de 350 m y 2.000 m el cual se compone de lavas andesíticas, brechosas e intercalaciones de areniscas rojizas de grano grueso y escasos lentes calcáreos; y Miembro Ocoa, con un espesor de 2.500 m y 3.000, de rocas andesíticas porfídicas con grandes fenocristales de plagioclasas, por tener tamaños superiores a 1 cm se les denomina ocoítas. Su ambiente es continental, con intenso volcanismo subaéreo.

Se realizaron dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasa de un dique ocoítico en el yacimiento El Soldado (32°38'S), donde se obtuvo una edad $122,7 \pm 1,1$ Ma (Barremiano), que representa la edad del magmatismo ocoítico característico de la Formación Veta Negra (Boric y Munizaga, 1994). Además, mediante el método K-Ar en una muestra de andesita de esta Formación, de la

parte superior, se data en 110 ± 4 Ma, por lo que su edad mínima es Albiano (Saric y otros, 2003). Con estos datos se puede establecer su edad como Barremiano-Albiano.

2.1.6. Formación Las Chilcas

Definida por Thomas (1958) en la localidad homónima. Se distribuye en la Depresión Intermedia, al norte de la ciudad de Santiago. Sobreyace a la Formación Veta Negra en aparente concordancia (Thomas, 1958; Wall y otros, 1999) e infrayace a la Formación Lo Valle de manera discordante (Thomas, 1958; Piracés y Maksaevev, 1977; Wall y otros, 1999) y concordante (Godoy, 1981; Moscoso y otros, 1982), al sur del río Maipo está en discordancia angular sobre Formación Veta Negra y en discordancia de erosión bajo la Formación Abanico.

Secuencia volcánica y sedimentaria que tiene una gran variación de facies y que puede alcanzar 1.800 m de espesor (Sellés y Gana, 2001). Está compuesta por tobas riolíticas y domos los cuales representan facies de intracaldera (Sellés y Gana, 2001) además de areniscas y conglomerados con intercalaciones lenticulares carbonatadas marinas (Thomas, 1958), que dan cuenta de un ambiente de depositación principalmente aluvial de tipo proximal, posiblemente lacustre esporádico y marino de cuenca somera restringida (Sellés y Gana, 2001). En su parte superior hay coladas de lavas basálticas y andesíticas, flujos piroclásticos que corresponden a un sistema volcánico activo (Boyce, 2015).

Se asigna al Albiano-Campaniano, mediante dataciones U/Pb en circones de los niveles ígneos y sedimentarios de la Formación Las Chilcas, que arrojaron edades entre 105 y 82 Ma. La Formación Las Chilcas se correlaciona con la Formación Quebrada Marquesa debido a su similitud de facies (Thomas, 1958).

2.1.7. Formación Colimapu

Klohn (1960) define esta formación cuya localidad tipo se encuentra en la quebrada homónima, afluente del río Maipo. Se distribuye a lo largo de una franja elongada en dirección N-S, en la Cordillera Principal de Chile Central, desde el norte del río Colorado hasta el sur del río Volcán. Sobreyace en concordancia a la Formación Lo Valdés (Thiele, 1980) e infrayace discordantemente a la Formación Abanico (Charrier y otros, 2002).

Su litología corresponde a lutitas rojas, areniscas, conglomerados de matriz arenosa de color gris rojizo, lavas de composición andesítica y basáltica y calizas en capas lateralmente discontinuas, que alcanza espesores de hasta 2.000 m (Thiele, 1980; Vergara y Nyström, 1996). En la base su ambiente es continental, de abanico aluvial progradante, cercano a la costa, y hacia el techo sus facies son aluviales, pero de abanicos en retroceso (Mardones, 2019).

En base a su contenido fósil Martínez y Osorio (1963) la asignan al Albiano (Cretácico Inferior). Aguirre y otros (2009) con dataciones U-Pb obtienen la edad de 80 Ma, Campaniano (Cretácico Superior) similar a la obtenida por Tapia (2015) en rocas del techo de la Formación de $73,8 \pm 4,2$ (Campaniano-Maastrichtiano inferior), que corresponde a la edad mínima de esta unidad. Aguirre (1960) la correlaciona con la Formación Cristo Redentor.

2.1.7. Formación Lo Valle

Definida por Thomas (1958) en la quebrada del estero Los Valles, su límite inferior es una discordancia de erosión que la separa de la Formación Las Chilcas (Gana y Wall, 1997) y su techo es la actual superficie de erosión (Moscoso y otros, 1962). Además, está en contacto por la falla Chacabuco con la Formación Abanico.

Está compuesta principalmente por ignimbritas dacíticas, las que tienen un espesor variable de 5 a 10 m (Moscoso y otros, 1982). Entre Melipilla y laguna de Aculeo se reconoce una sección basal de conglomerados y areniscas, sobre esta se encuentran lavas andesíticas a riolíticas, ignimbritas y brechas con intercalaciones de tufitas y areniscas (Nasi y Thiele, 1982). La potencia de esta formación es de aproximadamente 3.500 m (Gana y Wall, 1997). El ambiente de depositación es continental, donde se produjo una actividad volcánica del tipo nube ardiente (Moscoso y otros, 1982).

La edad de esta formación es Campaniano superior-Maastrichtiano, esto en base a dataciones radiométricas K-Ar, que dieron edades de 77,8; 70,5; 64,6 Ma. (Drake y otros, 1976; Vergara y Drake, 1978, Moscoso y otros, 1982).

2.1.8. Formación Abanico

Fue nombrada por primera vez por Muñoz Cristi (En Hoffstetter y otros, 1957), pero definida formalmente por Aguirre (1960) en la provincia del Aconcagua. Se distribuye desde los 32°30' hasta los 36°S, abarcando casi una totalidad de la vertiente occidental de la Cordillera Principal (Tapia, 2015). Sobreyace discordantemente a la Formación Colimapu, en la zona del río Aconcagua (Aguirre, 1960), y concordantemente en la zona de cordillera al este de Santiago (Thiele, 1980). En el Valle Central está discordantemente sobre las formaciones Lo Valle y Las Chilcas (Gana y Wall, 1997; Sellés, 2000; Fuentes, 2004). Infrayace a la Formación Farellones, este contacto varía por lo que en sectores puede ser: pseudoconcordante, discordante o por falla (Godoy y otros, 1999; Charrier y otros, 2002).

Su litología corresponde a tobas andesíticas y brechas volcánicas con intercalación de lavas básicas a intermedias e intercalaciones sedimentarias continentales, que se acumularon durante la deformación extensional que dio origen a la Cuenca de Abanico (Charrier y otros, 2002). Tiene un espesor de 3.000 m (Thiele, 1980).

En base a dataciones radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se le asigna una edad de Eoceno superior a Mioceno inferior (Charrier y otros, 2002; Fock, 2005; Fock y otros, 2006). Se correlaciona con la Formación Coya-Machalí (Klohn, 1960; Thiele, 1980).

2.1.9. Formación Farellones

Propuesta por Muñoz Cristi (en Hoffstetter y otros, 1957) y definida formalmente por Klohn (1960). Se distribuye en Chile Central como una franja elongada en dirección N-S entre los afloramientos orientales y occidentales de la Formación Abanico. Sobreyace en discordancia a la Formación Abanico (Aguirre, 1960; Munizaga y Vicente, 1982) y su techo constituye la superficie de erosión actual (Thiele, 1980).

Consiste en una secuencia de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas (Thiele 1980). Rivano y otros (1990), distinguen dos miembros:

- Miembro Inferior: compuesto por tobas e ignimbritas riolíticas con intercalaciones delgadas de volcanitas. Su espesor es variable y puede alcanzar hasta más de 300 m.

- Miembro superior: está compuesto por lavas andesíticas y basálticas, con intercalaciones de tobas y aglomerados andesíticos. Tiene un espesor máximo mayor a 1.500 m.

Dataciones radiométricas que fueron efectuadas en la parte basal del miembro inferior indican una edad de 18-15 Ma (Rivano y otros, 1990), que corresponde al Mioceno inferior a medio. Beccar y otros (1986) y Rivano y otros (1990) incluyen a la Formación Colorado-La Parva como parte de la Formación Farellones debido a dataciones K/Ar realizadas. Se correlaciona cronológicamente con las formaciones Palaoco, Contreras, Conglomerados de Tunuyán y Agua de la Piedra en Argentina (Sruoga y otros, 2000; Giambiagi y otros, 2001). Además, se puede correlacionar con la Formación Malla-Malla en la Región del Biobío (Thiele, 1980).

2.2. Rocas Intrusivas

2.2.1. Plutón Río Blanco-San Francisco

Thiele (1980) lo denominó Unidad Intrusiva I y Cepeda (1974) como Plutón Disputada. Luego Stambuk y otros (1982) lo definieron como Plutón Río Blanco-San Francisco, está asociado al Batolito San Francisco, este batolito es el cuerpo de mayor extensión en el área, abarcando 200 km² (Serrano y otros, 1996). El Plutón Río Blanco-San Francisco intruye a la Formación Farellones (López y Vergara, 1982; Warnaars y otros, 1985).

El Plutón se compone de distintas litologías; diorita, granodiorita, monzonita cuarcífera y monzodiorita cuarcífera (Serrano y otros, 1996), además de sienitas cuarcíferas y diques aplíticos en menor medida (Skewes y Holmgren, 1993).

Se distinguen tres eventos magmáticos principales en el Plutón Río Blanco-San Francisco (López y Vergara, 1982) de los cuales se obtuvieron edades mediante U/PB de 11,96±0,4 Ma en granodiorita Río Blanco, 8,4±0,23 Ma en granodiorita Cascada y 8,16±0,45 Ma en diorita (Deckart y otros, 2005). En conjunto con su relación de contacto con la Formación Farellones, se asigna edad Mioceno a esta unidad.

2.2.2. Cuerpos subvolcánicos

Definido como Unidad Intrusiva II (Thiele, 1980), corresponde a intrusivos de poca extensión tales como; stocks, lacolitos, diques, filones-manto y chimeneas volcánicas. Intruyen a Formación Farellones y al Plutón Río Blanco-San Francisco.

Su litología comprende monzodioritas, monzonitas, pórfidos cuarzofeldespáticos, pórfidos dacíticos, dacitas, riolitas y riodacitas (Rivano, 1995). Dataciones U/Pb en circones en Río Blanco indican edades de $6,32 \pm 0,09$ Ma para el Pórfido Cuarzomonzonítico, $5,84 \pm 0,03$ Ma para el Pórfido Feldespático y $5,23 \pm 0,07$ Ma para el Pórfido Don Luis (Deckart y otros, 2005).

Los pórfidos de esta unidad están genética y espacialmente relacionados con la mineralización de Cu-Mo en el yacimiento de Río Blanco-Los Bronces.

2.3. Cuaternario

2.3.1. Unidad Volcánica Antigua

Thiele y Katsui (1969), define a una serie de esqueletos de volcanes extinguidos, formados principalmente por coladas andesíticas y tranquiandesíticas que se distribuyen a lo largo del límite fronterizo entre Chile y Argentina, especialmente en las partes más altas de las cumbres de Chile Central, en el Volcán Tupungato (6.550 m), Cerro Marmolejo (6.150 m) y cordón del Cerro Castillo (5.485 m) (Thiele, 1980; Fock, 2005).

La unidad volcánica no presenta en superficie fallas de importancia regional y aparece sellando a todas las estructuras de pliegues y fallas fini-miocenas que caracterizan a la región, y está erosionada por actividad glaciar, por lo que se le asigna una edad Pleistoceno (Thiele, 1980).

2.3.2. Ignimbrita Pudahuel

Definida por Polanski (1962) como Ignimbrita Pudahuel. Está asociada al complejo volcánico Maipo y se encuentra distribuida en Argentina en los valles de los ríos Yaucha y Papagayos y en Chile en los ríos Maipo y Cachapoal. Se encuentra cortada por el escarpe fluvial más alto del río Maipo. Además, en algunos sectores está cubriendo rocas mesozoicas, así como en otras zonas está cubierta por depósitos aluviales y de quebrada (Godoy y otros, 2009).

Constituida por un depósito de flujo piroclástico de ceniza y lapilli pumíceo de composición riolítica (Stern y otros, 1984). Puede alcanzar espesores de 10 m. Representa las facies distales de los productos de la erupción explosiva de la Caldera Diamante del Complejo Volcánico Maipo.

Mediante el método de trazas de fisión en circones de pómez, se obtuvo una edad de 450.000 ± 60.000 años (Stern y otros, 1984). Luego estudios cronológicos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita contenida en las pómez, dieron $2,3 \pm 0,3$ Ma y $2,2 \pm 0,3$ Ma y una isócrona inversa de $1,4 \pm 0,8$ Ma (Wall y otros, 2001). Lo que corresponde a una edad máxima Pleistoceno Inferior para estos depósitos.

2.3.3. Unidad Volcánica Nueva

Thiele y Katsui (1969) incluyen en esta unidad a los volcanes que han tenido actividad histórica. Está sobre la Unidad Volcánica Antigua y, se pueden destacar, el volcán Tupungatito (5.640 m s.n.m) y el volcán San José (5.880 m s.n.m) que están sobre el volcán Tupungato y cerro Marmolejo, respectivamente.

Los volcanes de esta unidad se componen de coladas andesíticas frescas, con intercalaciones de mantos de brechas y piroclásticos menores, tales como: bombas, lapilli y cenizas. Son de colores predominantemente oscuros y las estructuras volcánicas tienen formas cónicas bien definidas, con profundas depresiones en sus cumbres y cráteres en sus centros (Thiele, 1980).

Se les asigna una edad Holoceno, debido a que las coladas no aparecen afectadas por fallas menores como las reconocidas en la Unidad Volcánica Antigua (Thiele, 1980).

2.4. Depósitos no consolidados

En el área de estudio los depósitos no consolidados fueron agrupados por Thiele (1980) como:

2.3.1. Depósitos gravitacionales

Reconocidos en toda el área, los más importantes son aquellos productos de la reptación del suelo y talud, se reconocen además flujos y avalancha de rocas, estos producen acumulaciones

detríticas importantes en la base de las pendientes suaves y en las pendientes fuertes (Thiele, 1980).

2.3.2. Depósitos glaciares

Consisten esencialmente en morrenas marginales y acumulaciones de detritos provenientes de glaciares de roca, se ubican en circos o nichos de las altas cumbres. Este tipo de depósitos se encuentra sobre los 2.500 m s.n.m. rellenando las cabeceras de los esteros (Thiele, 1980).

2.3.3. Depósitos fluviales, fluvioglaciares y aluviales

Los depósitos asociados con el relleno de la Depresión Central son los más importantes, también destacan los que rellenan los valles interiores de la región, donde uno de los de mayor importancia son los que forman los niveles de terrazas en el valle del río Maipo, los cuales están constituidos por fragmentos de rocas mal seleccionados, cuyo tamaño varía desde bloques y gravas, a arenas, limos y arcillas. Bajo los 1.500 m s.n.m los depósitos glaciofluviales pasan a fluviales (Thiele, 1980).

2.3.4. Depósitos lacustres

Son depósitos de grano fino, de limos y arcillas, finamente laminados. Tienen dimensiones reducidas, se acumulan en los lagos que se forman detrás de algunas morrenas frontales o depósitos producidos por desmoronamientos en los ríos Colina, Colorado, Maipo y Yeso. Thiele (1980) incluye en esta unidad depósitos de ceniza volcánica que es posible encontrar en numerosos valles. Estos depósitos de ceniza volcánica son relacionados a la actividad del volcán Maipo, concretamente a un episodio volcánico ocurrido hace 450.000 ± 60.000 años (Stern y otros, 1984).

2.4. Geología Estructural

El área de estudio se caracteriza porque por ella pasa la falla Pucuro, la cual fue definida por Aguirre (1960), corresponde a una falla antigua con evidencia de distintas etapas de actividad (Gana y Wall, 1997). Carter y Aguirre (1965) la describen como una faja de rocas milonitizadas de varias decenas de metros de espesor y fallas subparalelas. Esta estructura está entre los 31°S y 34°S, tiene un espesor entre los 500 m y los 2 km y un área de influencia que puede llegar hasta

los 6 km (Rivano y otros, 1996). Campbell (2005) indica que esta falla corresponde a un sistema de fallas de alto ángulo con rumbo NS a N20°W y fallas asociadas con un rumbo N50°W y N30°-60°E. Esta falla habría estado activa desde el Triásico (Aguirre, 1960) hasta la inversión de la cuenca Abanico (Mioceno inferior) mediante una reactivación de fallas de alto ángulo con movimientos de vergencia al oeste y rumbo dextral (Campbell, 2005; Machuca, 2017).

La falla Infiernillo cuya traza se reconoce en la quebrada Infiernillo, al este de Cuesta Chacabuco, tiene 12 km de largo (Aguirre, 1960), con rumbo N10°E y manteo de 80°E (Fock, 2005). Esta falla es normal y posteriormente sufrió inversión, este proceso se relaciona a la inversión de la cuenca de Abanico (Fock y otros, 2006) y habría correspondido al límite occidental de la cuenca (Fock y otros, 2006; Risetto, 2015; Machuca, 2017).

En el sector oriental del área se caracteriza por 2 direcciones principales de la deformación: NS y NNW-SSE, donde la orientación NS estaría asociada a la reactivación de fallas normales del Oligoceno-Mioceno inferior, y la orientación NS-NW estaría asociada a la deformación fuera de secuencia de las fajas plegadas y corridas de La Ramada y de Aconcagua (Jara, 2013). Piquer y otros (2015) reconocen la falla Alto del Juncal y la falla El Fierro (Figura 2), como el borde oriental de la cuenca de Abanico. Además identifican estructuras NS, NW-SE y NE-SW en la zona de estudio, donde la cuenca estaría dominada por fallas con rumbos NW-SW y NE-SW oblicuas al eje NS del arco magmático lo que ocasiona patrones de interferencia complejos entre fallas de alto ángulo, las cuales crearían zonas de debilidad reactivadas, heredadas de estructuras antiguas, creando zonas de daño cortical las que estarían estrechamente relacionadas con el emplazamiento de pórfidos y otros cuerpos intrusivos en la región (Piquer y otros, 2015).

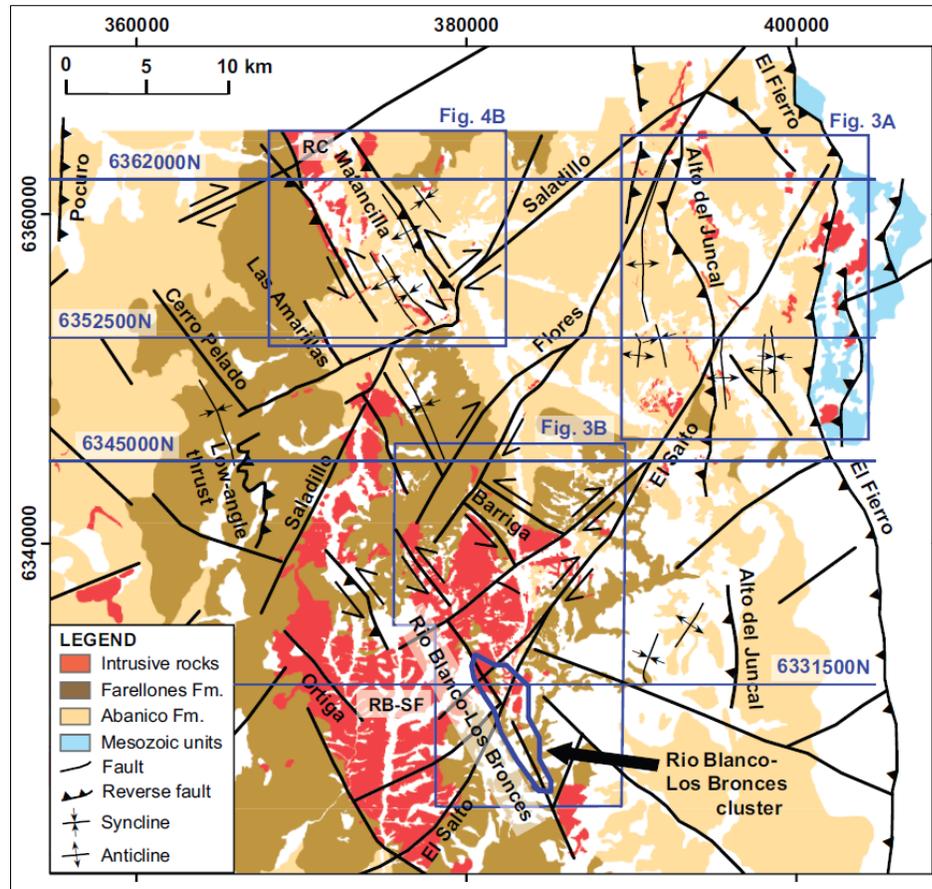


Figura 2. Mapa geológico simplificado del área de estudio con los principales sistemas de fallas y tendencia de pliegues. RB-SF: Batolito Río Blanco-San Francisco. Extraído de Piquer y otros (2015).

3. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL

3.1. Evolución tectónica

3.1.1. Eoceno tardío a Mioceno temprano: cuencas de extensión e intraarco

Este período se caracterizó por una extensión EW, donde se formó la cuenca de intra-arco Abanico, la cual se desarrolló en una corteza continental delgada (30-35 km) (Kurtz y otros, 1995), donde se depositaron hasta 5 km de rocas volcánicas (Formación Abanico) entre los 34 a 22 Ma (Piquer y otros, 2016). Las fallas que delimitaban el margen de la cuenca (fallas Pocuro-Infiernillo y Alto del Juncal) tenían rumbo NS. Dentro de esta cuenca existían subcuencas delimitadas por fallas normales de rumbo NW y NE.

3.1.2. Mioceno temprano a Plioceno temprano: inversión tectónica, plutonismo y pórfidos

Las fallas extensionales intracuenca de alto ángulo N35°W y N40°E de la cuenca Abanico se reactivaron con desplazamiento de rumbo sinistral y dextral respectivamente. Ocurrió también un movimiento con desplazamiento en el manto inverso, que está localmente asociado a un intenso plegamiento de formaciones Abanico y Farellones. Las fallas del margen de la cuenca que tenían rumbo NS (fallas Pocuro-Infiernillo y Alto del Juncal) se reactivaron como fallas inversas. La reactivación de fallas normales preexistente con distintas orientaciones produjo la arquitectura estructural que existe actualmente, donde las subcuencas están delimitadas por fallas de alto ángulo, cada una con su propio espesor de facies volcanosedimentarias, intensidad de plegamiento y nivel de exhumación. La inversión tectónica fue coetánea con la depositación de la Formación Farellones, la cual cubre un área superficial menor que la Formación Abanico y tiene un espesor menor de 1,5 km. Las capas basales de la Formación Farellones cubren a la Formación Abanico en discordancia progresiva (Piquer y otros, 2016).

El inicio de la actividad plutónica fue coetáneo con el vulcanismo de la Formación Farellones y la inversión tectónica de la Cuenca Abanico.

Los plutones más jóvenes en el distrito corresponden a cuerpos granodioríticos expuestos en los valles de los ríos Colorado su edad se midió con U-Pb zircón, $21,76 \pm 0,53$ Ma (Piquer y otros, 2015) y San Francisco con K-Ar; $20,1 \pm 2,0$ Ma (Mioceno inferior) (Warnaars y otros, 1985). El

magmatismo terminó con el emplazamiento de pórfidos y diatremas riolíticos datados en U-Pb; 4,69 Ma (Deckart y otros, 2013). Las unidades entre 20,1 (Mioceno inferior) y 8,16 Ma (Mioceno superior) son rocas plutónicas equigranulares, mientras que aquellas con edades entre 7,12 (Mioceno superior) y 4,69 (Plioceno inferior) Ma son rocas subvolcánicas directamente asociadas a la actividad hidrotermal y la mineralización (Deckart y otros, 2005, 2013).

3.2. Franja metalogénica

Río Blanco-Los Bronces es un pórfido de Cu-Mo, que se encuentra en la franja metalogénica del Mioceno Superior-Plioceno temprano (Figura 3), la cual se ubica en los Andes centrales, entre los 32° y 34° latitud sur. Se formó entre los 6,46 y 4,37 Ma (Deckart y otros, 2005; Maksaev y otros, 2004), es decir entre el Mesiniano y el Zanciano. En esta franja, además, se encuentran otros pórfidos de Cu-Mo como El Teniente y Los Pelambres, por lo que esta franja es considerada como el segundo cinturón metalogénico más importante de Chile (COCHILCO, 2016).

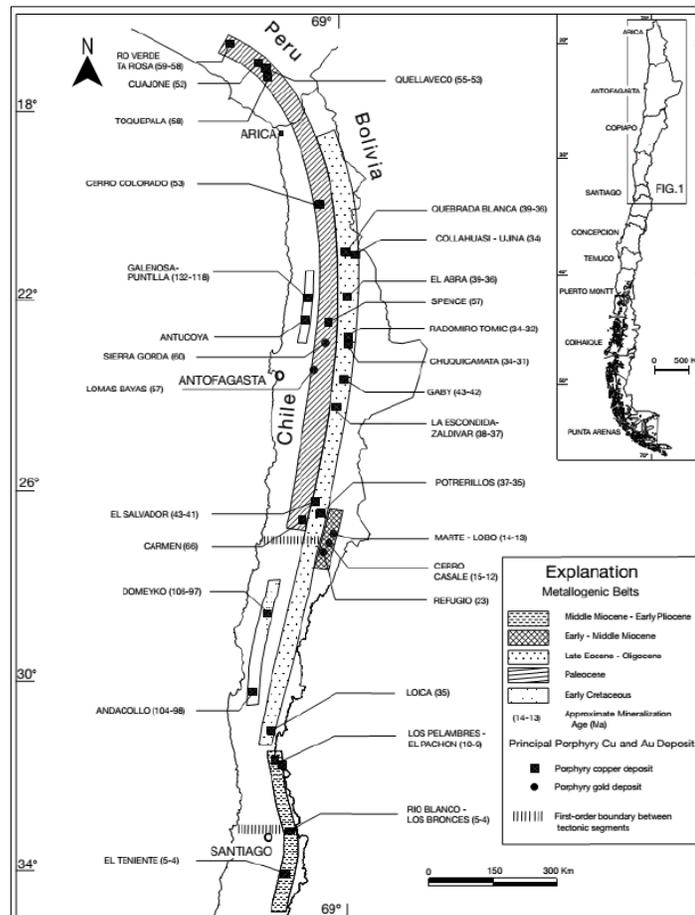


Figura 3. Franjas metalogénicas del norte de Chile

3.3. Grupos Litológicos Geotécnicos

Para efectos de esta investigación las unidades litológicas presentes en el área de estudio se agruparán de acuerdo con los Grupos Litológicos Geotécnicos (Figura 4) que han sido definidos por SGEOM, donde se agrupan las unidades litológicas en base a similar comportamiento y propiedades de resistencia.

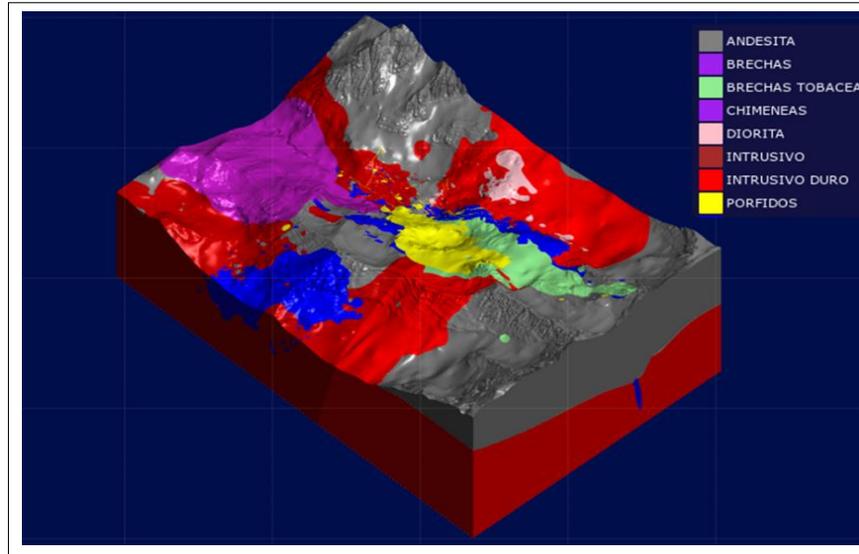


Figura 4. Grupos litológicos geotécnicos y su ubicación en el área de estudio.

3.3.1. Grupo Andesita: Andesitas (AND)

Es la unidad más antigua que hay en el yacimiento, pertenece a la Formación Farellones, específicamente al miembro intermedio (Piquer, 2010). Se distribuye en sector centro norte de San Luis. Se dispone en forma subhorizontal. Es intruida por Granodiorita Río Blanco y Granodiorita Cascada por lo que constituyen un *roof pendant* (Vergara y Latorre, 1984). Está intensamente fracturada.

Son rocas de textura afanítica a porfídica, de color gris oscuro a negro con escasos cristales de plagioclasa. Es posible encontrarla como fragmentos en las brechas del Complejo de Brechas Río Blanco. Está parcial a totalmente alterada a cuarzosericita, biotita, clorita y/o epidota (Serrano y otros, 1996).

Tienen una edad U/Pb de $17,2 \pm 0,05$ Ma (Mioceno inferior) en el sector de Río Blanco, mientras que en Don Luis se le asigna edad de $16,77 \pm 0,25$ Ma (Mioceno inferior) (Deckart y otros, 2005).

3.3.2. Grupo Intrusivo: Granodiorita Río Blanco (GDRB)

Se distribuye a lo largo de todo el yacimiento, con una disposición subvertical y elongada con orientación preferencial NW-SE en río Blanco y NS en el sector de Don Luis y Sur Sur. Está relacionada con el Plutón Río Blanco-San Francisco e intruye en contacto irregular a las andesitas de Formación Farellones, además está cortada por pórfidos tempranos a tardíos, por el Complejo de Brechas de Río Blanco y por las Chimeneas Dacítica y Riolítica (Maldonado y otros, 2014).

Son rocas de textura fanerítica de grano grueso a medio con composición que varía desde granodiorita a tonalita. Con gran abundancia de ortoclasa y plagioclasa (Albita-Andesina) (Frikken, 2003). Mediante dataciones U/Pb se le asigna una edad de $11,96 \pm 0,40$ Ma (Mioceno) (Deckart y otros, 2005).

3.3.3. Grupo Intrusivo Duro: Granodiorita Cascada (GDCC)

Es la unidad de mayor distribución en el sector del rajo Sur Sur, además se encuentra en el sector sur de Don Luis. Constituye la roca de caja de casi todas las demás litologías. Intruye a la Granodiorita Río Blanco.

Está relacionada al Plutón Río Blanco-San Francisco. Además de granodioritas agrupa rocas como monzodioritas, monzonitas cuarcíferas, aplitas y otros granitoides (Maldonado y otros, 2014), que tienen textura fanerítica hipiodomórfica y tamaño de grano medio, localmente puede haber variaciones de tamaño lo que le da una apariencia porfídica a la roca (Hermosilla, 2015), su tamaño de grano es más fino que el de la Granodiorita Río Blanco y contiene plagioclasas ricas en calcio (oligoclasa-andesina) (Stambuk y otros, 1988). Mediante dataciones U/Pb se obtiene una edad de $8,4 \pm 0,23$ Ma (Mioceno superior) (Deckart y otros, 2005).

3.3.4. Grupo Diorita: Diorita (DIOR)

Se distribuye en el sector sur oriental del yacimiento, tiene forma de cuerpos tabulares subverticales con potencias de 60 m, los cuales se interdigitan con Granodiorita Cascada.

Son rocas faneríticas, con textura hipidiomórfica de grano fino a medio, su composición varía entre diorita a cuarzo-diorita, posee tono verde oscuro a negro debido a la abundancia de

minerales máficos que presenta (Hermosilla, 2015). Localmente es posible reconocer minerales máficos con orientación incipiente (Maldonado y otros, 2014).

Está asociada con el Plutón San Francisco y está estrechamente relacionada en edad y espacialidad con Granodiorita Cascada (Maldonado y otros, 2014). Según Deckart y otros (2005), su edad es de $8,16 \pm 0,45$ Ma y $8,84 \pm 0,05$ Ma (Mioceno superior), luego Deckart y otros (2013) indican que la edad obtenida mediante datación radiométrica U/Pb de circones en el Sector Don Luis es de $8,76 \pm 0,23$ Ma (Mioceno superior) y que, además, la edad de intrusión está entre el rango de edades de 8,8 y 8,2 Ma (Mioceno superior).

3.3.5. Grupo Pórfido

3.3.5.1. Pórfido Dacítico a Cuarzomonzonítico (PQM)

Grupo de rocas porfídicas de variada composición, generalmente los diques están orientados N27°W (Frikken, 2003), los cuales son cortados por el Complejo de Brechas de Río Blanco. Las rocas de esta unidad son subverticales e intruyen a granodioritas y andesitas, además son intruidos por el pórfido feldespático.

Su composición varía desde dacítica a cuarzomonzonítica. Está compuesto de fenocristales de plagioclasa (30-50%), cuarzo (5-10%) y feldespato potásico (0-15%) y biotita y/o anfíbol (1-5%). Su masa fundamental es afanítica a microfanerítica felsítica de tonos grises blanco a rosado (Maldonado y otros, 2014)

La edad de este pórfido basado en dataciones radiométricas K/Ar, Ar/Ar es de 5,2 Ma (Plioceno) (Serrano, 1996) y $6,64 \pm 0,38$ Ma (Mioceno) (Maldonado y otros, 2014). Además, en dataciones U-Pb sería de $6,32 \pm 0,09$ Ma (Mioceno) (Deckart y otros, 2005) y de $6,45 \pm 0,15$ Ma (Mioceno) en sector Don Luis (Deckart y otros, 2013).

3.3.5.2. Pórfido Feldespático (Pfeld)

Su distribución es escasa en el sector Río Blanco, se dispone como pequeños filones subverticales que tienen potencias menores a 10 m y tienen una orientación N30°W (Stambuk y otros, 1982).

Intruye a Granodiorita Cascada y al Pórfido Cuarzomonzonítico, corta al Complejo de Brecha de Río Blanco y además es contemporáneo con el Pórfido don Luis (Maldonado y otros, 2014).

Presenta una textura porfídica de tono gris a pardo verdoso. Sus fenocristales son de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, y biotita primaria (Frikken, 2003). La masa fundamental está compuesta principalmente de plagioclasa. La edad en el sistema $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita en el sector Río Blanco es de $5,12 \pm 0,07$ Ma (Plioceno) y U-Pb es de $5,84 \pm 0,03$ Ma (Mioceno) (Deckart y otros, 2005). El rango de edad de la intrusión va desde 5,8 a 5,2 Ma (Mioceno-Plioceno) (Deckart y otros, 2013).

3.3.5.3. Pórfido Don Luis (PDL)

Unidad de gran extensión que se distribuye por todo el sector Don Luis. Se encuentran diques con orientación NW y NNE. Tiene una potencia de 500 m., en profundidad y puede aparecer hasta la cota 2.500 m., su extensión mínima en la vertical es de 1.500 m. (Hermosilla, 2015). Posee una forma de cono invertido.

Corresponde a una roca porfídica de composición dacítica con presencia de fenocristales de plagioclasa de hasta 7 mm, cristales poikilíticos de ortoclasa, ojos de cuarzo de hasta 5 mm y cristales pequeños de biotita. Su masa fundamental es microcristalina y está compuesta de ortoclasa muy fina y cuarzo (Maldonado y otros, 2014).

Mediante dataciones U/Pb en circones se obtiene una edad de $5,23 \pm 0,07$ Ma (Deckart y otros, 2005), Bertens y Hermosilla (2010) obtuvieron nuevas edades U/Pb en circones por el método CA-TIMS, entre los $5,35 \pm 0,02$ Ma, $5,16 \pm 0,04$ Ma y $5,02 \pm 0,13$ Ma. Toro y otros (2012) le asignan una edad U/Pb de $5,16 \pm 0,04$ Ma (Plioceno inferior)

3.3.6. Grupo Brecha

3.3.6.1. Brechas de Matriz Clástica o Polvo de Roca (BxPr)

Se encuentra en el sector Río Blanco y Don Luis. Son aquellas brechas que en su matriz hay una dominancia de material clástico, además está formada por fragmentos de cristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y localmente minerales máficos (Maldonado y otros, 2014).

Pueden ser monomícticas a polimícticas, con fragmentos de granitoides, pórfidos dacíticos, andesitas y brechas de turmalina (Maldonado y otros, 2014).

3.3.6.2. Brecha de Matriz Turmalina (BxT)

Se localiza en la parte central del sector Río Blanco y en Sur-Sur hospedada por Granodiorita Cascada (Stambuk y otros, 1982; Frikken, 2003).

Brecha monomíctica que presenta fragmentos de granodiorita (Frikken, 2003), cuya matriz está compuesta principalmente por turmalina y polvo de roca. (Maldonado y otros, 2014). Además, contiene sulfatos (anhidrita, yeso), cuarzo, magnetita, especularita y biotita (Frikken, 2003).

Mediante K/Ar se determinó una edad de 7,1-5,1 Ma (Mioceno-Plioceno) (Serrano y otros, 1996).

3.3.6.3. Brecha de matriz Biotítica (Bxbt)

Brechas en las cuales su matriz está compuesta principalmente por biotita y polvo de roca el cual puede estar recristalizado. Contiene fragmentos de granodiorita, andesitas y en menor proporción pórfidos dacíticos y rocas aplíticas (Maldonado y otros, 2014).

3.3.6.4. Brecha de matriz Feldespática (Bxfk)

Es posible hallarla en los sectores Río Blanco y Don Luis. Son aquellas brechas cuya componente principal en la matriz es feldespato potásico y cuarzo. Son brechas de aspecto difuso debido a una recristalización de la matriz, por lo que resulta difícil de diferenciar la parte clástica de los fragmentos (Maldonado y otros, 2014).

Dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en feldespato potásico de la matriz de la brecha entrega una edad de $4,79 \pm 0,03$ Ma (Deckart y otros, 2005) y otra de $4,82 \pm 0,05$ Ma (Plioceno inferior) (Skewes y Stern, 1997), sin embargo, se sugiere que estas edades no son representativas debido a un reinicio parcial o total del sistema Ar/Ar por la intrusión de cuerpos a temperaturas sobre los 300°C (Deckart y otros, 2005).

3.3.6.5. Brecha de matriz de Especularita-Anhidrita (BxHm-Anh)

Se distribuyen en el sector oriental bajo la Chimenea Riolítica (CHRIOL). Sus potencias son menores a 20 m.

Se caracterizan por una matriz de especularita-anhidrita que afecta a granodioritas, pórfidos dacíticos y parcialmente a la Chimenea Dacítica (CHDAC). Es posterior a la Chimenea Dacítica y anterior a la Chimenea Riolítica (Maldonado y otros, 2014).

3.3.6.6. Brecha Tobácea (BXTO)

Se localizan en Sur Sur como un cuerpo elongado con orientación NS. Corta a la Brecha de Turmalina en su sector oriental. En su sector occidental ocurre una transición a la Brecha Monolito, lo que se caracteriza por un aumento paulatino de cloritización. Cortan al Pórfido Don Luis (PDL) (Maldonado y otros, 2014).

Estas brechas se componen de clastos polimícticos redondeados de andesita, pórfidos dacíticos y andesíticos, granodiorita Cascada (GDCC), Pórfido don Luis (PDL) y de Brecha de Turmalina (BxT) y Brecha Monolito (BxMN) (Frikken, 2003). Además de una matriz de aspecto tobáceo conformada por polvo de roca predominantemente, polvo de roca turmalinizado y cuarzo principalmente (Suazo, 2010).

No existen dataciones radiométricas para determinar la edad de la Brecha Tobácea (Frikken, 2003).

3.3.6.7. Brecha Tobácea de Turmalina (BXTTO)

Cuerpos filonianos que intruyen a todas las otras unidades que existen en el área de estudio mediante numerosos diques (Frikken, 2003).

Brechas que se caracterizan por ser matriz soportada con clastos polimícticos redondeados e intensamente alterados, con textura obliterada (Frikken, 2003) en una matriz de aspecto tobáceo conformada por polvo de roca turmalinizado. El cemento está compuesto principalmente por turmalina, con sulfuros de cobre y hierro, cuarzo, magnetita con trazas de clorita y siderita en

menores proporciones (Stambuk y otros, 1988). En los sectores con mayor cantidad de turmalina hay una gran cantidad de pequeñas cavidades originando una textura microporosa (Maldonado y otros, 2014). Contiene sulfuros de cobre y hierro en cantidades muy bajas (Stambuk y otros, 1985).

Tiene una edad de 5,2 Ma (Plioceno inferior) obtenida con K/AR (Serrano y otros, 1996). Basándose en su contenido de clastos, este tipo de brecha se formó después de la Brecha Tobácea, Brecha Monolito y Pórfido Don Luis (Frikken, 2003).

3.3.6.8. Brecha Monolito (BXMN)

Se distribuye en el sector oeste de Sur-Sur, donde limita al norte y al oeste con el Pórfido Don Luis, corresponde a un cuerpo de 840 m de largo con anchos de hasta 300 m. Corta sin orientación definida al este de la BXTO (Frikken, 2003).

Brecha polimíctica con fragmentos subredondeados de Andesita, Granodiorita Cascada, Brecha de Turmalina (BXT), Pórfido Feldespático y Pórfido Don Luis. Además, presenta una abundante matriz, constituida principalmente por polvo de roca, biotita y turmalina (Maldonado y otros, 2014). Tiene un color característico gris verdoso debido a la cloritización (Vargas y otros, 1999). Es una roca estéril en cuanto a cobre y molibdeno (Stambuk y otros, 1985). Contiene <0,5% de cobre.

Tiene una edad 5,2 Ma (Plioceno inferior), determinada mediante K/Ar (Serrano, 1996). Este tipo de brecha se formó después que la Brecha de Turmalina, Pórfido Feldespático y Pórfido Don Luis, basándose en los clastos que la componen (Frikken, 2003).

3.3.7. Grupo Chimeneas

3.3.7.1. Chimenea Dacítica (CHDAC-BXCHDAC)

Cuerpo subvolcánico con forma de cono invertido (Frikken, 2003) el cual aflora entre el Pórfido Don Luis y Chimenea Riolítica. Corta a andesitas, granodioritas, pórfidos dacíticos y brechas. Además, es cortada por la Chimenea Riolítica.

Rocas faneríticas con características fluidales, con naturaleza localmente clástica. Está constituida por un pórfido brechizado de composición dacítica con estructuras de bandeamiento (Stambuk y otros, 1982). La edad de esta unidad en el sistema U/Pb en circones es de $4,92 \pm 0,09$ Ma (Deckart y otros, 2005).

3.3.7.2. Chimenea Riolítica (CHRIOL-BXCHRIOL)

La Chimenea Riolítica corresponde a un conjunto de cuerpos de composición riolítica cuyas diferencias texturales se relacionan con un origen subvolcánico efusivo como también ígneo intrusivo. Afloran en la parte norte del yacimiento.

Es la unidad más joven, el emplazamiento de esta unidad da como resultado la destrucción de zonas mineralizadas (Serrano y otros, 1996). Esta chimenea corta a la chimenea dacítica, a las granodioritas, andesitas y pórfidos dacíticos (Maldonado y otros, 2014). Esta unidad fue datada mediante el método K/Ar en biotita magmática, donde se obtuvo un rango de edad entre 4,9 y 3,9 Ma (Plioceno inferior) (Serrano y otros, 1996) y Deckart y otros (2005) le asignaron una edad de $4,03 \pm 0,19$ (Plioceno inferior).

3.4. Mineralización y alteración

En el yacimiento es posible encontrar 7 tipos de alteraciones principales (Figura 5) las cuales han sido definidas por Díaz y Solé (2014):

3.4.1. Alteración Biotítica de fondo (FBt)

La textura original de la roca se encuentra preservada, sin embargo, tanto biotita como anfíboles son reemplazados por biotita secundaria en distintos grados de intensidad, además hay presencia ocasional de sistema de vetillas con halo biotítico y con halo potásico. Este sistema de vetillas no desarrolla stockwork y es de bajo contenido de sulfuros. Se relaciona con la mineralización de calcopirita y pirita, en algunos casos bornita, además de rutilo y magnetita.

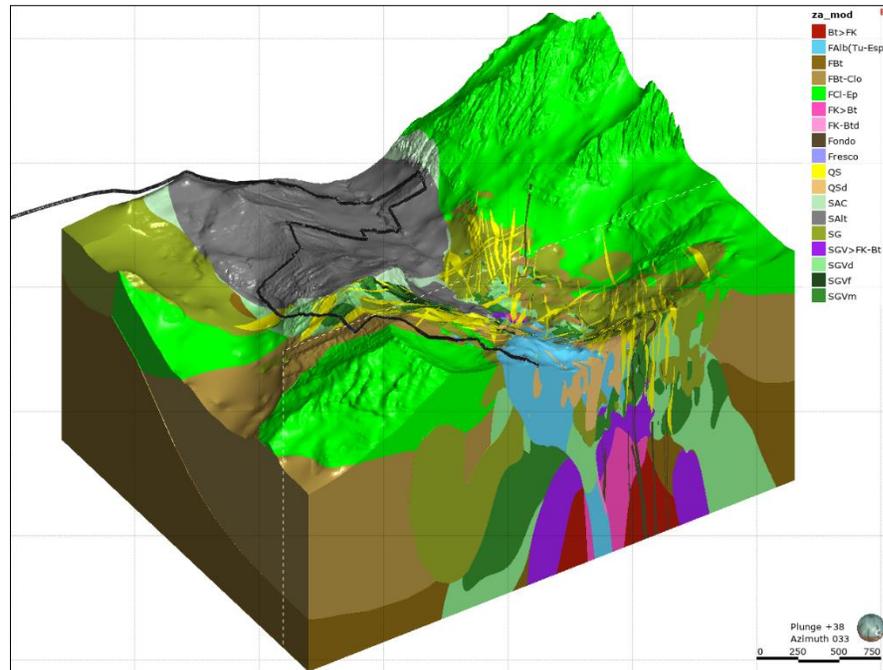


Figura 5. Modelo de alteraciones del yacimiento

3.4.2. Alteración Biotita-Clorita de fondo (FBt-Cl)

Los máficos están alterados a biotita secundaria, pero en menor grado que la Alteración Biotítica de fondo, además hay cloritización. Contiene mineralización diseminada de calcopirita y pirita.

3.4.3. Alteración Clorita-Epidota de fondo (FCI-Ep)

Existe una alteración a clorita de los máficos, pero se preservan la textura original de los minerales. En esta alteración pueden existir zonas con desarrollo de vetillas con halos de albita y localmente albitización de feldespatos. La mineralización en las zonas de clorita-epidota es de bajo contenido de sulfuros comprendiendo principalmente pirita diseminada y localmente pirita relacionada a vetillas tipos C y EBT.

3.4.4. Biotítica o Feldespato Potásico penetrativa (Fk-Bt o Bt-Fk))

Caracterizada por la asociación de feldespato potásico, cuarzo, albita, biotita, sericita, anhidrita, magnetita y sericita verde. Se relaciona con la mineralización de calcopirita con presencia de bornita, tennantita y molibdenita.

3.4.5. Sericita gris verde penetrativa (SGV)

Es una de las alteraciones principales del yacimiento. Se encuentra en las rocas de caja granodioríticas, brechas y pórfidos. Su característica principal es que contiene micas verdes y sericita. Ocurre en vetillas tipo C con destrucción total de la textura original. Está vinculada a la mineralización de calcopirita, con menor cantidad de pirita y bornita.

3.4.6. Cuarzo sericítica penetrativa (QS)

Se compone principalmente de cuarzo, illita-sericita, arcillas, carbonatos y yesos. Ocurre un total reemplazo de la roca, pero esta conserva su textura. Afecta a la matriz de brecha de polvo de roca y altera clastos de brechas, también puede alterar pervasivamente a granitoides y pórfidos, estos últimos conservan su textura porfídica. Se asocia principalmente a la mineralización de pirita, también de calcopirita, pero en menor medida. Además, tiene sulfosales de cobre y esfalerita y galena.

3.4.7. Argílica penetrativa (Arg)

Se distingue porque contiene illita-sericita, caolinita, limonitas, esmectitas y carbonatos. Esta alteración ocurre en los sectores someros, que están asociados a zonas de falla o zonas de brechas tardía como lo son la brecha de turmalina y polvo de roca. Se relaciona con la mineralización de pirita, calcopirita, bornita y sulfosales de cobre.

3.5. Unidades Geotécnicas

En el yacimiento Río Blanco existen distintos ambientes de rocas según su calidad geotécnica, las cuales tienen características distintivas por lo que es posible clasificarlas en 3 unidades (Figura 6) que han sido definidas por Equipo Geomecánica Minas Rajo y Subterránea (2022):

3.5.1. Roca Primaria

Es el macizo rocoso que es competente e impermeable, puede incluir distintos tipos de litología, su característica principal es que las discontinuidades están selladas principalmente por yeso y/o anhidrita. Dependiendo de la cantidad de discontinuidades que presenten yeso y/o anhidrita, varía la competencia de esta roca. Esta unidad infrayace a la roca secundaria.

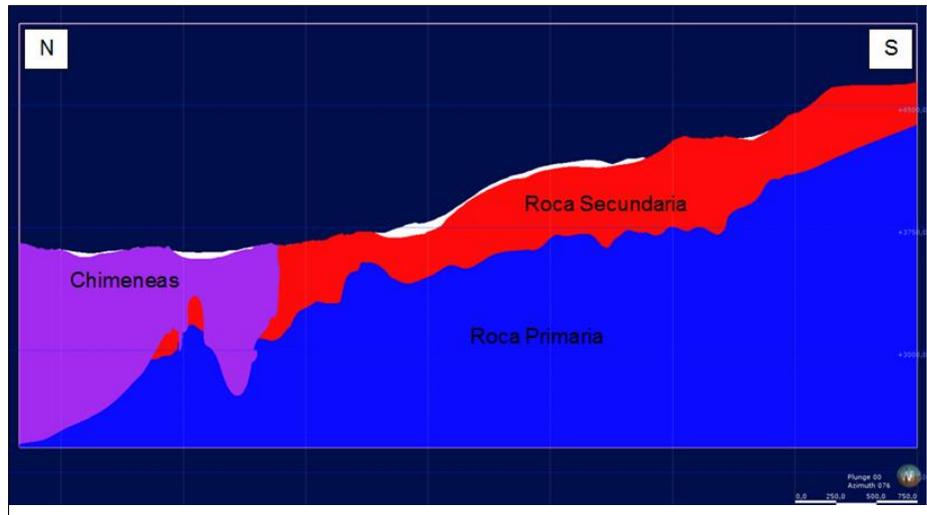


Figura 6. Perfil de unidades geotécnicas

3.5.2. Roca Secundaria

Corresponde al macizo rocoso que puede tener una competencia variable dependiendo de su litología y es permeable, además ha sido afectado por la meteorización e infiltración de aguas superficiales. Sus fracturas están mayormente abiertas y tienen rastros de circulación de agua, por lo que se puede observar patinas de limonita.

3.5.3. Chimenea Volcánica

Ocurren en el magmatismo post-mineralización por lo que corresponde a un evento más reciente. Sus fracturas son muy escasas y se encuentran abiertas, no presentan relleno debido a que esta unidad se formó posterior a la inyección hidrotermal rica en yeso y anhídrita.

3.6. Geología Estructural

3.6.1. Categorización de fallas en Yacimiento Río Blanco

En el yacimiento se establecieron 4 órdenes estructurales (Figura 7) de acuerdo con su continuidad, relación de corte y relleno (SGEOM, 2017):

Falla orden 0: son estructuras que tienen continuidad a escala distrital, su orientación preferencial es NE-SW en el sector Don Luis y ENE-WSW a E-W en la mina subterránea (sector Río Blanco). Las fallas mayores identificadas en el Rajo Don Luis tienen espesores reconocidos de hasta 3 m con relleno de salbanda y arcillas

Falla orden 1: su continuidad es mayor a 500 m y presenta espesores mayores a 10 cm. Tienen una orientación preferencial NW y EW en la mina subterránea y NW y NE en rajo Don Luis.

Falla orden 2: su continuidad es menor a 300 m y presenta espesores entre 5 y 10 cm. Al igual que las fallas de orden 1 tienen una orientación preferencial NW y EW en la mina subterránea y NW y NE en rajo Don Luis.

Falla orden 3: tiene una continuidad menor a 300 m y siempre están contenidas entre las estructuras de orden superior. No tienen una orientación preferencial.

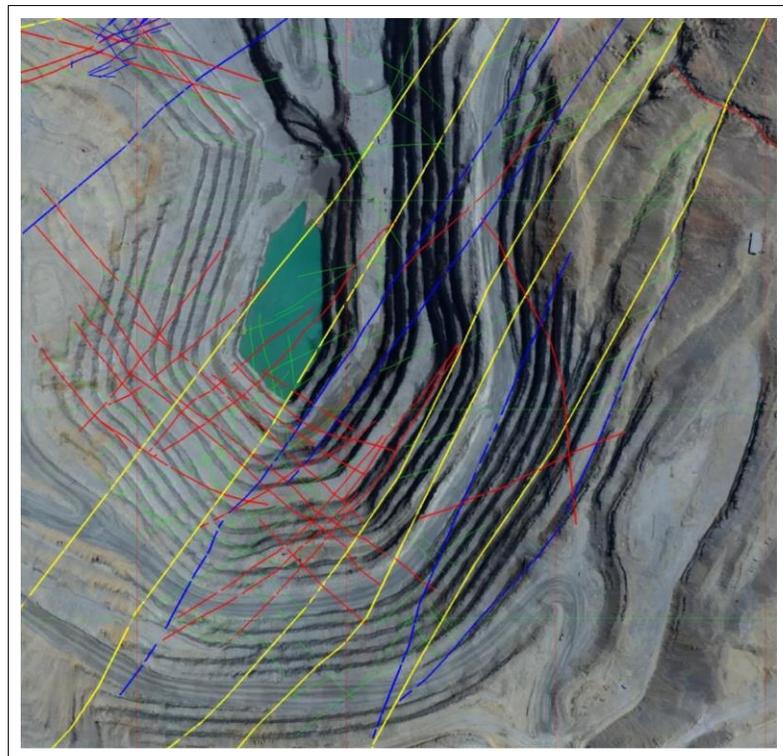


Figura 7. Estructuras en rajo Don Luis. Fallas de Orden 0 en amarillo, Fallas de orden 1 en azul, Fallas de Orden 2 en rojo y Fallas de Orden 3 en verde.

3.6.2. Geocronología Estructural

La roca caja del yacimiento, es decir los intrusivos más grandes y antiguos como los son la Granodiorita Río Blanco y Granodiorita Cascada, tienen una orientación preferencial NS a NNW, esto indica la presencia de un sistema con esa orientación que permitió el emplazamiento de estas unidades, pero que actualmente se encuentra sellado. Esta orientación tiene relación con los

sistemas El Fierro y Pocuro los cuales están relacionados al emplazamiento de cuerpos intrusivos en la zona (Piquer y otros, 2010).

Las estructuras de orientación NE, son las primeras en formarse y se relacionan con la orientación de las estructuras regionales (Piquer y otros, 2016). Estas estructuras NE se forman en la roca caja entre los 14 Ma y los 8 Ma. En este sistema NE se encuentra la mineralización de arsénico en el sector Sur Sur.

Posteriormente, entre los 8 Ma. a los 5,5 Ma. se formó el sistema NW, el cual está contenido en el sistema NE. El sistema NW tiene una mayor densidad de estructuras en el sector Río Blanco y es el sistema preferencial para la mineralización ya que se encuentra paralelo a esta, este sistema se evidencia en las Brechas de Anhidrita (BXANH) y en los pórfidos.

Desde los 5 Ma hasta los 4 Ma, se desarrolla un tercer sistema estructural con orientación ENE-EW, el cual corta al Pórfido Don Luis, Chimenea Riolítica y Chimenea Dacítica. Este sistema alberga la mineralización de arsénico en el sector Río Blanco (Skarmeta y otros, 2017).

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Mecanismos de falla

Los mecanismos de fallas son condicionados por el grado de fracturamiento del macizo rocoso, la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud. La estabilidad se define por los parámetros de las discontinuidades y de la matriz rocosa (González de Vallejo y otros, 2002).

En CODELCO-División Andina los mecanismos de falla presentan un control estructural, donde es posible encontrar: fallas planares, fallas en cuñas y en menor medida volcamientos.

4.1.1. Falla planar

Se forma cuando hay discontinuidades buzando a favor del talud y con la misma dirección, el ángulo de buzamiento de la discontinuidad (α) debe ser menor que el del talud (ψ).

$$\psi > \alpha$$

El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de rozamiento interno (ϕ).

$$\alpha > \phi$$

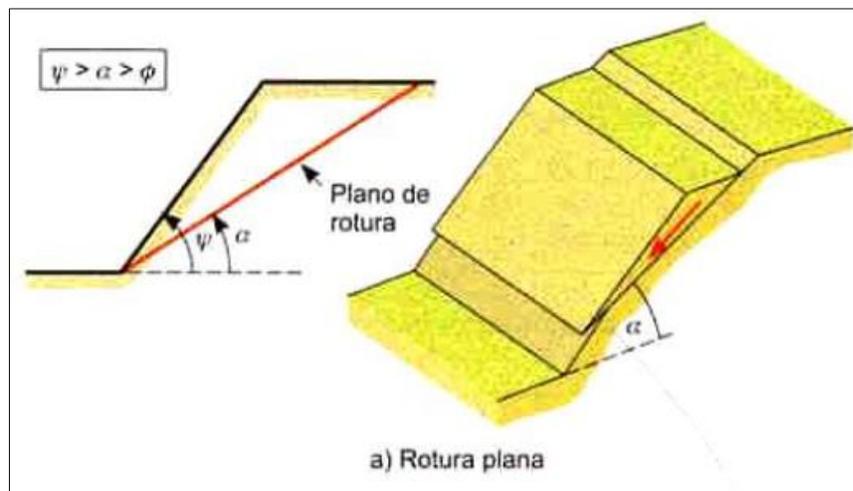


Figura 8. Condición para la rotura plana (González de Vallejo y otros, 2002).

4.1.2. Falla en cuña

Se compone por dos planos de discontinuidad están a favor de la línea de intersección y se desliza un bloque en forma de cuña, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud. Suele presentarse en macizos rocosos con varias familias de discontinuidades, donde la orientación,

espaciado y continuidad determina la forma y volumen de la cuña. Se debe cumplir que el buzamiento de la línea de intersección (α) debe ser menor que el buzamiento del talud (ψ) y mayor que el ángulo de rozamiento interno (ϕ).

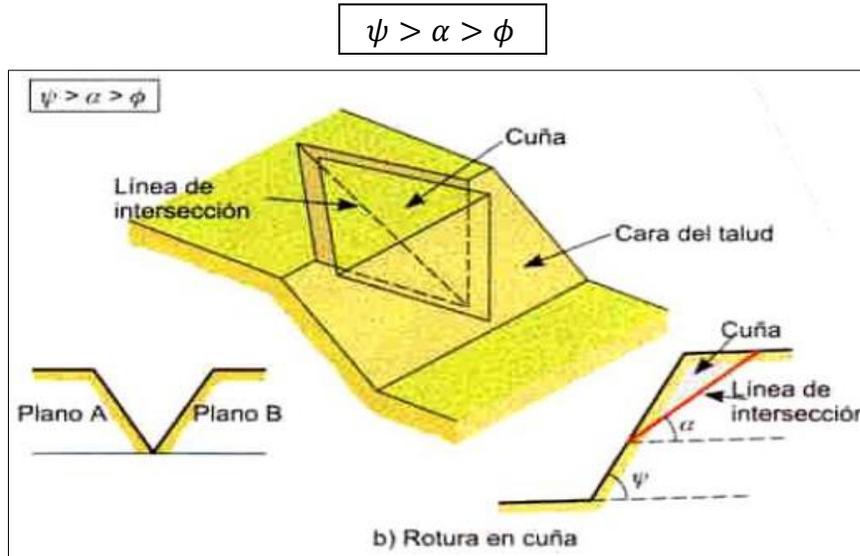


Figura 9. Condición para la rotura en cuña (González de Vallejo y otros, 2002).

4.1.3. Volcamientos

Este mecanismo de falla se produce cuando en el macizo rocoso los estratos o diaclasas mantienen en dirección opuesta a la inclinación del talud y rumbo paralelo o subparalelo a este. Ocurre un movimiento rotacional de los estratos o diaclasas, la estabilidad de estos no está determinada por la resistencia a deslizarse (González de Vallejo y otros, 2002).

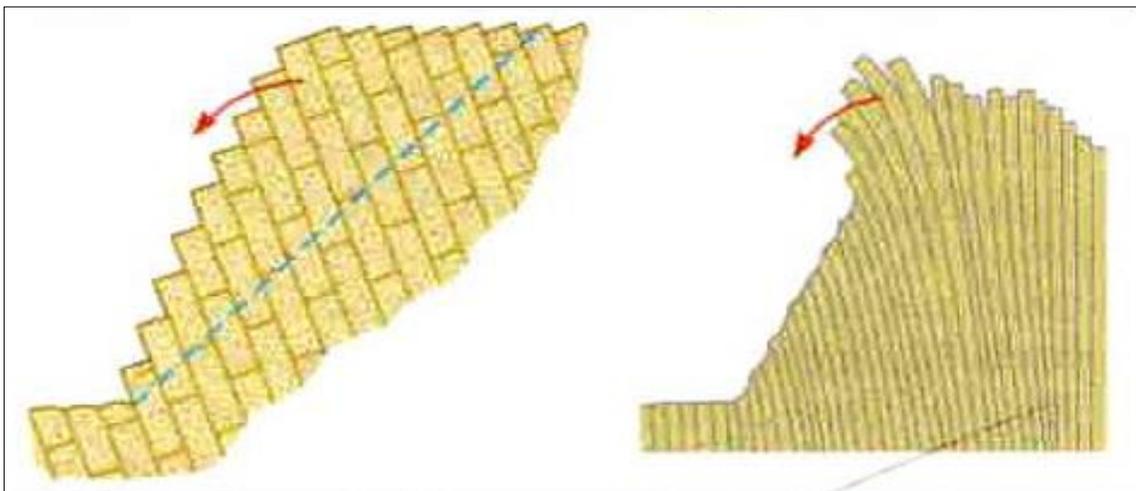


Figura 10. Esquema de talud con estructura favorable al volcamiento (González de Vallejo y otros, 2002).

4.2. Método de Mohr-Coulomb

El criterio de Mohr-Coulomb evalúa la resistencia al corte a lo largo de un plano.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Donde c es cohesión, σ_n es esfuerzo efectivo normal sobre el plano de discontinuidad y ϕ es el ángulo de fricción máxima.

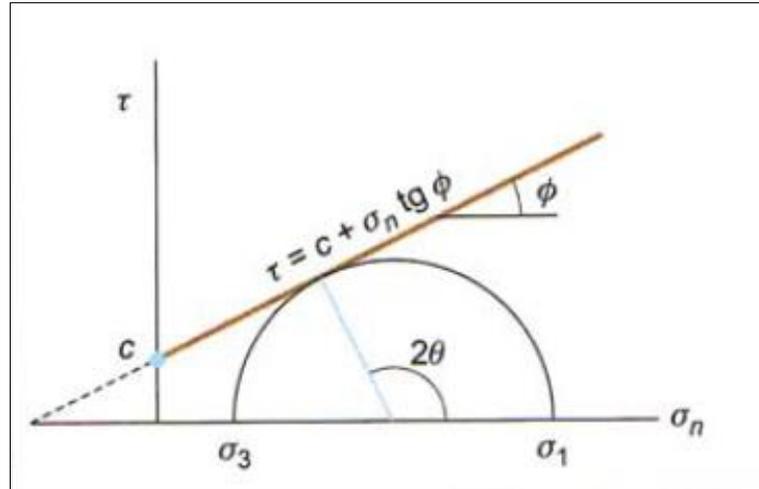


Figura 11. Envolvente de Mohr-Coulomb.

4.3. Método de Barton-Bandis

El método de Barton Bandis es un modelo empírico que estima la envolvente de la resistencia al corte para discontinuidades con rugosidades que no tengan relleno, ya que este método considera

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

cohesión $c=0$.

Donde τ es resistencia al corte, σ_n es tensión normal, ϕ_r es el ángulo de fricción residual, JRC es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad y JCS es la resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad.

4.3.1. Determinación de parámetros de Barton Bandis

Esfuerzo o tensión normal (σ_n)

Corresponde a la tensión aplicada sobre el plano de discontinuidad de manera perpendicular, estos esfuerzos son los que tienden a evitar la separación de las dos partes de un sólido.

La tensión se define como el cociente entre la fuerza aplicada y la superficie donde se le aplica:

$$\sigma_n = \frac{F}{A}$$

Ángulo de fricción residual (ϕ_r)

Si las paredes de la discontinuidad están sin alterar el ángulo de fricción residual (ϕ_r) es igual al ángulo de fricción básico (ϕ_b):

$$\phi_r = \phi_b$$

Los valores típicos del ángulo de fricción básico (ϕ_b) en discontinuidades sin alteración es de 25° a 37° en rocas sedimentarias, de 29° a 39° en rocas ígneas y de 21° a 30° en rocas metamórficas (Barton 1973, 1976)

En cambio, si las paredes de la discontinuidad están alteradas, el ángulo de fricción residual (ϕ_r) será menor al ángulo de fricción básico (ϕ_b), por lo que en este caso se utiliza la ecuación:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R}$$

Donde R es el valor del rebote del Martillo de Schmidt sobre una superficie sin alteración y r es el valor del rebote del Martillo de Schmidt en estado natural, ya sea alterada o no, seco o húmeda.

Coefficiente de rugosidad de las discontinuidades (JRC)

El JRC se puede obtener mediante técnicas de medición sin contacto o in situ (Barton y otros, 2023).

Las técnicas de medición sin contacto son las siguientes:

- 1) La fotogrametría es el proceso de adquirir información 3D a partir de imágenes 2D tomadas del mismo lugar desde diferentes puntos de vista (Buzzi y Casagrande, 2018; Bahaaddini y otros, 2022)
- 2) El procesamiento de imágenes es la tecnología del reconocimiento de imágenes para cuantificar la rugosidad, a diferencia de la fotogrametría no necesita la topografía 3D de la superficie de la discontinuidad (Krohn y Thompson, 1986 y Bae y otros, 2011).
- 3) El escaneo de luz estructurada es una herramienta de escaneo 3D que utiliza líneas alternas proyectadas y un sistema de cámara para calcular la geometría 3D de un objeto (Grasselli y otros, 2001; Liu y otros, 2017).
- 4) El método de escaneo láser se basa en medir la distancia del objeto utilizando láseres de acuerdo con la velocidad de la luz (Ge y otros, 2014; Zheng y otros, 2021)

In situ la rugosidad de la superficie de la discontinuidad puede ser medida utilizando superficies sin meteorización que estén expuestas, esto se puede realizar mediante 3 métodos:

- 1) El Peine de Barton que utilizaron Barton y Chubey (1977) consiste en un dispositivo de 25 cm de largo con piezas de 0,25 mm (4 por mm) que al presionarlo contra una superficie se adapta perfectamente a esta, obteniendo así el perfil de la discontinuidad. Hencher y Richards (2015) indican que este dispositivo es lo suficientemente preciso para registrar y caracterizar la naturaleza general de las juntas o discontinuidades para la caracterización geológica y geotécnica. Sin embargo, tiene importantes limitaciones para determinar la rugosidad de perfiles de mayor escala.
- 2) Los perfilómetros son un dispositivo que consiste en una aguja o pequeño rodillo colocado en contacto directo sobre la superficie de una roca y que se mueve lateralmente sobre ella. A medida que se mueve el instrumento la aguja se desplaza verticalmente marcando la topografía. Este método tiene alta precisión sin embargo en terreno su mayor obstáculo es que necesita suficiente

espacio para la medición lo que en las discontinuidades a veces no es posible (Barton y otros, 2023).

3) Barton (1981) propuso la relación entre el JRC y la amplitud máxima (A) sobre una longitud (L). El valor de amplitud máxima se puede medir con una regla que se coloca a lo largo de la superficie de la discontinuidad a lo largo de L y luego medir la amplitud máxima.

Luego de obtenida la medición se debe realizar una comparación con la tabla de perfiles de rugosidad de Barton y Chubey (1977), la cual tiene 10 perfiles típicos de rugosidades, los cuales tienen intervalos que van de 2 en 2 y su rango es de 0-20. El ISRM sugiere el método de comparación visual para caracterizar la rugosidad a pequeña escala de las juntas de roca (Barton, 1978).

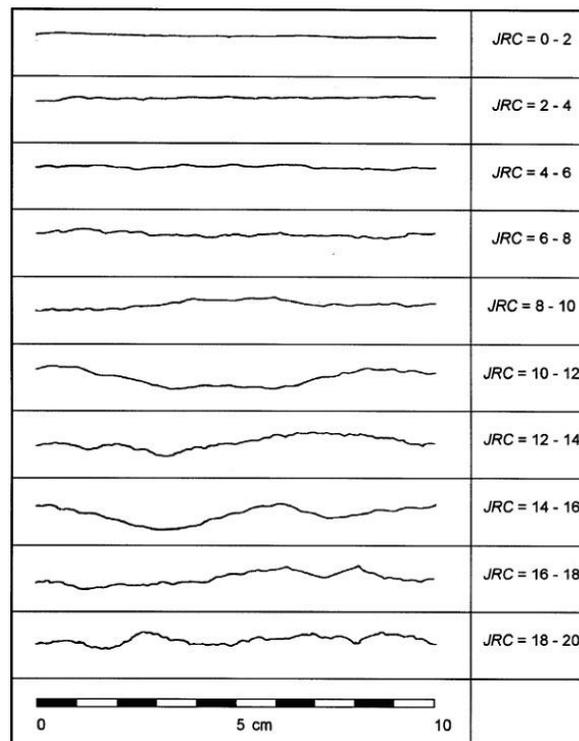


Figura 12. Perfiles de rugosidad de Barton y Chubey (1977).

Para discontinuidades de extensión mayor a 10 cm se debe estimar un JRC con corrección de escala, ya que este depende de la escala a la que se está utilizando, perfiles más largos o bloques más grandes de una misma discontinuidad tienen valores más bajos de JRC, por lo que por Bandis y otros (1981) elaboraron una curva de corrección de escala luego de varios ensayos de resistencia al corte en discontinuidades.

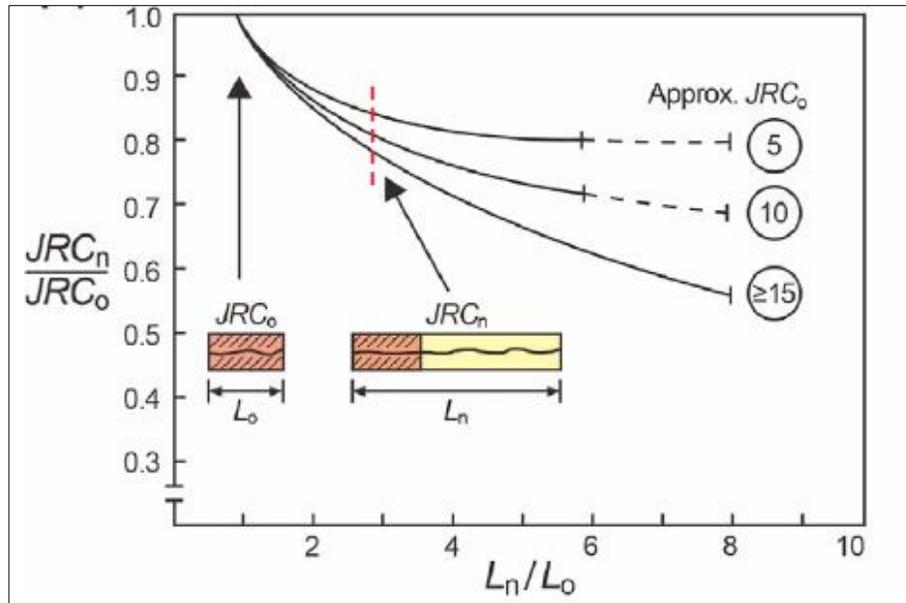


Figura 13. Corrección de escala de JRC (Barton y otros, 1981).

Luego Barton y Bandis (1982) propusieron una relación basándose en la curva de corrección de escala de Bandis y otros (1981).

$$JRC_n = JRC_0 * \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0,02 * JRC_0}$$

Con:

JRC_n = JRC escalado

JRC_0 = JRC medido in situ (con 10 cm de longitud total)

L_n = longitud total de la discontinuidad

L_0 = 10 cm

Además, Barton (1981) propuso una relación entre la amplitud máxima de la discontinuidad y la longitud del perfil y las resumió en el gráfico:

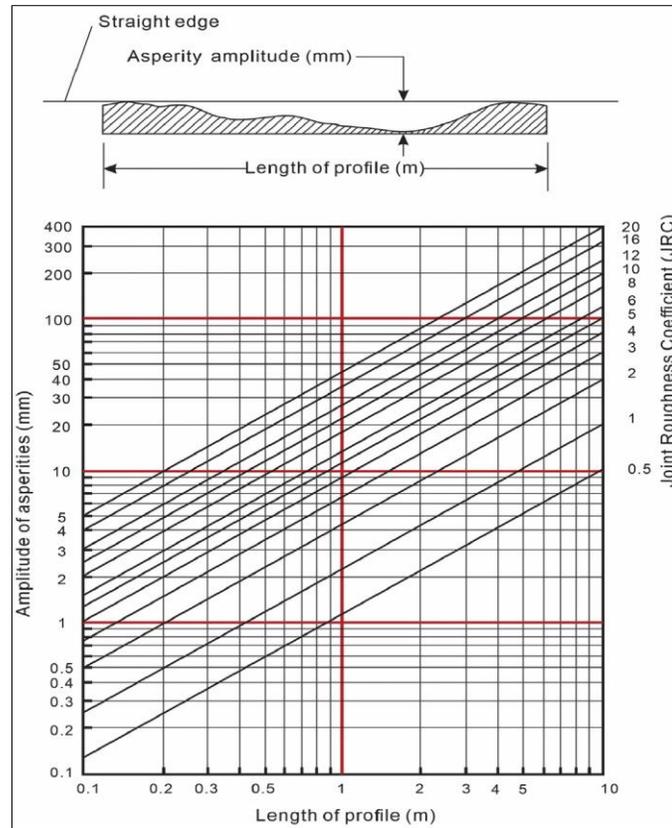


Figura 14. Relación entre amplitud máxima de la discontinuidad y longitud del perfil (Barton, 1981).

Resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (JCS)

Si las paredes de la discontinuidad no están alteradas el valor del JCS es igual a la resistencia a la compresión simple o uniaxial (UCS) de la roca caja obtenida en laboratorio.

Si las paredes de la discontinuidad están alteradas entonces el valor del JCS se calcula utilizando el Martillo de Schmidt.

El Martillo de Schmidt o Esclerómetro (Figura 15) es un aparato que era utilizado para medir la resistencia del concreto, pero se ha modificado para que sea utilizable sobre rocas y poder medir la resistencia a la compresión de la roca. Este consiste en un pistón cargado por un resorte que se libera cuando el émbolo se presiona contra una superficie. El impacto del pistón sobre el émbolo transfiere energía al material, donde la medida en la que se recupera la energía depende del material y se mide como el porcentaje de la longitud máxima estirada del resorte antes de la liberación del pistón (Aydin, 2008).

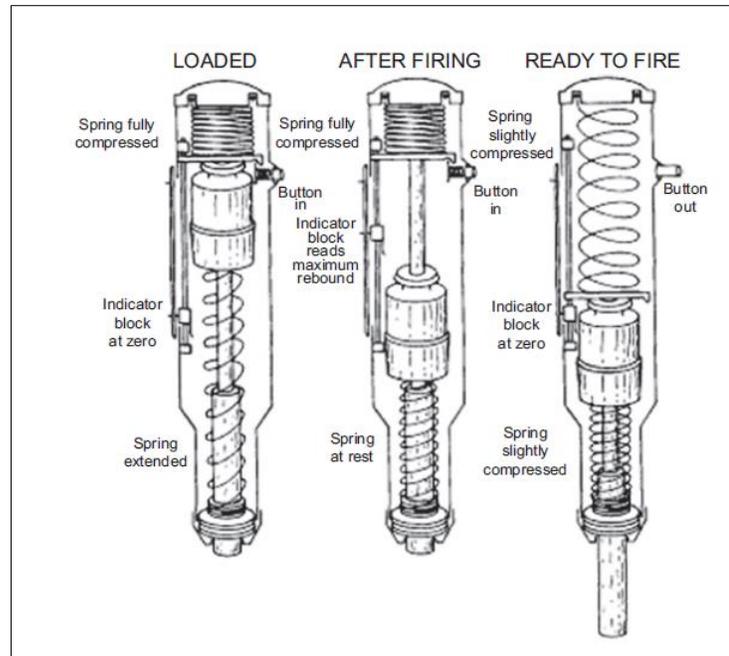


Figura 15. Funcionamiento del Martillo de Schmidt.

El Martillo de Schmidt puede ser utilizado sobre la roca, probeta o sobre la pared de la discontinuidad, donde se mide la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada (R).

Existen 2 modelos de Martillo de Schmidt; de tipo L el cual tiene una energía de impacto de 0,735 N.m. y el tipo N con una energía de impacto de 2,207 N.m., ambos martillos dan valores que se pueden utilizar para calcular la resistencia a la compresión simple (Aydin y Basu, 2005).

Ambos martillos se relacionan mediante la fórmula de Aydin (2008), la cual es sugerida por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM):

$$R_N = 1,0646R_L + 6,3673 \quad (r = 0,99)$$

Con:

R_N = número de rebotes de Martillo de Schmidt tipo N

R_L = número de rebotes de Martillo de Schmidt tipo L

El gráfico de Deere y Miller (1966) relaciona la resistencia al rebote del Martillo de Schmidt con la resistencia a la compresión simple, además considera la densidad de la roca y la orientación del Martillo con respecto a la superficie ensayada. Para así obtener la resistencia a la compresión simple con estos parámetros.

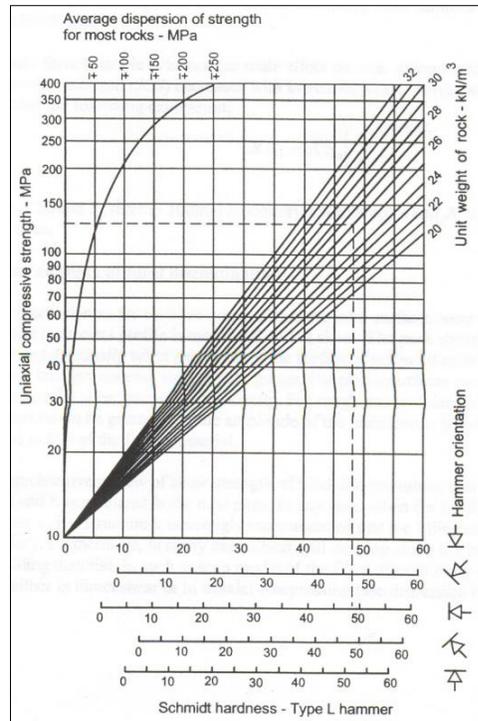


Figura 16. Gráfico de Deere y Miller (1966)

Para simplificar el uso de este gráfico los autores dedujeron una fórmula:

$$\log_{10} (JCS) = 0,00088 * \gamma_{roca} * R + 1,01$$

Con:

JCS= resistencia a la compresión

γ_{roca} = densidad de la roca

R= Número de rebotes de martillos de Schmidt tipo L

El valor (R) que se utiliza de los datos medidos con el Martillo de Schmidt, debe ser obtenido de manera estadística para que sea un valor representativo. ISRM recomienda tomar mínimo 20 medidas en zonas distintas, en cambio la norma ASTM (2017) recomienda 10 medidas.

ISRM (1978) propone usar el promedio de los 10 valores más altos. La ASTM (2017) recomienda descartar los valores que varíen en más de 7 golpes del promedio y después promediar las restantes. La ISRM en Aydin (2008) sugiere no descartar ningún dato y presentar los valores mediante un histograma de frecuencias y calcular los datos de promedio, mediana, moda y el rango para expresar las variaciones en la dureza de la superficie.

En general el JCS calculado con los rebotes del Martillo de Schmidt es menor a la UCS de una roca sin alterar.

Luego de obtenidos los valores de JCS, las rocas se pueden clasificar con la tabla de la ISRM (1978) que clasifica las rocas dependiendo de la resistencia a la compresión que presenta cada una de ellas (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de rocas de acuerdo con su resistencia a la compresión (ISRM, 1978).

Clasificación	Resistencia a la compresión (MPa)
Roca extremadamente blanda	0,25-1
Roca muy blanda	1-5
Roca blanda	5-25
Roca moderadamente blanda	25-50
Roca dura	50-100
Roca muy dura	100-250
Roca extremadamente dura	>250

Al igual que para el JRC, Bandis y otros (1981) propusieron una curva de corrección para el JCS (Figura 17) para discontinuidades de extensión mayor a 10 cm, ya que este parámetro también depende de la escala a la que se esté midiendo, por lo que perfiles más largos de una misma discontinuidad tendrían valores más bajos de JCS.

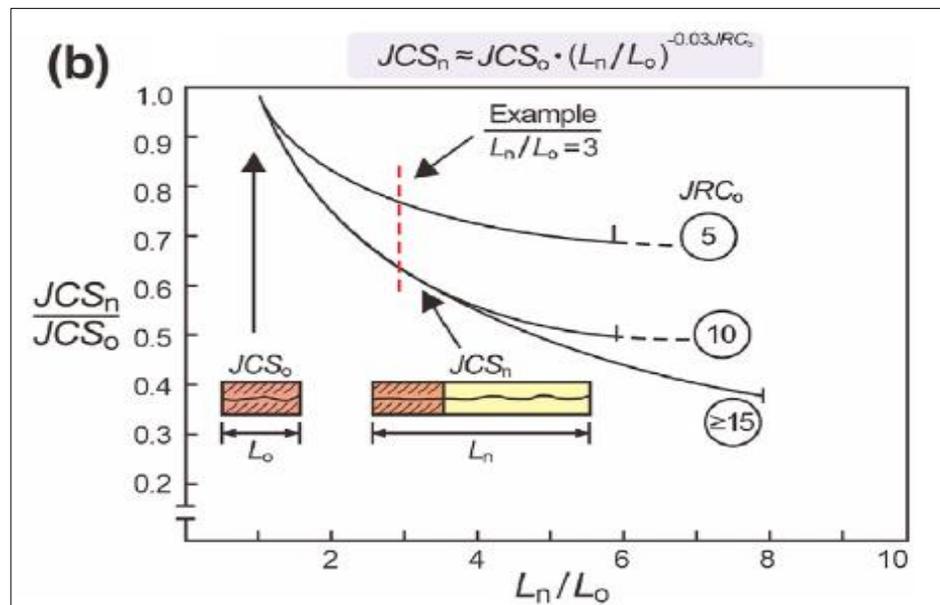


Figura 17. Corrección de escala para JCS (Barton y otros, 1981)

Luego Barton y Bandis (1982) propusieron una relación basándose en la curva de corrección de escala de Bandis y otros (1981), donde relacionan el JCS con el JRC.

$$JCS_n = JCS_0 * \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0,03*JRC_0}$$

Con:

JCS_n = JCS escalado

JCS_0 = JCS medido in situ (con 10 cm de longitud total)

JRC_0 = JRC medido in situ (con 10 cm de longitud total)

L_n = longitud total de la discontinuidad

L_0 = 10 cm

5. METODOLOGÍA

5.1. Obtención de datos

Para la realización de este trabajo se necesitan obtener diferentes datos, la manera en que se obtuvo cada parámetro necesario para esta investigación será explicado a continuación.

5.1.1. Ángulo de fricción básico

El ángulo de fricción básico se puede medir de 2 maneras (Figura 18): en muestras obtenidas en terreno (Barton, 1982) o con 3 probetas de sondaje (Stimpson, 1981).

Para poder utilizar el método de Barton (1982) se debe sacar muestras en terreno las cuales deben ser de ambos lados de la discontinuidad para luego posicionarlas sobre la mesa de inclinación e inclinarla a velocidad constante y así poder medir el ángulo en que falla la discontinuidad.

Con el método de Stimpson (1981) se ubican dos testigos de manera horizontal uno al lado del otro, luego se coloca el tercer testigo sobre estos. Para posteriormente inclinar la mesa a una velocidad constante y medir el ángulo en que se desliza la probeta que se encuentra sobre los otros testigos.

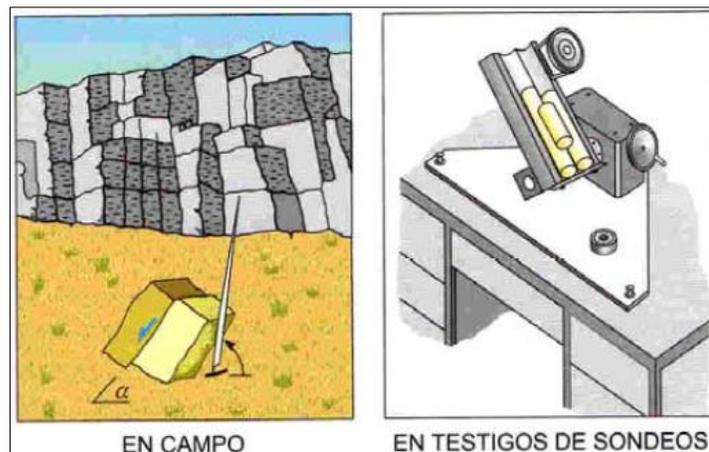


Figura 18. Método de Barton (1982) y método de Stimpson (1981)

Para efectos de este estudio se utilizó principalmente el método de Stimpson (1981) ya que no fue posible extraer muestras de terreno de todos los grupos litológicos necesarios ni una cantidad de muestras considerable, por lo que seleccionaron probetas de sondaje de distintos sectores del rajo Don Luis.

Para realizar el *tilt test* se siguió el procedimiento sugerido por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) (Alejano y otros, 2018) y que también fue usado por otros autores (Jang y otros, 2017; Li y otros, 2017; Tang y otros, 2019):

1. Comprobar la horizontalidad de la mesa de inclinación antes de cada prueba.
2. Limpiar la superficie de las probetas de sondaje para eliminar polvo y partículas.
3. Colocar dos probetas una al lado de la otra horizontalmente.
4. Posicionar una probeta sobre las otras 2 inferiores (Figura 19.A)
5. Inclinarse de manera constante hasta que la probeta que está en la parte superior se deslice (Figura 19.B)
6. Registrar el ángulo en el que la probeta se deslizó.
7. Volver a ubicar las probetas en la posición inicial para repetir el ensayo al menos 5 veces.
8. Estos ensayos se realizarán como mínimo en 15 probetas de sondaje distintas.

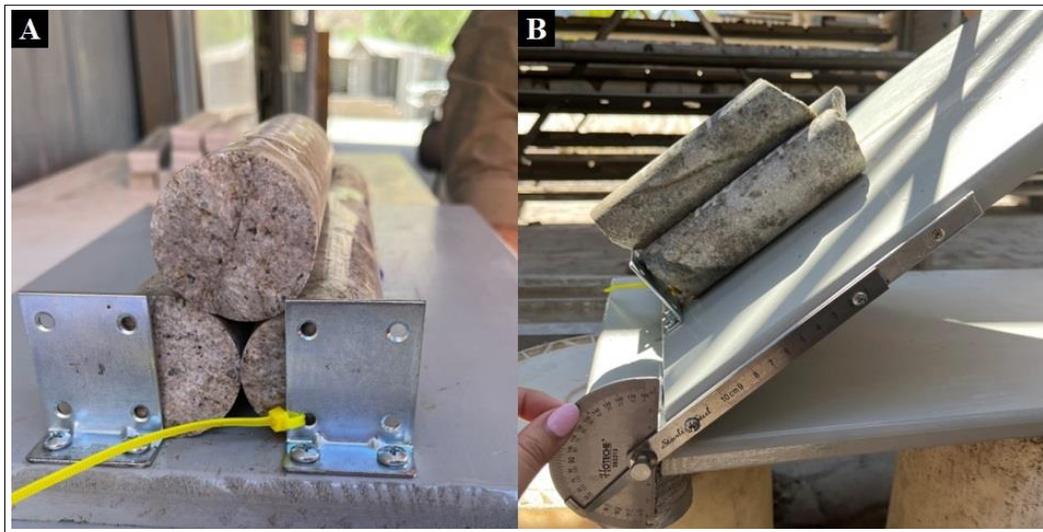


Figura 19. A. Probetas alineadas de manera horizontal previo al *tilt test*. B. *Tilt test*.

Luego de efectuar el procedimiento descrito anteriormente se debe ajustar el ángulo de inclinación medido (α), ya que este método de 3 probetas de sondaje sobreestima el ángulo de fricción básico (Stimpson, 1981; Alejano, 2012; Li y otros, 2017; Alejano y otros 2018; Tang y otros, 2022) por lo que se emplea la siguiente ecuación:

$$\phi_b = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \tan \alpha \right)$$

Con:

ϕ_b = ángulo de fricción básico
 α = ángulo de inclinación medido

El ángulo básico de fricción se obtiene con la mediana del total de la cantidad de datos, ya que esto es lo recomendado por la ISRM (Alejano y otros, 2018).

En este estudio se utilizará el ángulo de fricción básico.

5.1.2. Coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (JRC)

El coeficiente de rugosidad de las discontinuidades se mide con un peine de Barton en terreno, donde se realiza la siguiente metodología:

- 1) Se identifican los sets de discontinuidades preferenciales de la pared
- 2) Se mide con brújula estructural con regla de la mano derecha las orientaciones preferenciales.
- 3) Con el peine de Barton se determina la rugosidad de la discontinuidad según su orientación, y en dirección de la caída de la cuñas, obteniendo como mínimo 5 perfiles de JRC por cada orientación, esta rugosidad se toma ya sea en la pared (Figura 20.A) u obteniendo la muestra, según sea posible en cada caso (Figura 20.B)



Figura 20. A. Medición de JRC en la pared. B. Medición de JRC en una muestra de la discontinuidad.

- 4) Se fotografía el peine luego de medida la rugosidad.

- 5) Luego se repite el procedimiento en cada litología presente en la mina (si es que es posible).
- 6) Después de tomados los datos en terreno, en gabinete se escala a 10 cm el perfil de rugosidad medido en terreno (fotografías), y se compara con la tabla de perfiles de rugosidad de Barton y Chubey (1977) y así se obtiene el JRC para cada perfil (Figura 21).

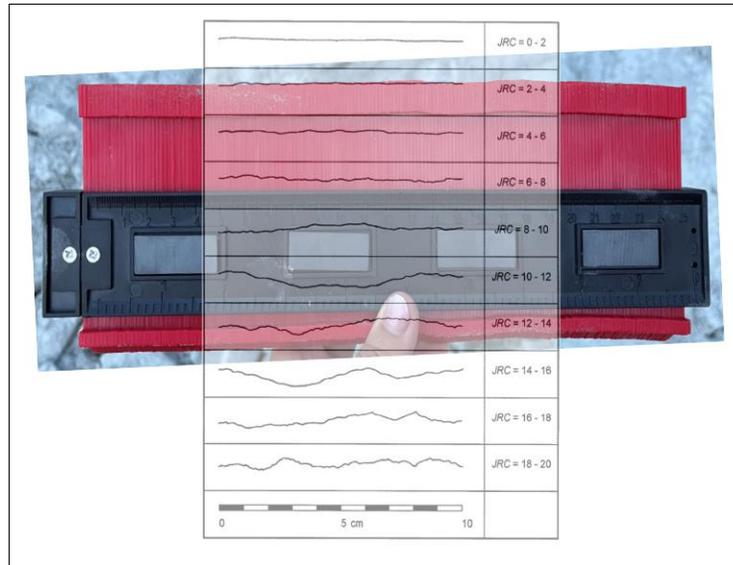


Figura 21. Comparación perfil medido con tabla de perfiles de rugosidad de Barton y Chubey (1977).

5.1.3. Resistencia a la compresión de las discontinuidades (JCS)

Para medir el JCS se utiliza el Martillo de Schmidt, se obtiene la resistencia a la compresión en terreno, donde las muestras deben estar intactas, es decir sin grietas visibles, ser uniformes y representativas del macizo rocoso que se está caracterizando. La superficie de prueba, especialmente debajo de la punta del Martillo de Schmidt debe estar libre de polvo y partículas (Aydin, 2008).

Luego de seleccionar una superficie de prueba, se presiona sobre la superficie para liberar el émbolo, cuando este está liberado se presiona sobre la superficie de la muestra hasta que el pistón dentro del Martillo impacte la superficie. Luego se aprieta el botón lateral para que quede registrada la cantidad de rebotes (R). Finalmente se anota el valor R y la orientación con la que actuó el Martillo de Schmidt.

Cuando ya se tienen los datos se sigue el procedimiento propuesto por Aydin (2008), donde no se descarta ninguno de los valores obtenidos, sino que se calculan medidas de tendencia central tales como: media aritmética, mediana, moda; además de medidas de dispersión como: rango y desviación estándar, esto con el fin de realizar un histograma.

En el caso de este estudio se utiliza el Martillo de Schmidt de tipo N, ya que los valores tomados con este Martillo no son aplicables al método de Deere y Miller (1966) se transforman los datos con la ecuación de Aydin (2008).

$$R_N = 1,0646R_L + 6,3673 \quad (r = 0,99)$$

Luego de corregir los datos y calculado el R_L se utiliza la fórmula de Deere y Miller (1966) para obtener la resistencia a la compresión simple, donde el dato de densidad de la roca es extraído de SGEOM (2020).

$$\log_{10} (JCS) = 0,00088 * \gamma_{roca} * R_L + 1,01$$

El valor que se ocupa para R_L es la mediana.

5.1.4. Tensión normal

Para determinar la tensión normal se necesita conocer el dato de tonelaje y área de las estructuras por lo que para poder adquirir estos datos:

Se realizan vuelos de detalle con el dron DJI Phantom 4 RTK (Figura 22). Para poder tener el detalle necesario para realizar los cálculos de tonelaje y área, los vuelos fueron efectuados a poca distancia del banco, es decir a 15 m de este, sin embargo, en algunas ocasiones no fue posible acercarse a tan poca distancia al banco, por lo que algunos vuelos se debieron hacer a 30 m del banco, ya que es una distancia más manejable. Además, estos vuelos se ejecutaron a una velocidad de 0,5 a 2 km/h, con el objetivo de conseguir un solapamiento entre fotos superior a 90%, luego estas imágenes obtenidas con el vuelo del dron se procesaron en el programa *pix4D*. Con las imágenes ya procesadas y georreferenciadas se trabaja con el programa de *Maptek PointStudio 2022.0.1*. donde se seleccionan 10 moldes de cuña por litología, estos moldes deben

ser de cuñas a una escala menor que el tamaño de los bancos (>16 m), ya que estas son las cuñas que se activan por discontinuidades sin relleno.



Figura 22. Dron Phantom 4 RTK

Como la tensión se define como el cociente entre la fuerza aplicada y la superficie donde se le aplica, para efectos de este estudio la fuerza será reemplazada por el valor del tonelaje de las estructuras:

$$\sigma_n = \frac{F}{A} = \frac{\text{Tonelaje}}{\text{Área}}$$

Donde el tonelaje se define como:

$$T_m = V \times d$$

Con: V= Volumen

d= densidad.

Por lo que con las cuñas mapeadas en el programa *PointStudio* se obtiene el volumen de cada una de ellas y utilizando la densidad definida para cada litología por SGEOM (2020) es posible calcular el tonelaje de estas cuñas. Además, con el programa anteriormente mencionado se determina el área de las cuñas para finalmente obtener el valor de σ_n .

6. RESULTADOS

Siguiendo la metodología descrita anteriormente se obtuvieron los resultados que se mostrarán a continuación:

6.1. Ángulo de fricción básico

Los resultados de ángulo de fricción básico (ϕ_b) obtenidos mediante *tilt test* con probetas de sondaje y luego de realizada su respectiva corrección sugerida por la ISMR, son los siguientes:

Tabla 2. Resumen de resultados de ángulo de fricción básico medido y ajustado.

Litología	N° Probetas Medidas	ϕ_b medido	ϕ_b ajustado
Andesita	19	37	33
Intrusivo	27	35	31
Intrusivo Duro	24	35	31
Diorita	16	35	31
Pórfido	29	35	31
Brecha	18	36	32
Chimenea Dacítica	20	40	36
Chimenea Riolítica	18	36	32

A continuación, se detallará por grupo litológico las estadísticas obtenidas con valores de ángulo básico de fricción medidos, considerando el valor ajustado:

6.1.1. Andesita

Para la andesita se midieron un total de 19 probetas 5 veces cada una por lo que se tienen 95 medidas de ángulo de fricción básico, en donde los valores se distribuyeron entre 27° y 36° (Figura 23). Además, se calcularon medidas de tendencia central, donde se obtuvo que el promedio y la mediana son de 33° y el valor que más se repite, es decir la moda, es 35° (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados ángulo de fricción básico para Andesita.

	ϕ_b
Mínimo	27°
Máximo	36°
Promedio	33°
Mediana	33°
Moda	35°
Número de probetas	19

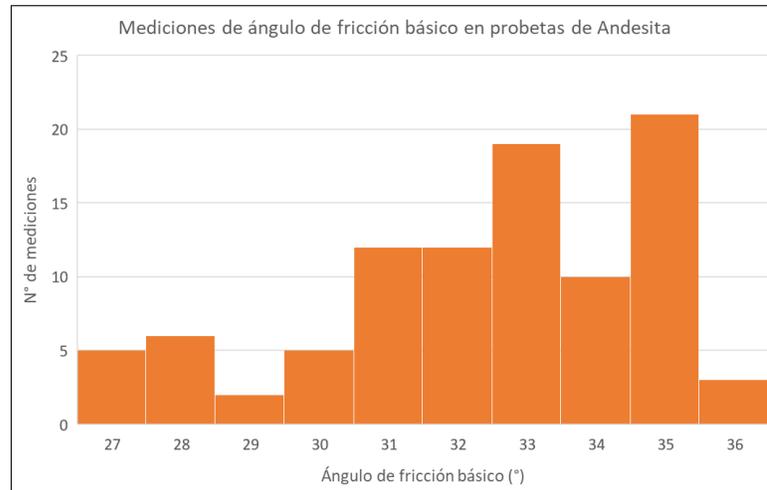


Figura 23. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Andesita.

6.1.2. Intrusivo

Para el Intrusivo (Granodiorita Río Blanco) se realizaron las mediciones de ángulo de fricción básico con un total de 27 probetas, midiendo cada probeta 5 veces, por lo que la totalidad es de 135 mediciones. El rango de medidas de ángulo de fricción básico va de 27° a 35° (Figura 24).

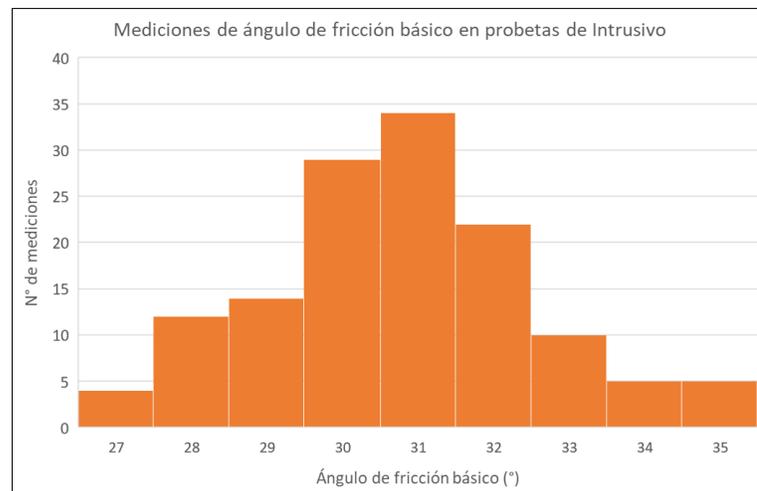


Figura 24. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Intrusivo.

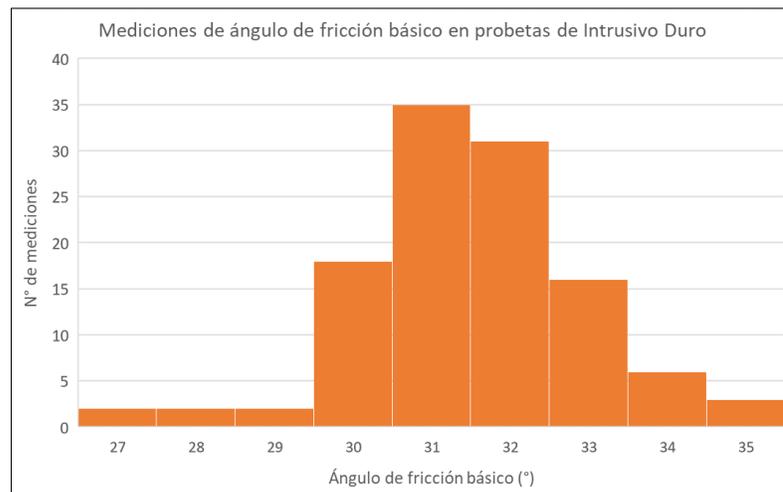
También se calculó el valor de las medidas de tendencia central donde el promedio o media aritmética, la mediana y la moda, es decir el valor que más se repite en el conjunto de datos dieron como resultado 31° (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados ángulo de fricción básico para Intrusivo.

	Φ_b
Mínimo	27°
Máximo	35°
Promedio	31°
Mediana	31°
Moda	31°
Número de probetas	27

6.1.3. Intrusivo Duro

En Intrusivo Duro (Granodiorita Cascada) se midieron 24 probetas, 5 veces cada una, por lo que el total de datos fue de 120, donde los valores de ángulo de fricción básico se distribuyeron entre 27° y 35° (Figura 25).

**Figura 25.** Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Intrusivo Duro.

Además, se calculó el promedio el cual es de 32° y la mediana y moda que son de 33° (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados ángulo de fricción básico para Intrusivo Duro

	Φ_b
Mínimo	27°
Máximo	35°
Promedio	32°
Mediana	31°
Moda	31°
Número de probetas	24

6.1.4. Diorita

Se testaron 16 probetas para la Diorita, con 5 medidas cada una, por lo que se midieron 80 ángulos de fricción, donde la distribución de este fue de 27° a 34° (Figura 26).

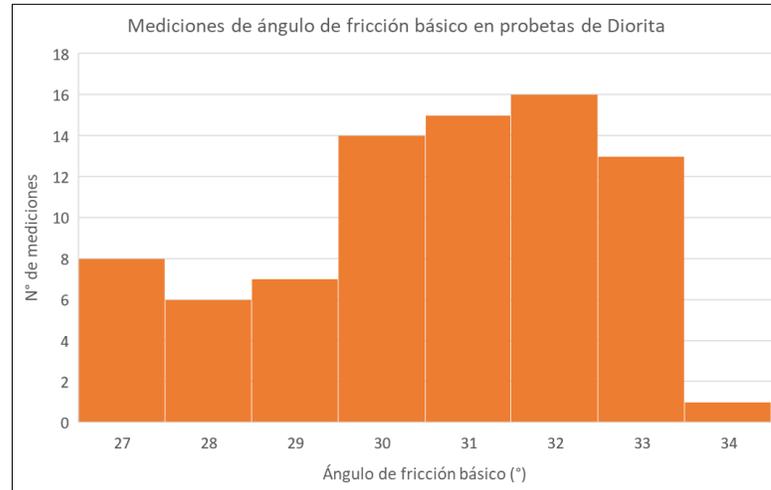


Figura 26. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Diorita.

También se evaluaron las medidas de tendencia central donde se obtuvo que el promedio y la mediana son de 31° y el valor que más se repite, es decir, la moda es de 32° (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados de ángulo de fricción básico para Diorita.

	ϕ_b
Mínimo	27°
Máximo	34°
Promedio	31°
Mediana	31°
Moda	32°
Número de probetas	16

6.1.5. Pórfido

Para el Pórfido solo se tomaron mediciones en Pórfido Don Luis (PDL), ya que en el rajo Don Luis se encuentra principalmente este tipo de Pórfido, siendo los otros tipos PQM y PFeld encontrados en menor cantidad o en las periferias del rajo.

Para el Pórfido se realizaron un total de 145 mediciones, las cuales corresponden a 29 probetas, de las cuales se obtuvieron 5 valores de cada una y además que el rango del ángulo de fricción básico varía entre 27° a 36° (Figura 27).

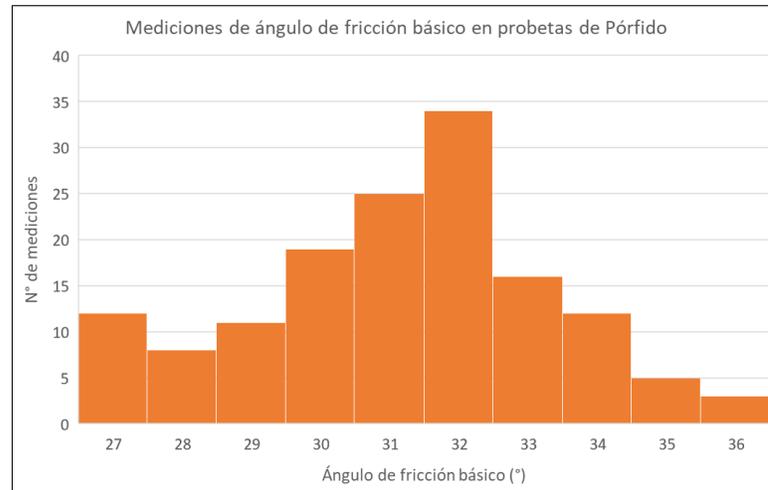


Figura 27. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Pórfido.

Además, se calculó el promedio y la mediana los cuales son de 31° y el valor que más se repite en los datos es 32° (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados de ángulo de fricción básico para Pórfido.

	ϕ_b
Mínimo	27°
Máximo	36°
Promedio	31°
Mediana	31°
Moda	32°
Número de probetas	29

6.1.6. Brechas

Para las Brechas se realizaron mediciones de 18 probetas en total, estas probetas fueron de distintos tipos de brechas, dependiendo de la cantidad de probetas disponibles.

Se midieron 2 probetas de Brecha Polvo de Roca o Matriz Clástica (BxPr), 9 probetas de Brecha Tobácea de Turmalina (BXTTO) y 7 probetas de Brecha de Matriz Turmalina (BxT). Cada probeta se testeó 5 veces, por consiguiente, el total de mediciones realizadas fue de 90.

Los distintos valores obtenidos de ángulo de fricción básico se distribuyeron desde 27° a 35° (Figura 28).

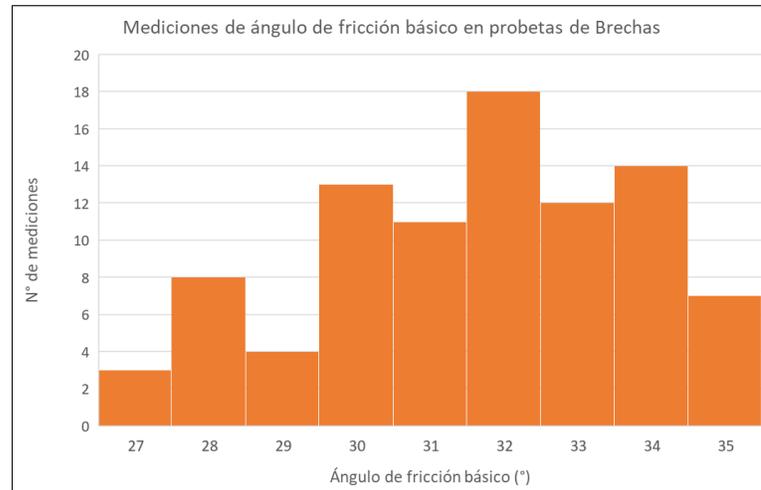


Figura 28. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Brechas.

Luego se calcularon medidas estadísticas, donde el promedio, la mediana y la moda del ángulo de fricción básico resultante fue de 32°.

Tabla 8. Resultados de ángulo de fricción básico para Brechas.

	ϕ_b
Mínimo	27°
Máximo	35°
Promedio	32°
Mediana	32°
Moda	32°
Número de probetas	18

6.1.7. Chimeneas

Para las Chimeneas se obtuvieron datos de los 2 tipos de Chimeneas existentes, es decir de Chimenea Dacítica (CHDAC) y Chimenea Riolítica (CHRIOL), los resultados fueron los siguientes:

6.1.7.1. Chimenea Dacítica

En el caso de la Chimenea Dacítica se tomaron un total de 100 mediciones, donde se probó cada probeta 5 veces, por lo tanto, el total de probetas medidas fue de 20.

Los valores obtenidos se distribuyeron en un rango de 31° a 42° (Figura 29).

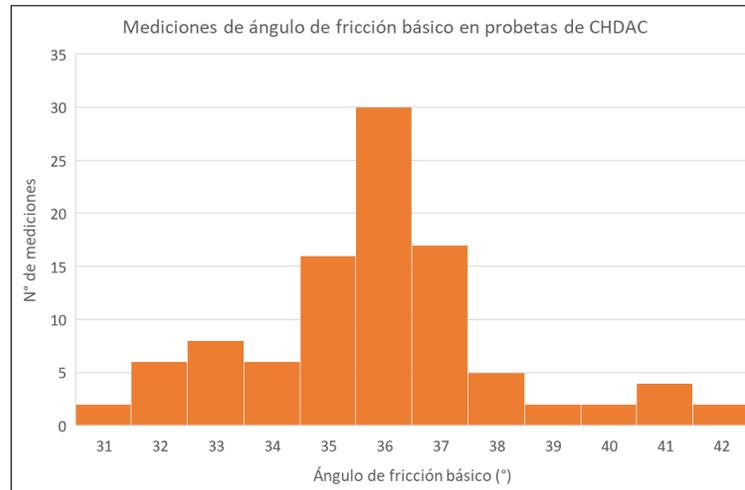


Figura 29. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Chimenea Dacítica.

Además, se obtuvieron las medidas de tendencia central, donde el promedio, la mediana y la moda son 36° .

Tabla 9. Resultados de ángulo de fricción básico para Chimenea Dacítica.

	ϕ_b
Mínimo	31°
Máximo	42°
Promedio	36°
Mediana	36°
Moda	36°
Número de probetas	20

6.1.7.2. Chimenea Riolítica

En Chimenea Riolítica se realizaron un total de 85 ensayos de *tilt test* en 18 probetas. Los valores obtenidos están dentro del rango 28° a 36° (Figura 30).

También se calcularon el promedio, mediana y moda del conjunto de datos obtenido, donde el valor para cada medida fue de 32° (Tabla 10).

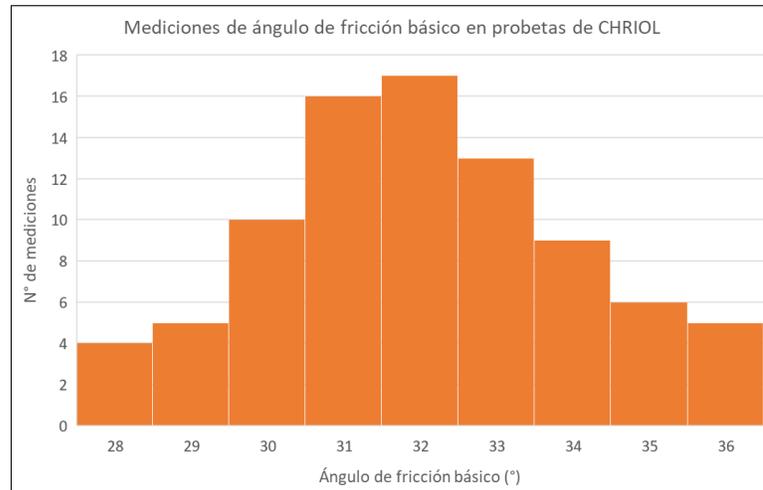


Figura 30. Histograma del ángulo de fricción básico medido en probetas de Chimenea Riolítica.

Tabla 10. Resultados de ángulo de fricción básico para Chimenea Riolítica.

	Φ_b
Mínimo	28°
Máximo	36°
Promedio	32°
Mediana	32°
Moda	32°
Número de probetas	18

6.2. JRC

El JRC no se pudo medir en el grupo litológico de Brechas porque está escasamente distribuida en el rajo Don Luis, tampoco se consiguió tomar medidas de este parámetro en Chimenea Riolítica debido a que esta litología se encuentra en los alrededores del rajo, pero no en este.

También es importante agregar que se obtuvo una menor cantidad de medidas de diorita de la propuesta inicialmente para cada unidad (5 medidas por orientación) debido a que las paredes de esta están altamente fracturadas y son inestables, por lo que es peligroso acercarse al talud para obtener la medida o alguna muestra.

Los resultados que se midieron con peine de Barton en terreno son los siguientes:

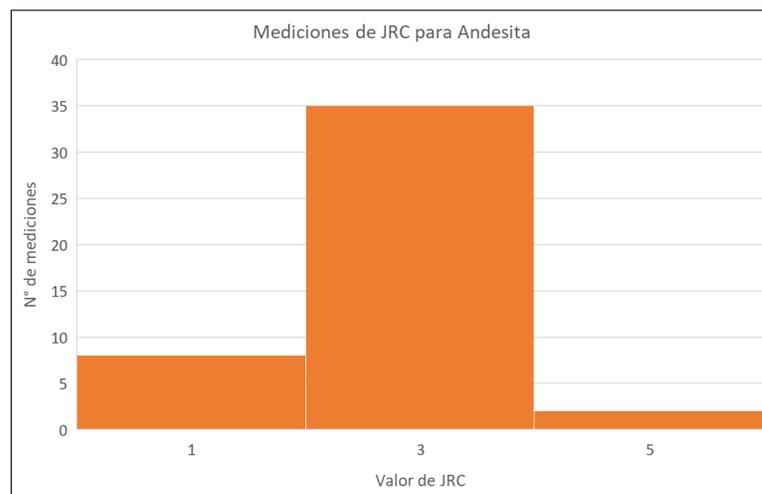
Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos para JRC con peine de Barton para cada grupo litológico.

JRC	Andesita	Intrusivo	Intrusivo duro	Diorita	Pórfido	Chimenea Dacítica
0-2	8	1	1	7	1	-
2-4	35	19	15	4	16	3
4-6	2	17	8	-	28	10
6-8	-	-	-	-	4	21
Total mediciones	45	37	24	11	49	34

Para cada unidad litológica se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión con los datos tomados en terreno, considerando el valor intermedio de los rangos definidos por Barton y Chubey (1977), por lo que el JRC para una de ellas es:

6.2.1 Andesita

Para la Andesita se tomaron un total de 45 datos, donde se identificaron 9 orientaciones preferenciales. El coeficiente de rugosidad de la Andesita varió entre 1 y 5 (Figura 31).

**Figura 31.** Histograma de JRC obtenido en terreno para Andesita.

Se calculó el promedio que es de 2,7 y mediana y moda que son de un valor de 3.

Tabla 12. Resultados de JRC para Andesita.

Mínimo	1
Máximo	5
Promedio	2,7
Mediana	3
Moda	3

6.2.2. Intrusivo

Se obtuvieron 37 medidas de JRC en Intrusivo, donde se identificaron 3 orientaciones preferenciales. Los valores de coeficiente de rugosidad obtenidos varían entre 1 y 5 (Figura 32).

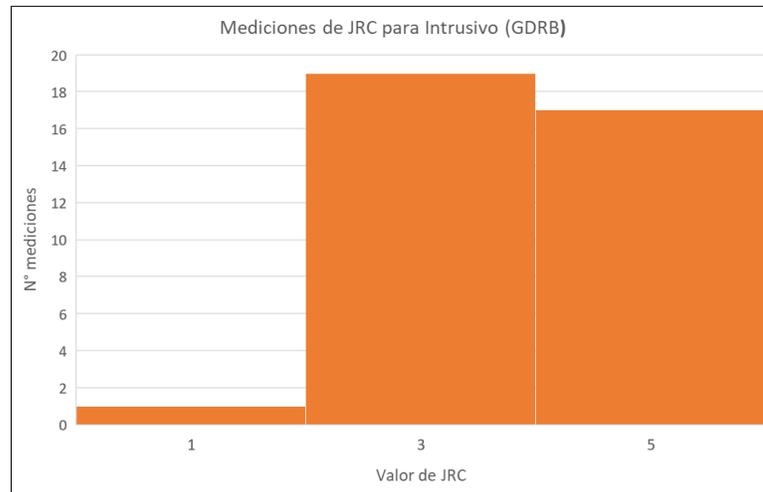


Figura 32. Histograma de JRC obtenido en terreno para Intrusivo.

Luego se calculó el promedio que dio un valor de 3,9 y la mediana y moda que coinciden en un valor de 3.

Tabla 13. Resultados de JRC para Intrusivo.

Mínimo	1
Máximo	5
Promedio	3,9
Mediana	3
Moda	3

6.2.3. Intrusivo Duro

En el caso de Intrusivo Duro se obtuvieron 24 datos donde se reconocieron 3 sistemas de orientación preferencial. El coeficiente de rugosidad del Intrusivo Duro tiene entre 1 y 5 (Figura 33). También se calculó el promedio que es de 3,6 y mediana y moda que son 3 (Tabla 14).

Tabla 14. Resultados de JRC para Intrusivo Duro.

Mínimo	1
Máximo	5
Promedio	3,6
Mediana	3
Moda	3

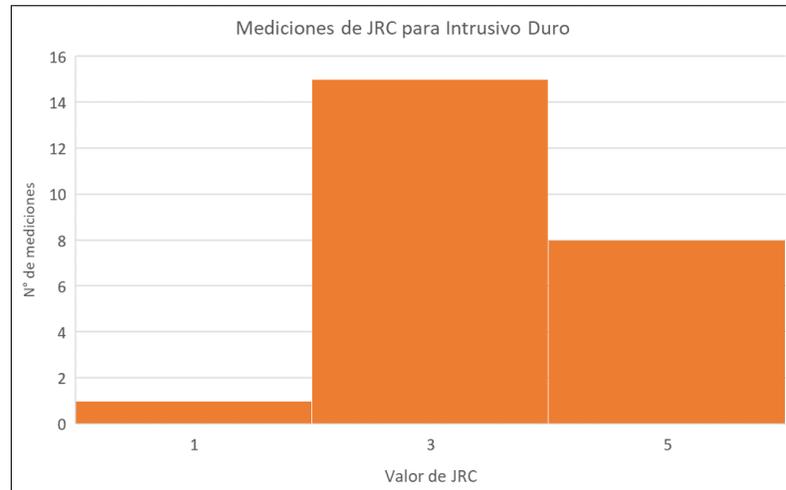


Figura 33. Histograma de JRC obtenido en terreno para Intrusivo Duro.

6.2.4. Diorita

Para Diorita se tomaron un total de 11 medidas de JRC en terreno, donde se definieron 2 orientaciones preferenciales. El coeficiente de rugosidad de la Diorita tiene un rango que va entre 1 y 3 (Figura 34).

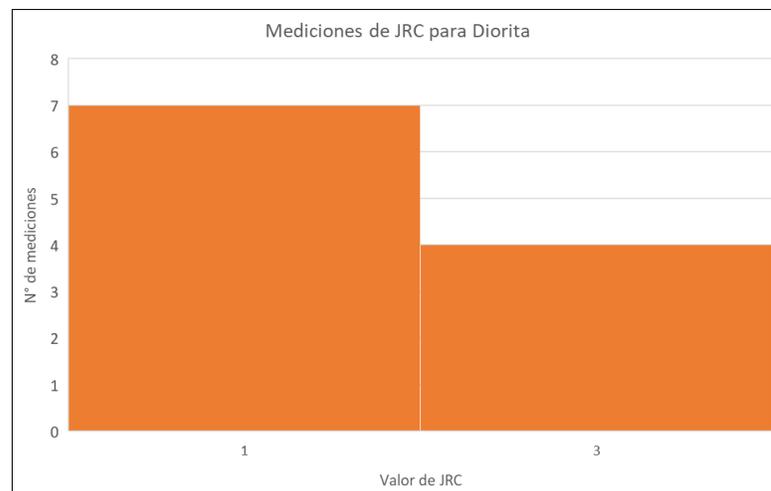


Figura 34. Histograma de JRC obtenido en terreno para Diorita.

Además, se calcularon medidas de tendencia central, donde el promedio que se obtuvo para la Diorita fue de 1,7 y los valores de la mediana y moda corresponden a 1.

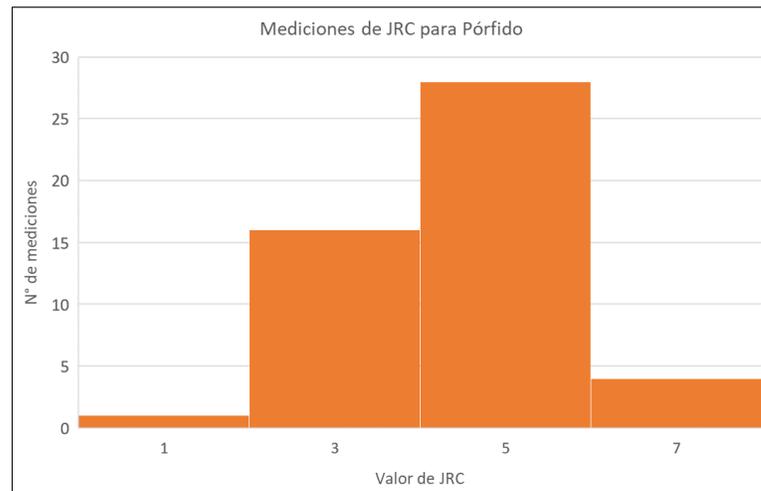
Tabla 15. Resultados de JRC para Diorita.

Mínimo	1
Máximo	3
Promedio	1,7
Mediana	1
Moda	1

6.2.5. Pórfido

En el caso del Pórfido solo se tomaron mediciones en Pórfido Don Luis, ya que este es el pórfido que tiene una mayor distribución en el rajo Don Luis.

Se obtuvieron 49 valores en 9 orientaciones preferenciales que se reconocieron. El coeficiente de rugosidad del Pórfido tiene valores entre 1 y 7 (Figura 35).

**Figura 35.** Histograma de JRC obtenido en terreno para Pórfido.

También se calculó el promedio que es de 4,4 y la mediana y moda que el valor obtenido es 5.

Tabla 16. Resultados de JRC para Pórfido.

Mínimo	1
Máximo	7
Promedio	4,4
Mediana	5
Moda	5

6.2.6. Chimenea Dacítica

En Chimenea Dacítica se midieron 34 perfiles, en 3 orientaciones preferenciales, donde el rango del coeficiente de rugosidad va entre 3 y 7 (Figura 36).

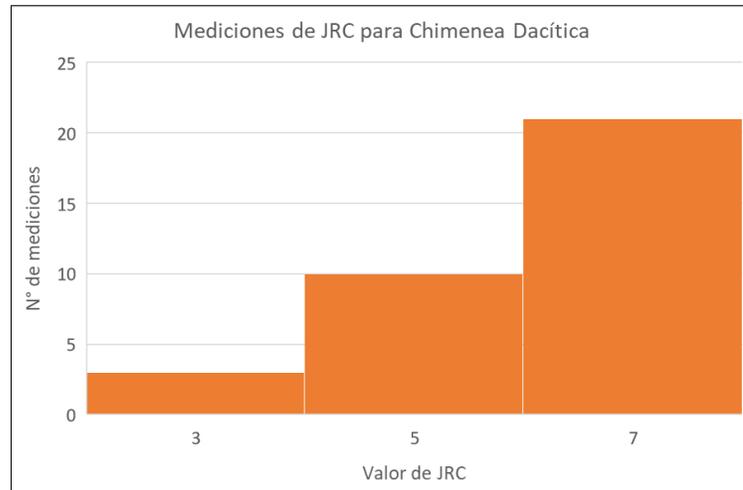


Figura 36. Histograma de JRC obtenido en terreno para Chimenea Dacítica.

Se evaluaron medidas de tendencia central, donde el promedio es 5,3 y su mediana y moda 5.

Tabla 17. Resultados de JRC para Chimenea Dacítica.

Mínimo	3
Máximo	7
Promedio	5,3
Mediana	5
Moda	5

6.3. JCS

Para el JCS al igual que para el JRC no fue posible obtener medidas para el grupo litológico de Brechas, debido a su escasa distribución dentro del rajo Don Luis, tampoco se tomaron datos de Chimenea Riolítica por encontrarse en las periferias del rajo Don Luis.

Después de tomar los rebotes con el Martillo de Schmidt de tipo N, como ya fue mencionado anteriormente, se realizó el ajuste a Martillo de Schmidt de tipo L (Tabla 18).

Tabla 18. Resumen de resultados de Rebote de Martillo de Schmidt de tipo N (R_N) y Rebote de Martillo de Schmidt de tipo L (R_L).

Litología	Rebote Martillo N (R_N)	Rebote Martillo L (R_L)
Andesita	50	41
Intrusivo	59	49
Intrusivo Duro	60	50
Diorita	62	52
Pórfido	62	52
Chimenea Dacítica	52	43

Considerando el resultado con la fórmula de ajuste de Martillo de Schmidt recomendada por la ISRM (Alejano, 2018) y aplicando la metodología de Deere y Miller (1966), los resultados de JCS por cada grupo litológico son los siguientes:

6.3.1. Andesita

Para la Andesita se tomaron 60 medidas de Martillo de Schmidt in situ, dando como resultado los valores de rebote ajustado (R_L), los cuales se encuentran en el rango de 32 a 52 rebotes (Figura 37). También se calculó el promedio que resultó en 40 rebotes, mediana 39 rebotes y el valor que más se repite es de 36 rebotes (Tabla 19).

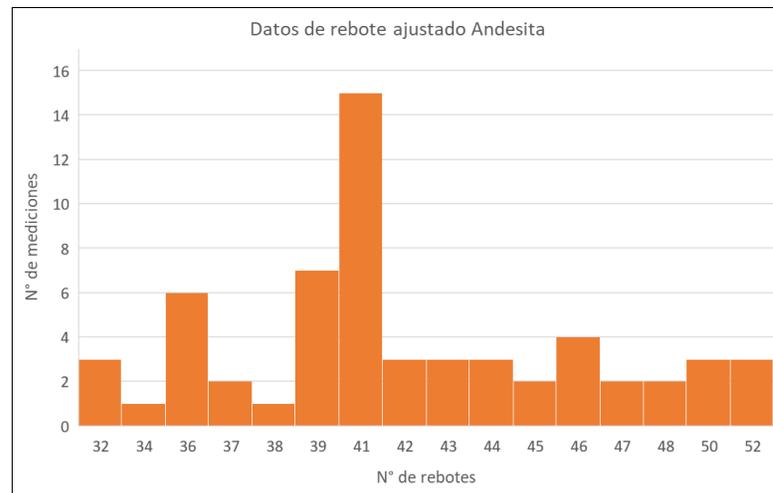


Figura 37. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Andesita.

El resultado del JCS se obtuvo con la totalidad de datos que se tomaron en terreno con Martillo de Schmidt, y considerando que la densidad es igual a $\gamma = 27,16 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) y que el valor obtenido en laboratorio para la andesita de la resistencia a la compresión simple es UCS= 187 MPa.

El JCS calculado para la Andesita con la ecuación de Deere y Miller (1966) dan como resultado valores que se distribuyen entre 58 MPa y 182 MPa (Figura 38).

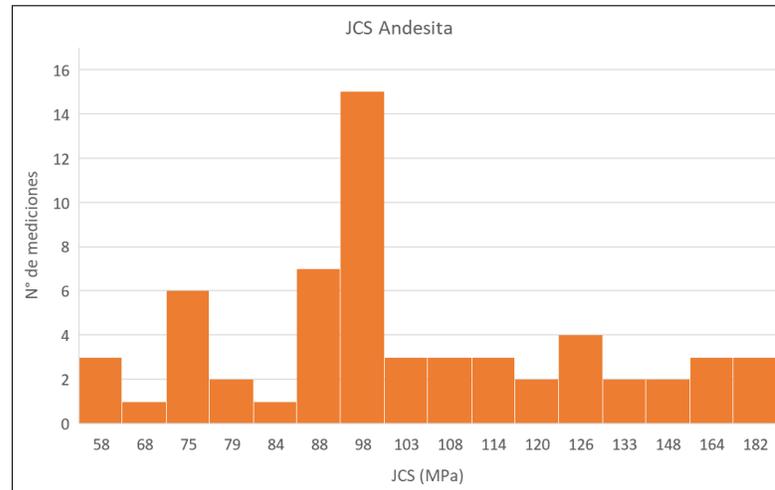


Figura 38. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Andesita.

El promedio de la resistencia a la compresión simple de las estructuras es de 95 MPa, la mediana es de 88 MPa y el valor que más se repite es 75 MPa (Tabla 19).

Tabla 19. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Andesita.

	Rebote ajustado (R_L)	JCS (MPa)
Mínimo	32	58
Máximo	52	182
Promedio	40	95
Mediana	39	88
Moda	36	75

6.3.2. Intrusivo

Se tomaron 60 mediciones con Martillo de Schmidt en terreno para Intrusivo, luego se ajustaron los datos, donde los resultados de los valores del rebote ajustado (R_L) se encuentran en el rango de 43 a 62 rebotes (Figura 39). Además, se obtuvieron las medidas de tendencia central, las cuales dieron como resultado; un promedio de 50 rebotes, mediana de 49 rebotes y el valor que más se repite, es decir, la moda de 46 rebotes (Tabla 20).

El resultado del JCS se calculó con el total de datos tomados en terreno con el Martillo de Schmidt, y considerando que la densidad es igual a $\gamma = 26,18 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) y que el valor obtenido en laboratorio para la granodiorita Río Blanco de la resistencia a la compresión simple es UCS= 166,81 MPa.

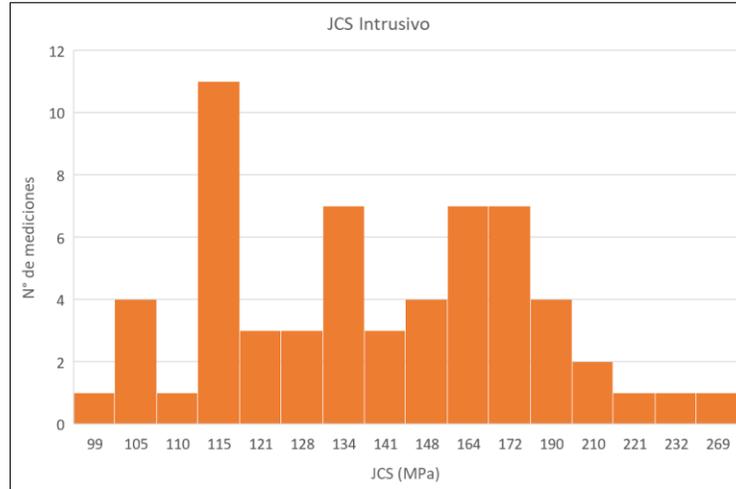


Figura 39. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo.

Los valores obtenidos de JCS fluctúan entre 99 MPa y 269 MPa (Figura 40).

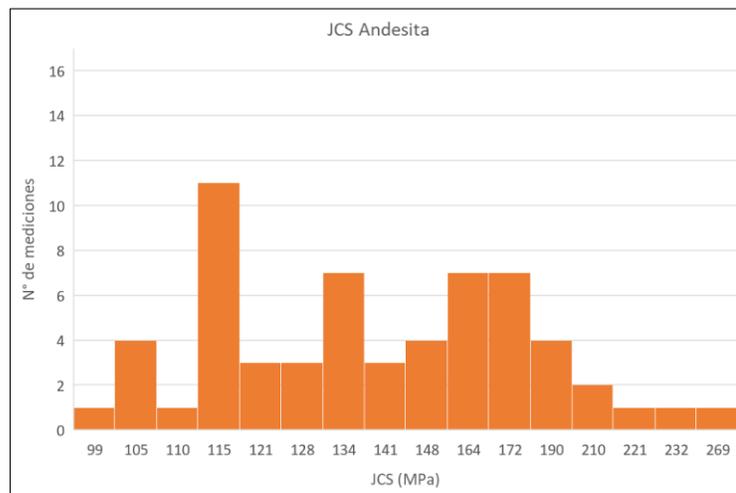


Figura 40. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo.

Se calcularon medidas de tendencia central para el conjunto de datos, donde el promedio del conjunto de este resultó en un valor de 144 MPa, la mediana 138 MPa y la moda de 115 MPa (Tabla 20).

Tabla 20. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Intrusivo.

	Rebote ajustado (R_L)	JCS (MPa)
Mínimo	43	99
Máximo	62	269
Promedio	50	144
Mediana	49	138
Moda	46	115

6.3.3. Intrusivo Duro

Se realizaron 60 mediciones con Martillo de Schmidt en Intrusivo Duro. Los valores que se obtuvieron con la corrección fueron los de rebote ajustado (R_L) que varían de 55 a 70 rebotes (Figura 41). Luego se calculó el promedio, el cual dio como resultado 51 rebotes, además de la mediana y moda que fueron de 50 rebotes.

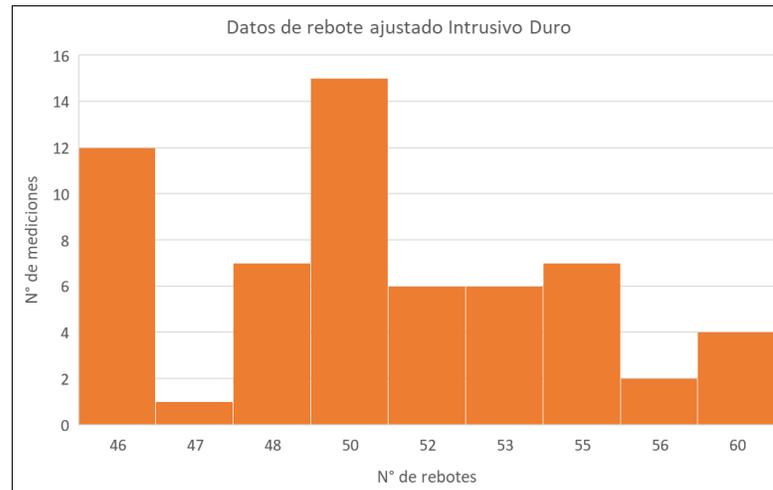


Figura 41. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo Duro.

El resultado del JCS se obtuvo con las 60 medidas de Martillo de Schmidt tomadas en terreno, y considerando que la densidad es igual a $\gamma = 25,89 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) y que el valor de la resistencia a la compresión simple de laboratorio al ensayar probetas para la granodiorita Cascada es de UCS= 161,84 MPa.

Con el valor del rebote ajustado y la densidad, se calculó el JCS, donde los valores se encuentran en el rango de 112 MPa y 235 MPa (Figura 42). También se calculó el promedio de este conjunto

de valores resultando 148 MPa. La mediana y la moda dieron como resultado 144 MPa (Tabla 21).

Tabla 21. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Intrusivo Duro.

	Rebote ajustado (R_L)	JCS (MPa)
Mínimo	55	112
Máximo	70	235
Promedio	51	148
Mediana	50	144
Moda	50	144

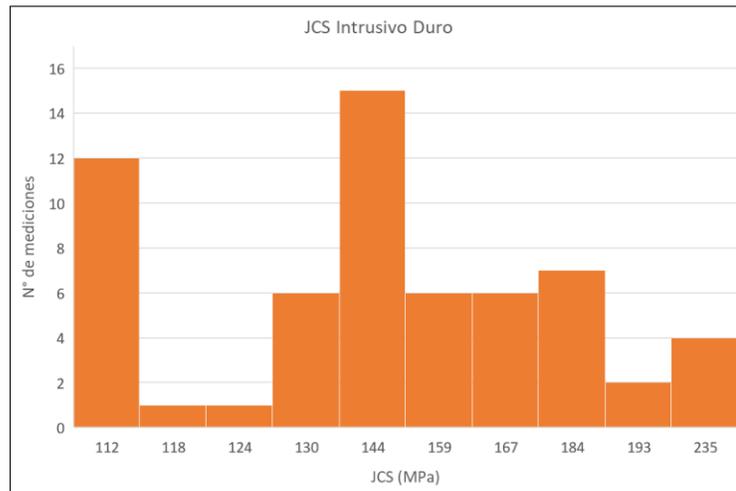


Figura 42. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Intrusivo Duro.

6.3.4. Diorita

Para la Diorita se tomaron 60 medidas de Martillo de Schmidt in situ, dando como resultado los valores de rebote ajustado (R_L), los cuales se encuentran en el rango de 48 a 61 rebotes (Figura 43).

También se calculó el promedio que resultó en 53 rebotes, mediana 52 rebotes y el valor que más se repite es de 50 rebotes (Tabla 22).

El resultado del JCS se calculó con la totalidad de valores tomados en terreno, y considerando que la densidad es igual a $\gamma = 26,28 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) y que el valor de la resistencia a la compresión simple obtenido en laboratorio es de UCS= 175,51 MPa.

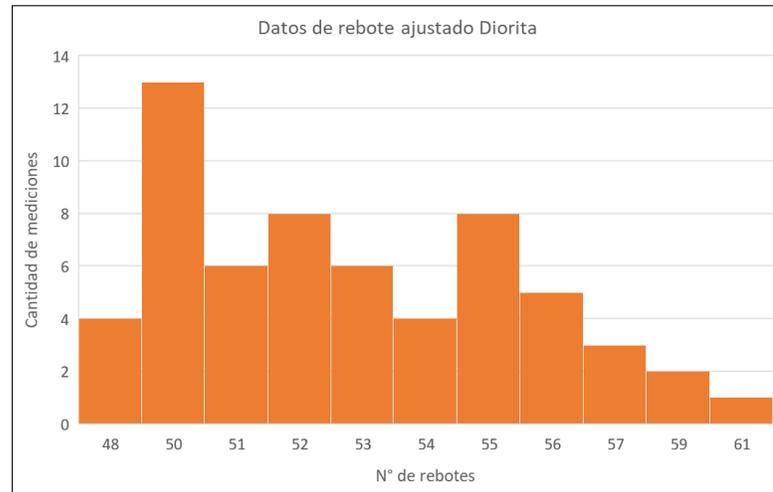


Figura 43. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Diorita.

Tabla 22. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Diorita.

	Rebote ajustado (R_L)	JCS (MPa)
Mínimo	48	135
Máximo	61	259
Promedio	53	174
Mediana	52	165
Moda	50	150

Los valores calculados de JCS fluctúan entre 135 MPa y 259 MPa (Figura 44). Además, el promedio de este conjunto de valores es de 174 MPa, la mediana es de 165 MPa y el valor que más se repite 150 MPa (Tabla 22).

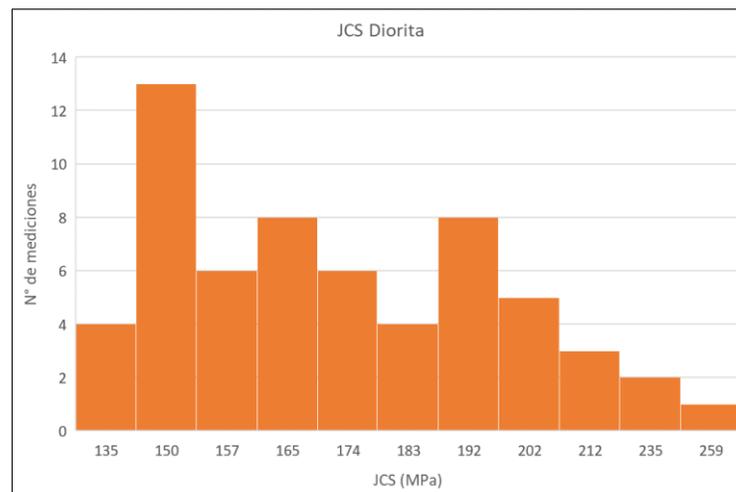


Figura 44. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Diorita.

6.3.5. Pórfido

Al igual que para el ángulo de fricción básico y para JRC, para el Pórfido solo se tomaron mediciones en Pórfido Don Luis.

Se realizaron 60 mediciones con Martillo de Schmidt en terreno, luego se ajustaron los datos, donde los resultados de los valores del rebote ajustado (R_L) se encuentran en el rango de 46 a 59 rebotes (Figura 45). Además, se calcularon las medidas de tendencia central, las cuales dieron como resultado; un promedio de 52 rebotes y mediana y moda 50 rebotes (Tabla 23).

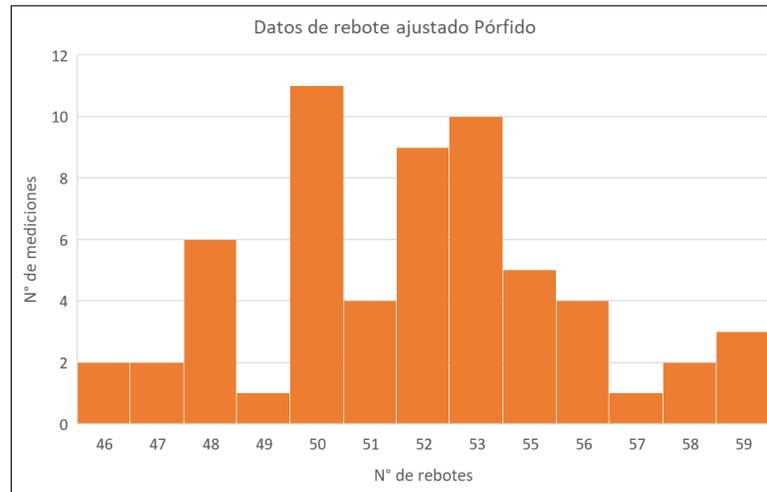


Figura 45. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Pórfido.

El resultado del JCS se obtuvo con las 60 medidas de Martillo de Schmidt que se tomaron en terreno, y considerando que la densidad es igual a $\gamma = 24,81 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) y el valor de la resistencia a la compresión simple obtenido en laboratorio mediante ensayo de probetas para el pórfido es de UCS= 146,13 MPa.

Con el valor del rebote ajustado y la densidad, se calculó el JCS, donde los valores se encuentran entre 102 MPa y 197 MPa (Figura 46).

También se calculó el promedio y mediana de este conjunto de valores que dieron como resultado 142 MPa. La moda tiene un valor de 144 MPa (Tabla 23).

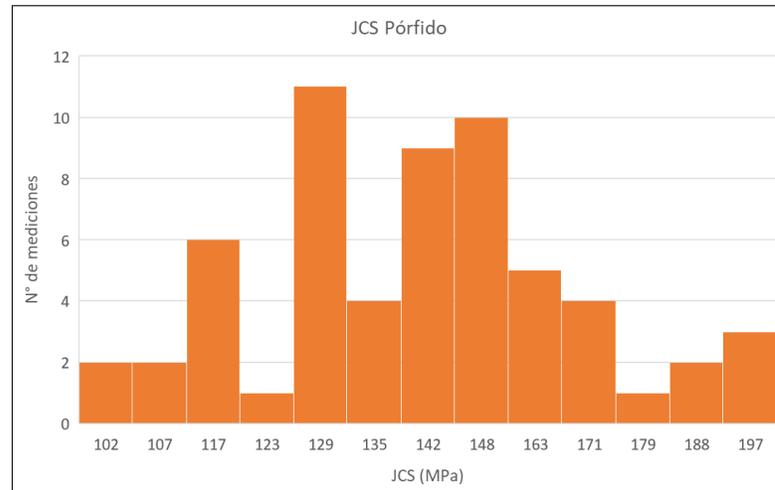


Figura 46. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Pórfido.

Tabla 23. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Pórfido.

	Rebote ajustado (R_L)	JCS (MPa)
Mínimo	46	102
Máximo	59	197
Promedio	52	142
Mediana	52	142
Moda	50	129

6.3.6. Chimenea Dacítica

Se midió 56 veces con Martillo de Schmidt para Chimenea Dacítica in situ. Los valores que se obtuvieron con la corrección fueron los de rebote ajustado (R_L) que varían de 32 a 55 rebotes (Figura 47). Luego se calculó el promedio, la mediana y la moda los cuales dieron como resultado 43 rebotes.

El resultado del JCS fue calculado con la totalidad de datos medidos con Martillo de Schmidt in situ, y considerando que la densidad es igual a $\gamma = 24,03 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) y que el valor de la resistencia a la compresión simple de laboratorio para la Chimenea es UCS= 88,19 MPa.

El JCS calculado para la Andesita con la ecuación de Deere y Miller (1966) dan como resultado valores que se distribuyen entre 48 MPa y 149 MPa (Figura 48).

Además, se calcularon las medidas de tendencia central, donde el promedio, mediana y moda dieron como resultado un valor de 82 MPa (Tabla 24).

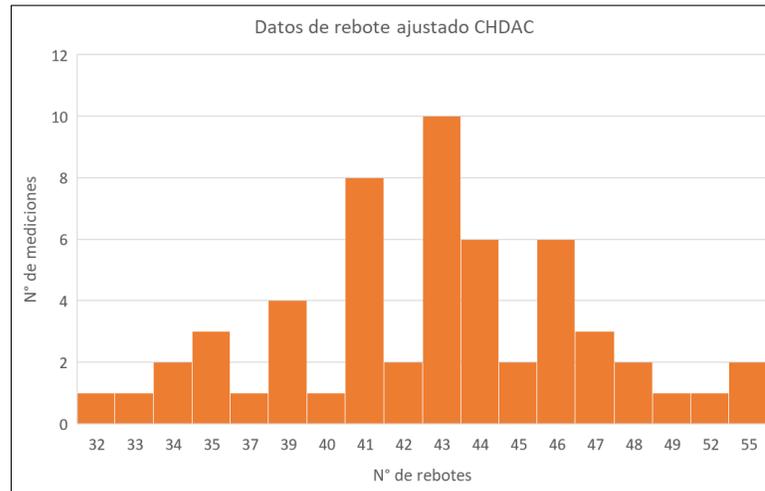


Figura 47. Histograma de rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Chimenea Dacítica.

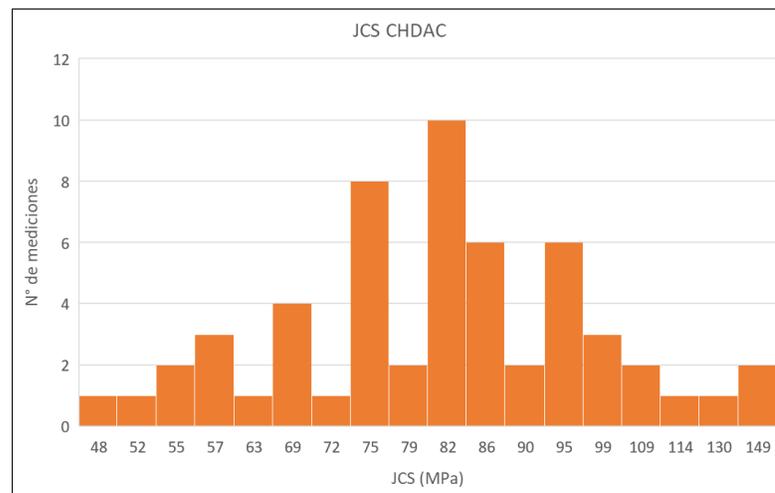


Figura 48. Histograma de JCS calculado con rebote ajustado de Martillo de Schmidt (R_L) para Chimenea Dacítica.

Tabla 24. Resultados de JCS obtenido con Rebote de Martillo de Schmidt Ajustado (R_L) para Chimenea Dacítica.

	Rebote ajustado (R_L)	JCS (MPa)
Mínimo	32	48
Máximo	55	149
Promedio	43	82
Mediana	43	82
Moda	43	82

6.4. Tensión Normal

Para medir el valor de tensión normal se mapean cuñas con el programa *PointStudio* donde se obtiene el valor del volumen y área de cada cuña.

Con el dato de volumen de cada una de las cuñas y la densidad de la unidad litológica obtenida por bibliografía es posible calcular el tonelaje:

$$Ton = V * \gamma$$

Luego para adquirir el valor de tensión normal se debe dividir el valor del tonelaje con el área de la superficie de cada una de las cuñas:

$$\sigma_n = \frac{A}{Ton}$$

6.4.1. Andesita

Se mapearon 20 cuñas de Andesita en el sector de Fase 6 (Figura 49) en el programa *PointStudio*.

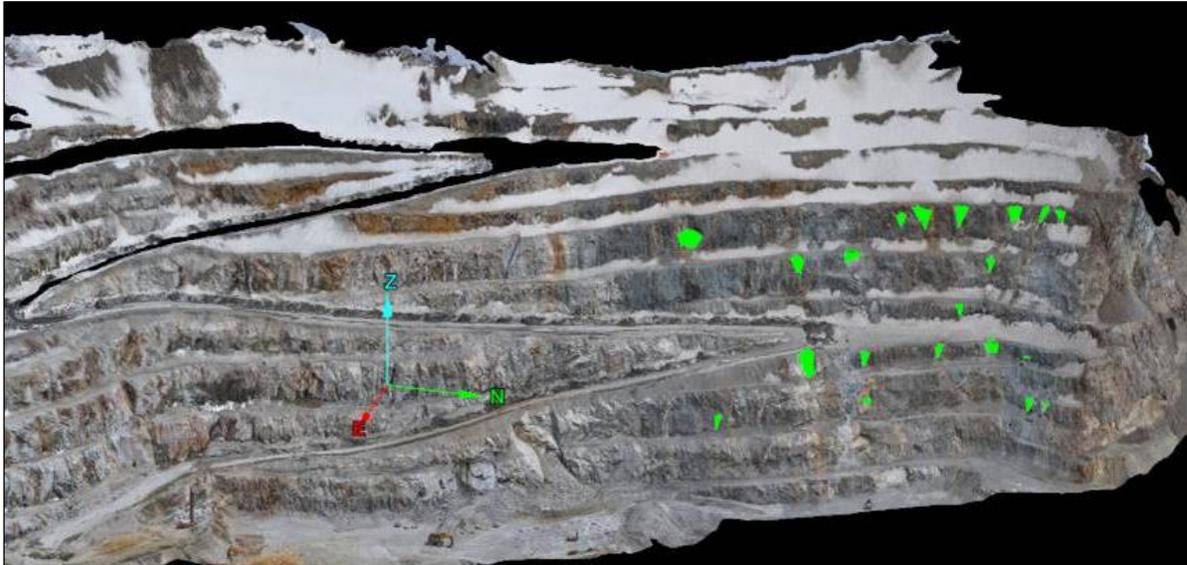


Figura 49. Cuñas de Andesita en Fase 6.

Luego de seleccionadas las cuñas, se obtiene el valor del área y volumen de ellas, además teniendo en cuenta que la densidad de la Andesita es $\gamma = 27,16 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020), es posible | el valor del tonelaje de cada una de las cuñas y además su tensión normal (Tabla).

Tabla 25. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Andesita.

N° cuña	Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)
1	146,386	59,975	1,628921	0,01112757
2	348,076	106,196	2,88428336	0,00828636
3	272,211	134,885	3,6634766	0,01345822
4	290,668	122,026	3,31422616	0,0114021
5	290,265	182,412	4,95430992	0,01706823
6	712,773	660,905	17,9501798	0,02518359
7	244,264	143,241	3,89042556	0,01592713
8	107,576	30,401	0,82569116	0,00767542
9	156,17	59,758	1,62302728	0,0103927
10	159,564	54,277	1,47416332	0,0092387
11	130,284	57,2	1,553552	0,01192435
12	94,049	18,522	0,50305752	0,00534889
13	676,673	274,518	7,45590888	0,01101848
14	408,092	310,129	8,42310364	0,02064021
15	120,084	39,988	1,08607408	0,00904429
16	84,625	22,5	0,6111	0,00722127
17	138,086	60,395	1,6403282	0,01187903
18	30,138	5,188	0,14090608	0,00467536
19	175,254	48,592	1,31975872	0,00753055
20	201,973	100,912	2,74076992	0,01356998

6.4.2. Intrusivo

Se determinaron 20 cuñas en el sector de Fase 6 en Intrusivo (Figura 50).

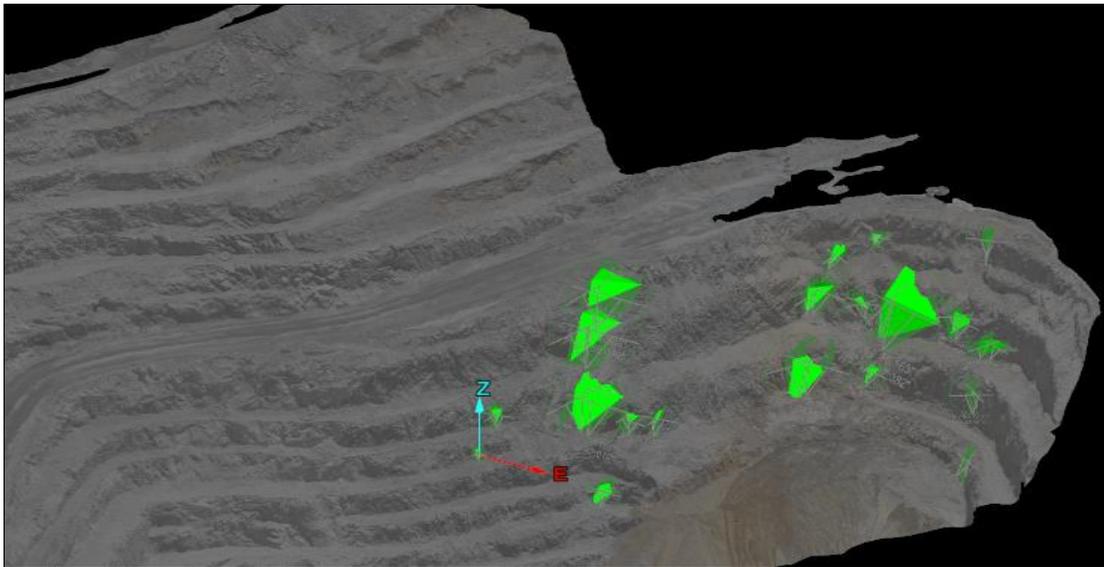


Figura 50. Cuñas en Intrusivo.

Con las cuñas identificadas y tomando en consideración que la densidad de Granodiorita Río Blanco es $\gamma = 26,18 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) es posible calcular el valor del tonelaje y de tensión normal de cada una de las cuñas (Tabla 26).

Tabla 26. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Intrusivo.

N° cuña	Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)
1	46,013	11,882	0,31107076	0,0067605
2	181,57	70,972	1,85804696	0,01023323
3	70,864	26,318	0,68900524	0,00972292
4	75,46	13,262	0,34719916	0,0046011
5	90,208	34,292	0,89776456	0,00995216
6	78,319	13,849	0,36256682	0,00462936
7	108,303	27,872	0,72968896	0,00673748
8	2163,703	4118,298	107,817042	0,04982987
9	202,842	104,755	2,7424859	0,01352031
10	67,981	14,459	0,37853662	0,00556827
11	666,135	527,993	13,8228567	0,02075083
12	775,492	666,278	17,443158	0,02249302
13	701,573	520,662	13,6309312	0,0194291
14	168,793	49,971	1,30824078	0,00775056
15	77,869	25,703	0,67290454	0,00864149
16	1191,81	962,343	25,1941397	0,02113939
17	279,331	219,632	5,74996576	0,02058477
18	167,739	65,535	1,7157063	0,01022843
19	43,792	10,49	0,2746282	0,0062712
20	373,066	306,766	8,03113388	0,02152738

6.4.3. Intrusivo Duro

Se reconocieron 12 cuñas de Intrusivo Duro en el programa *PointStudio* (Figura 51).

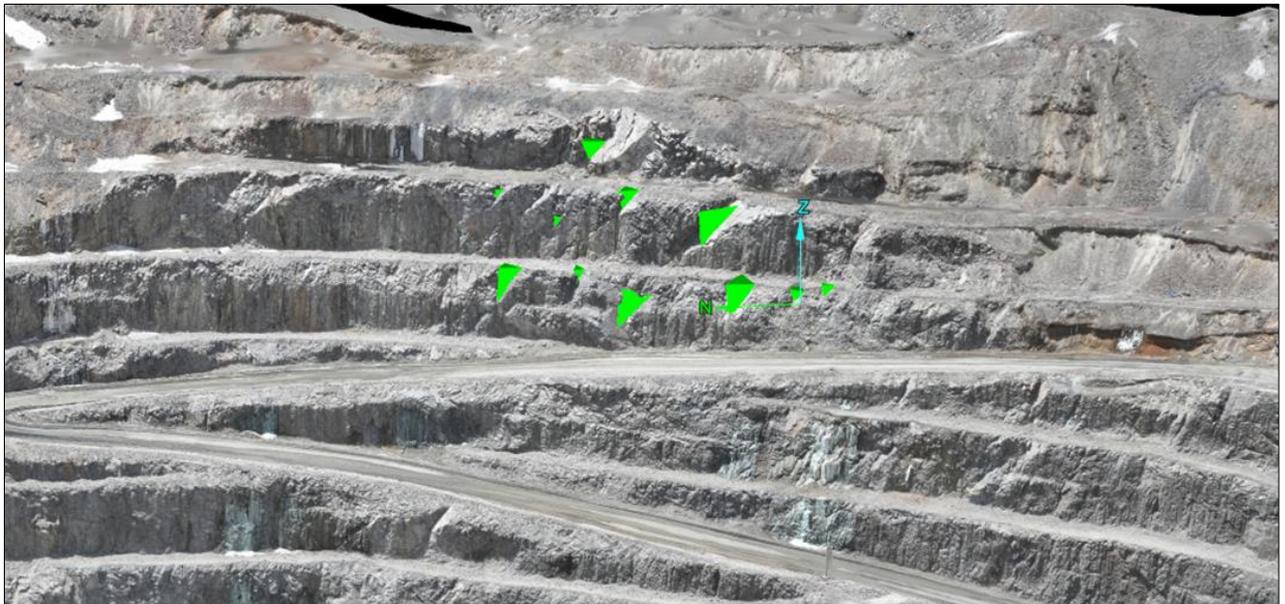


Figura 51. Cuñas de Intrusivo Duro.

Con los datos entregados por el programa y con la densidad del Intrusivo Duro que es $\gamma = 25,89 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) es posible calcular el tonelaje y tensión normal de Granodiorita Cascada (Tabla 27).

Tabla 27. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Intrusivo Duro.

N° cuña	Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)
1	193,096	49,87	1,2911343	0,00668649
2	701,441	548,447	14,1992928	0,02024303
3	337,33	154,706	4,00533834	0,01187365
4	288,107	181,326	4,69453014	0,0162944
5	797,438	719,383	18,6248259	0,02335583
6	620,269	443,107	11,4720402	0,01849527
7	563,988	366,626	9,49194714	0,01683005
8	563,59	224,327	5,80782603	0,01030506
9	235,982	95,24	2,4657636	0,01044895
10	266,389	58,303	1,50946467	0,00566639
11	74,65	18,786	0,48636954	0,00651533
12	364,01	239,053	6,18908217	0,01700251

6.4.4. Diorita

Se identificaron 11 cuñas de Diorita en el sector de Rampa Santa Teresa (Figura 52).

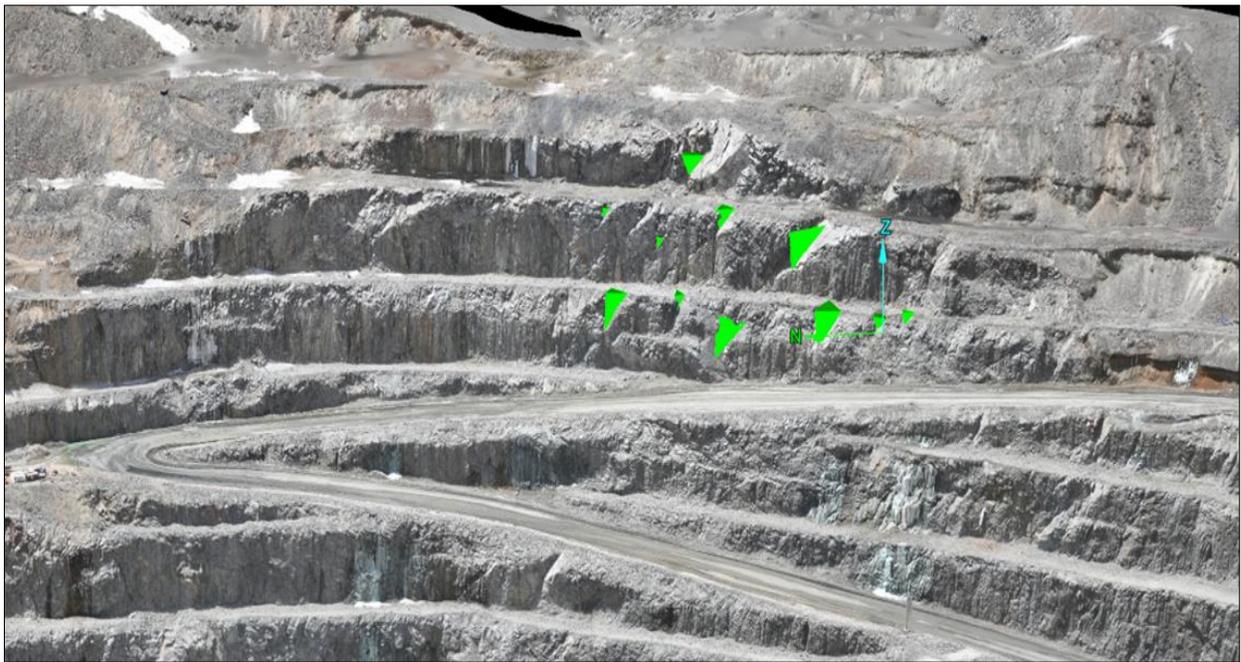


Figura 52. Cuñas en Diorita en Sector Rampa Santa Teresa

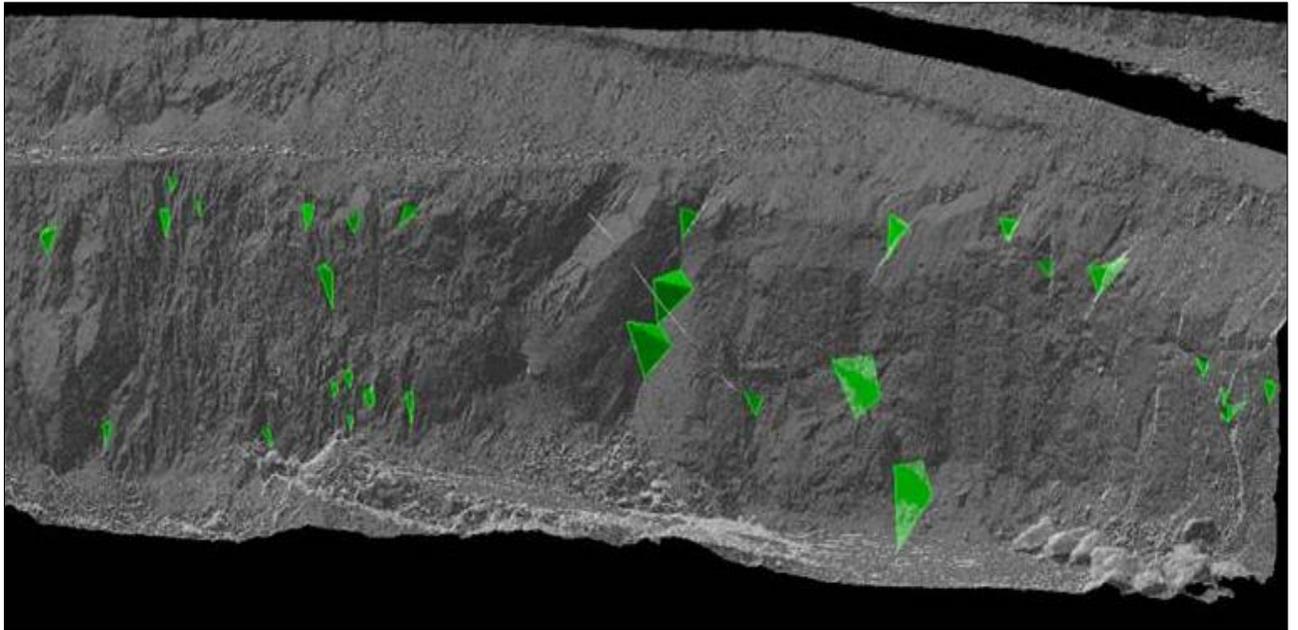
Con el programa *PointStudio* se obtuvo el valor del área y volumen para cada una de las cuñas de este grupo litológico y teniendo en consideración que la densidad de la Diorita en el rajo Don Luis es igual a $\gamma = 26,28 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020). Se pudo calcular el tonelaje y posteriormente la tensión normal de cada una de las cuñas (Tabla 28).

Tabla 28. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Diorita.

N° cuña	Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)
1	669,125	848,625	22,301865	0,03332989
2	184,492	119,772	3,14760816	0,01706095
3	133,802	60,086	1,57906008	0,01180147
4	243,751	136,593	3,58966404	0,01472677
5	367,218	132,517	3,48254676	0,00948359
6	73,581	26,138	0,68690664	0,00933538
7	22,848	3,315	0,0871182	0,00381295
8	39,286	11,584	0,30442752	0,00774901
9	464,058	331,893	8,72214804	0,01879538
10	214,643	113,26	2,9764728	0,01386709
11	67,751	14,575	0,383031	0,00565351

6.4.5. Pórfido

Luego de procesar las imágenes obtenidas con dron, se trabajó en el programa *PointStudio* donde se mapearon 52 cuñas en Pórfido (PDL) en el sector de Fase 6 (Figura 50).

**Figura 53.** Cuñas en Pórfido don Luis en banco 3821.

Con el mismo programa, se obtuvo el valor del volumen de cada una de las cuñas, el cual se multiplicó con la densidad, que en el caso del Pórfido es igual a $\gamma = 24,81 \frac{KN}{m^3}$ y luego con el dato del área también calculado con el mapeo de cuñas se obtiene la tensión normal para cada cuña (Tabla 29).

Tabla 29. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Pórfido.

N° cuña	Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)
1	1,383127	0,178	0,00441618	0,0031929
2	1,239685	0,148	0,00367188	0,00296195
3	2,174182	0,311	0,00771591	0,00354888
4	0,585399	0,063	0,00156303	0,00267003
5	2,11311	0,28	0,0069468	0,00328748
6	0,838693	0,069	0,00171189	0,00204114
7	3,60105	0,523	0,01297563	0,00360329
8	6,761592	1,857	0,04607217	0,00681381
9	14,303522	6,545	0,16238145	0,01135255
10	0,860586	0,088	0,00218328	0,00253697
11	0,506303	0,025	0,00062025	0,001122506
12	2,511614	0,389	0,00965109	0,00384258
13	11,321162	4,337	0,10760097	0,00950441
14	1,493758	0,264	0,00654984	0,00438481
15	0,797868	0,071	0,00176151	0,00220777
16	1,845713	0,239	0,00592959	0,00321263
17	1,593052	0,179	0,00444099	0,00278772
18	24,064092	8,932	0,22160292	0,00920886
19	0,606831	0,041	0,00101721	0,00167627
20	2,278774	0,259	0,00642579	0,00281985
21	0,396426	0,03	0,0007443	0,00187753
22	1,340594	0,138	0,00342378	0,00255393
23	3,582701	0,625	0,01550625	0,00432809
24	1,488958	0,263	0,00652503	0,00438228
25	3,804807	0,792	0,01964952	0,00516439
26	3,138868	0,604	0,01498524	0,00477409
27	3,663263	0,747	0,01853307	0,00505917
28	1,344436	0,127	0,00315087	0,00234364
29	13,727465	5,633	0,13975473	0,01018067
30	20,199388	6,844	0,16979964	0,00840618
31	0,716623	0,053	0,00131493	0,0018349
32	2,8361	0,445	0,01104045	0,00389283
33	1,658278	0,218	0,00540858	0,00326156
34	0,872605	0,105	0,00260505	0,00298537
35	9,235919	4,153	0,10303593	0,011156
36	6,136975	1,345	0,03336945	0,00543744
37	62,029099	38,364	0,95181084	0,01534459
38	20,783818	7,172	0,17793732	0,00856134
39	94,771265	95,915	2,37965115	0,02510942
40	48,223792	29,257	0,72586617	0,01505203
41	103,58371	117,49	2,9149269	0,02814078
42	1,66859	0,144	0,00357264	0,00214111
43	38,220828	22,058	0,54725898	0,01431834
44	27,431105	12,493	0,30995133	0,01129927
45	33,006357	16,827	0,41747787	0,01264841
46	100,020212	108,659	2,69582979	0,02695285
47	90,678428	52,59	1,3047579	0,01438885
48	10,979724	3,079	0,07638999	0,00695737
49	633,572202	486,288	12,0648053	0,01904251
50	17,53362	8,347	0,20708907	0,01181097
51	51,889516	38,08	0,9447648	0,01820724
52	68,835544	55,921	1,38740001	0,02015529

6.4.6. Chimenea Dacítica

Se identificaron en el programa *PointStudio* un total de 11 cuñas para la Chimenea Dacítica en el sector de Fase 5 DF (Figura 52).

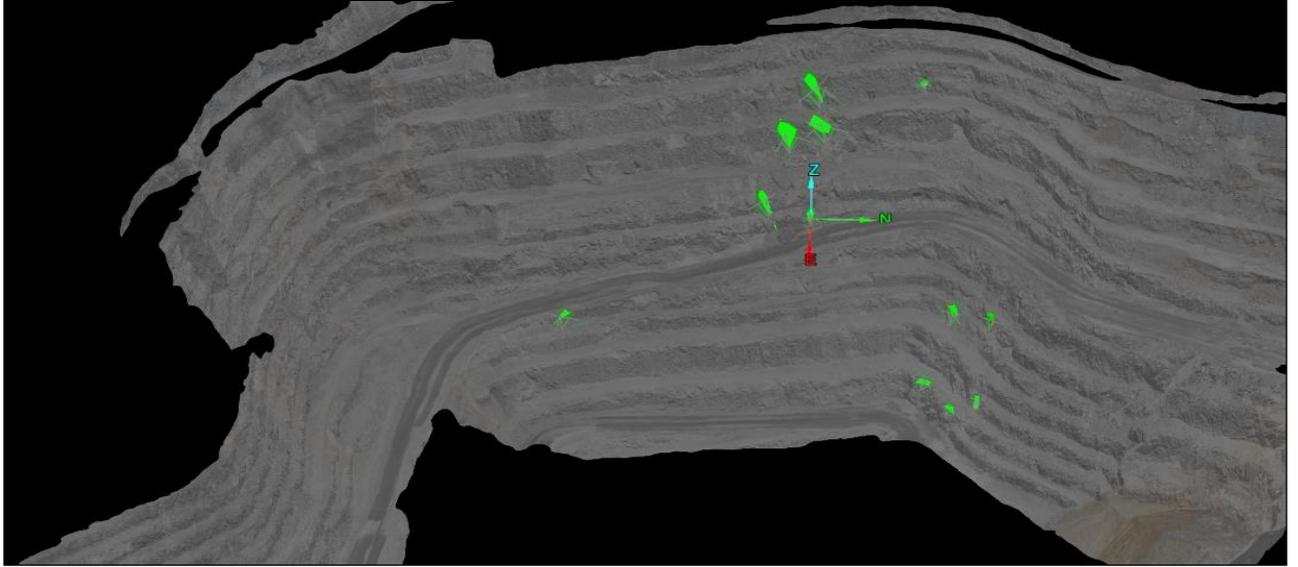


Figura 54. Cuñas en Chimenea Dacítica

Donde con los datos de área y volumen obtenidos con el programa y con la densidad de la Chimenea Dacítica: $\gamma = 24,03 \frac{KN}{m^3}$ (SGEOM, 2020) se calculó el tonelaje y tensión normal para cada una de las cuñas (Tabla 30).

Tabla 30. Área, volumen, tonelaje y tensión normal de Chimenea Dacítica.

N° cuña	Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)
1	249,391	73,139	1,75753017	0,00704729
2	179,746	53,556	1,28695068	0,00715983
3	174,613	51,929	1,24785387	0,0071464
4	208,067	101,638	2,44236114	0,01173834
5	223,467	133,267	3,20240601	0,01433055
6	80,725	30,664	0,73685592	0,00912798
7	616,909	629,857	15,1354637	0,02453435
8	503,372	438,446	10,5358574	0,02093056
9	301,746	119,353	2,86805259	0,00950486
10	377,387	231,751	5,56897653	0,01475667
11	130,341	60,36	1,4504508	0,01112812

6.5. Resistencia al corte mediante Barton Bandis

Con todos los parámetros de la ecuación de Barton Bandis calculados para cada unidad es posible obtener la envolvente de resistencia al corte.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Donde cada curva da como resultado una ecuación en función de σ_n y τ .

6.5.1. Andesita

Con los valores de σ_n calculados para 20 cuñas, $JRC=3$, $JCS= 98$ y $\phi_r = 33$. La ecuación de la envolvente de resistencia al corte resultante es $\tau = 0,8103\sigma_n^{0,9545}$ (Figura 55).

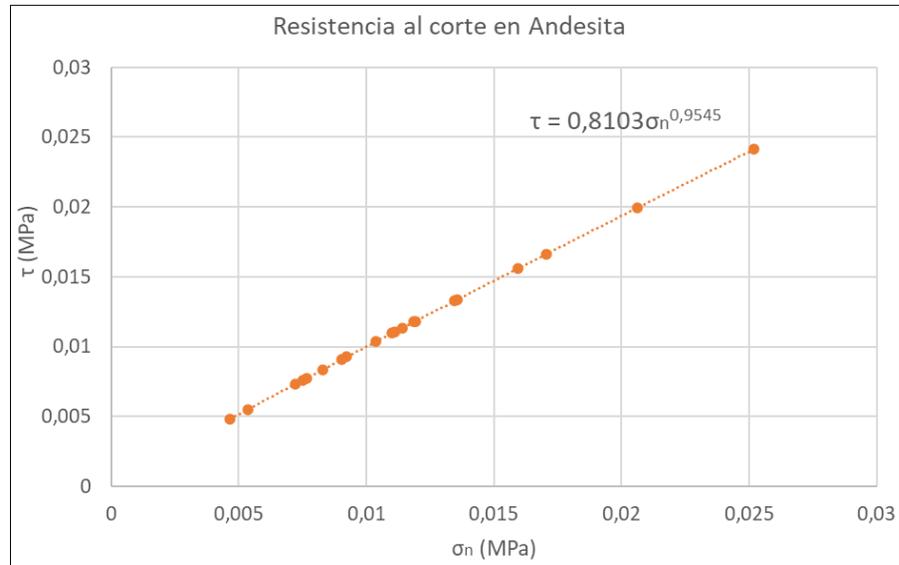


Figura 55. Envolvente de resistencia al corte en Andesita

6.5.2. Intrusivo

Con los valores de σ_n calculados para 20 cuñas, $JRC=3$, $JCS= 138$ y $\phi_r = 31$. La envolvente de resistencia al corte para el Intrusivo es $\tau = 0,7671\sigma_n^{0,9544}$ (Figura 56).

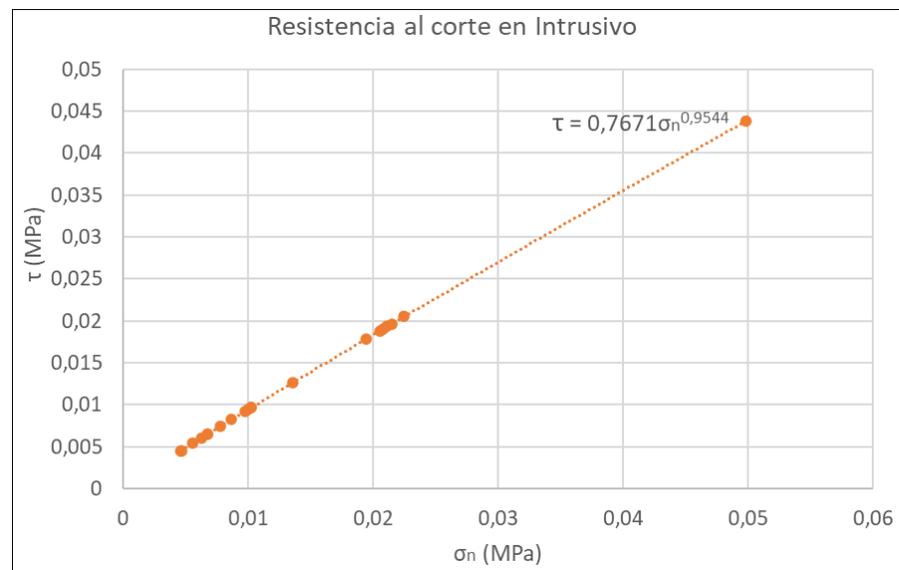


Figura 56. Envolvente de resistencia al corte en Intrusivo

6.5.3. Intrusivo Duro

Con los valores de σ_n calculados para 12 cuñas, $JRC=3$, $JCS= 144$ y $\phi_r = 31$. La envolvente de resistencia al corte para el Intrusivo Duro es $\tau = 0,7687\sigma_n^{0,9544}$

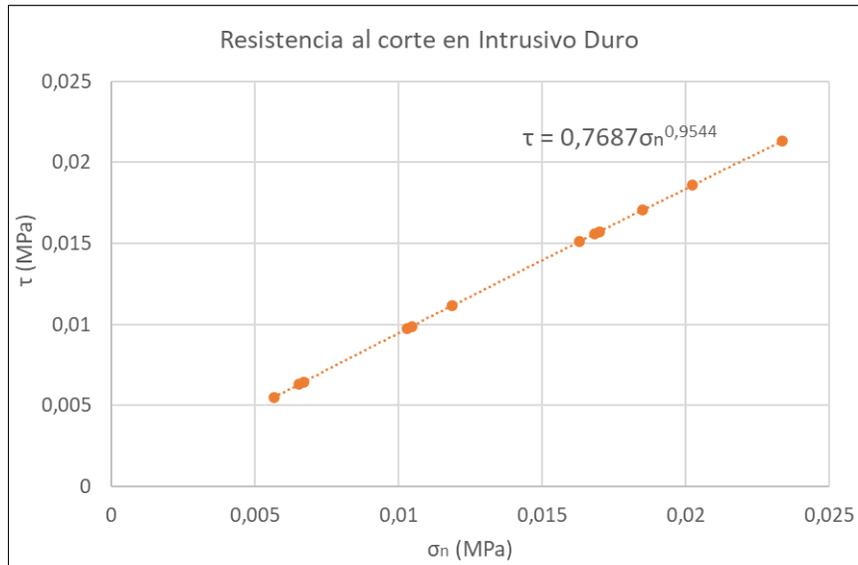


Figura 57. Envolvente de resistencia al corte en Intrusivo Duro

6.5.4. Diorita

Con los valores de σ_n calculados para 11 cuñas, $JRC=3$, $JCS= 165$ y $\phi_r = 31$. La envolvente de resistencia al corte para la Diorita es $\tau = 0,6554\sigma_n^{0,9839}$ (Figura 58).

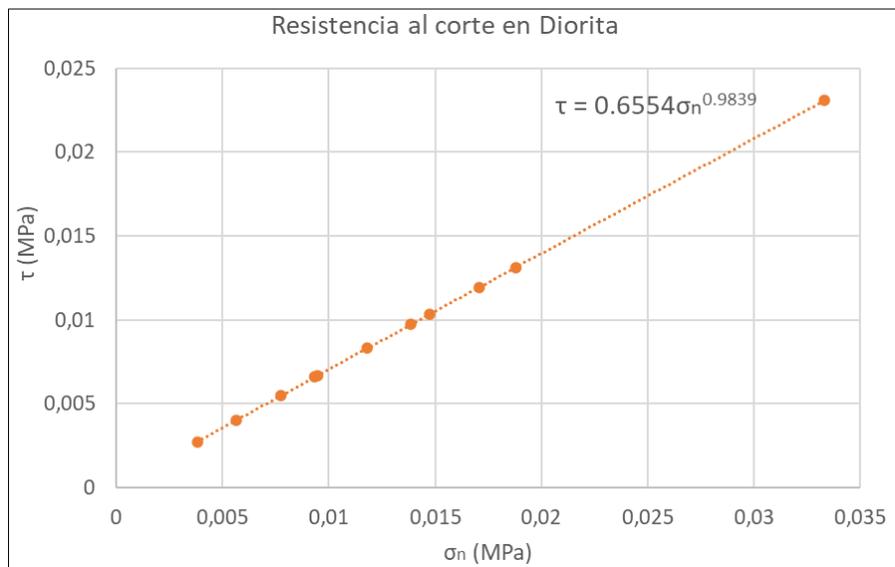


Figura 58. Envolvente de resistencia al corte en Diorita

6.5.5. Pórfido

Con los valores de σ_n calculados para 52 cuñas, $JRC=5$, $JCS= 142$ y $\phi_r = 31$. La envolvente de resistencia al corte para el Pórfido es $\tau = 0,8832\sigma_n^{0,9212}$ (Figura 59).

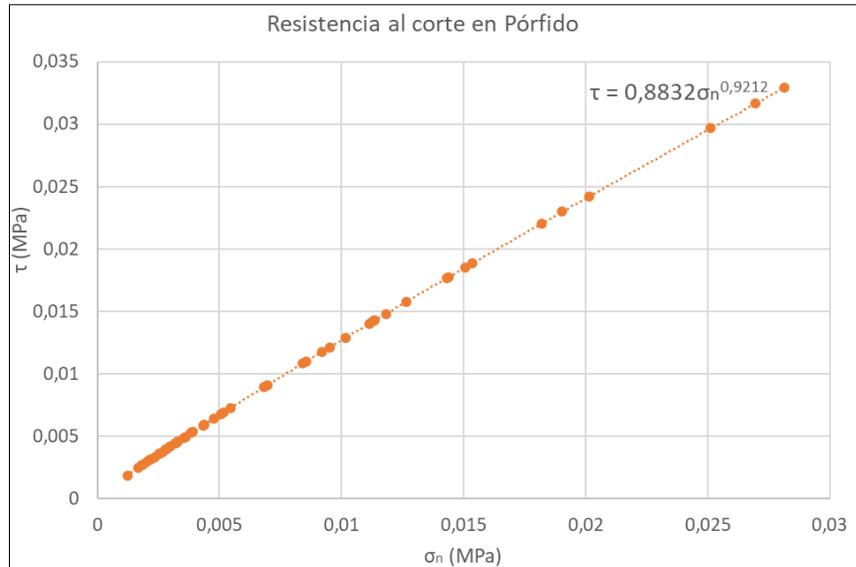


Figura 59. Envolvente de resistencia al corte en Pórfido

6.5.6. Chimenea Dacítica

Con los valores de σ_n calculados para 11 cuñas, $JRC=7$, $JCS= 82$ y $\phi_r = 36$. La envolvente de resistencia al corte para la Chimenea Dacítica es $\tau = 1,0963\sigma_n^{0,8697}$ (Figura 60).

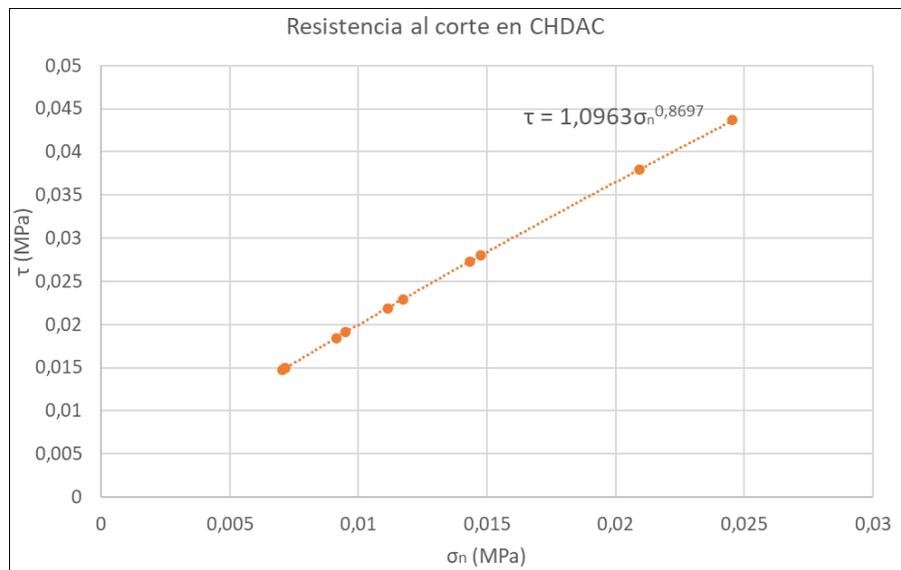


Figura 60. Envolvente de resistencia al corte en Chimenea Dacítica

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones de este estudio son las siguientes:

- Los valores de JRC más altos corresponden a los de Chimenea Dacítica y Pórfido, que su mediana se encuentra en el rango 4-6 y el valor más bajo corresponde a Diorita donde su mediana está en el rango 0-2. Andesita, Intrusivo e Intrusivo Duro su JRC está en el rango de 2-4.
- El ángulo de fricción básico con un valor más alto es el de la Chimenea Dacítica, el cual es de 36°, y los más bajos corresponden a Intrusivo, Intrusivo Duro, Diorita y Pórfido que presentan un ángulo de fricción básico de 31°. Mientras que tanto la Brecha como la Chimenea Riolítica tienen un valor de 32° y la Andesita de 33°.
- El cálculo del JCS con Martillo de Schmidt, dio valores de resistencia altos para Intrusivo (138 MPa), Intrusivo Duro (144 MPa), Diorita (165 MPa) y Pórfido (142 MPa) por lo que según la clasificación de la ISRM son rocas muy duras, en cambio para la Andesita (98 MPa) y Chimenea Dacítica (82 MPa) estos valores son un poco más bajos por lo que están clasificadas como rocas duras.
- Para la andesita los valores medidos con Martillo de Schmidt en terreno de resistencia a la compresión no coinciden con los obtenidos en laboratorio, siendo el valor de terreno considerablemente menor que el de laboratorio. Se sugiere utilizar para futuros cálculos de análisis de estabilidad el valor que fue tomado en terreno con Martillo de Schmidt (88 MPa) debido a que es un valor más acercado a la realidad y más representativo, ya que el valor de laboratorio se obtuvo haciendo pruebas con 6 probetas, además estas probetas son de sectores de la periferia del rajo Don Luis.
- La ecuación de resistencia al corte obtenida mediante el método de Barton Bandis para Andesita es $\tau = 0,8103\sigma_n^{0,9545}$
- La ecuación de resistencia al corte obtenida mediante el método de Barton Bandis para Intrusivo es $\tau = 0,7671\sigma_n^{0,9544}$
- La ecuación de resistencia al corte obtenida mediante el método de Barton Bandis para Intrusivo Duro es $\tau = 0,7687\sigma_n^{0,9544}$
- La ecuación de resistencia al corte obtenida mediante el método de Barton Bandis para Diorita es $\tau = 0,6554\sigma_n^{0,9839}$

- La ecuación de resistencia al corte obtenida mediante el método de Barton Bandis para Pórfido es $\tau = 0,8832\sigma_n^{0,9212}$
- La ecuación de resistencia al corte obtenida mediante el método de Barton Bandis para Chimenea Dacítica es $\tau = 1,0963\sigma_n^{0,8697}$.
- Las mediciones tomadas para cada parámetro de la ecuación de Barton Bandis fueron tomadas en terreno y corresponden a medidas que se ajustan a la realidad de los grupos litológicos del rajo Don Luis, por lo que se sugiere que para estudios posteriores sean aplicadas.
- El método de Barton Bandis utilizado aplica solamente a discontinuidades sin relleno, por lo que este método no es aplicable a las cuñas sobre nivel de banco ya que estas están condicionadas por fallas, solamente se puede utilizar este método para cuñas con una escala menor a un banco es decir menor a 16 m.
- Se recomienda realizar ensayos para obtener ángulos de fricción residual para el método de Mohr Coulomb con el fin de poder realizar comparación entre los 2 métodos.
- Se recomienda hacer escalamiento de JRC a mayor escala mediante análisis de imágenes de vuelos de dron.

8. REFERENCIAS

- AGUIRRE, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central, Provincia de Aconcagua. *Instituto Investigaciones Geológicas Boletín*. Vol. **9**: 1-70. Santiago.
- ALEJANO, L.; GONZÁLEZ, J. & MURALHA, J. 2012. Comparison of Different Techniques of Tilt Testing and Basic Friction Angle Variability Assessment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. **45**: 1.023-1.035.
- ALEJANO, L.; MURALHA, J.; ULUSAY, R.; LI, C.; PÉREZ-REY, I.; KARAKUL, H.; CHRYSSANTHAKIS, P. & AYDAN, O. 2018. ISRM suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of tilt tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. **51**: 3853–3859.
- ÁLVAREZ, P.; AGUIRRE, M.; GODOY, E. & RAMOS, V. 1997. Estratigrafía del Jurásico de la Cordillera Principal de Argentina y Chile (33°45'-34°00'S). Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas **1**: 425-429. Antofagasta.
- ASTM. 2017. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method. Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales. 4 pp.
- AYDIN, A. 2008. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised versión. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Vol. **46** (3):627-634.
- AYDIN, A. & BASU, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*. Vol. **81**: 1-14.
- BAE, D.; KIM, K.; KOH, Y. & KIM, J. 2011. Characterization of joint roughness in granite by applying the scan circle technique to images from a borehole televiewer. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol **44** (4): 497-504.
- BAHAADDINI, M.; SERATI, M.; KHOSRAVI, M.H. & HEBBLEWHITE, B. 2022. Rock joint micro-scale Surface roughness characterisation using photogrammetry method. *Journal of Mining and Environment*. Vol **13** (1): 87-100.
- BANDIS, S.; LUMSDEN, A. & BARTON, N. 1981. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol **18**: 1-21.
- BARTON, N. 1973. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*. Vol **7**: 287-332.
- BARTON, N. 1976. The Shear Strength of Rock and Rock Joints. *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. **13** (1): 225-279.
- BARTON, N. 1981. Shear strength investigations for surface mining. 3rd International Conference on Surface Mining. Actas **1**: 171-196. Vancouver.
- BARTON, N. 1982. Modelling Rock Joint Behavior from In Situ Block Tests: Implications for Nuclear Waste Repository Design. Technical Report for Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH (Inédito): 115 pp. Salt Lake City.
- BARTON, N. & BANDIS, S. 1982. Effects of block size on the shear behavior of jointed rock. 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics. Actas **1**: 739-760. Berkeley.
- BARTON, N. & CHUBEY, V. 1977. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*. Vol. **10** (1): 1-54.
- BARTON, N.; WANG, C. & YONG, R. 2023 (En prensa). Advances in joint roughness coefficient (JRC) and its engineering applications. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

- BECCAR, I.; VERGARA, M. & MUNIZAGA, F. 1986. Edades K-Ar de la Formación Farellones, en el Cordón del Cerro La Parva, Cordillera de los Andes de Santiago, Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **28-29**: 109-113. Santiago.
- BERTENS, A. & HERMOSILLA, J. 2011. Informe de cierre: Programa de Estudio Geocronológico U/Pb, Ar/Ar, Re/Os Yacimiento Río Blanco. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 16 pp. Los Andes.
- BIRO, L. 1964. Estudio sobre el límite Títoniano y el Neocomiano en la Formación Lo Valdés, Provincia de Santiago, principalmente en base a ammonioideos, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 118pp. Santiago.
- BLONDEL, J.; STAMBUK, V & GALEB, M. 1989. Complejo Subvolcánico del Yacimiento Río Blanco, Chile. *Revista Asociación Geológica Argentina*. Vol. **44** (1-4): 56-67. Buenos Aires.
- BORIC, R. & MUNIZAGA, F. 1994. Geocronología Ar-Ar y Rb-Sr del depósito estratoligado de cobre El Soldado (Chile Central). *Revista Comunicaciones*. Universidad de Chile. Vol. **45**: 135-148. Santiago.
- BOYCE, D. 2015. Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile central durante el Cretácico medio-tardío: el registro estructural y sedimentario en la Formación Las Chilcas. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología y Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 296 pp. Santiago.
- BUZZI, O. & CASAGRANDE, D. 2018. A step towards the end of the scale effect conundrum when predicting the shear strength of large in situ discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. **105**: 210-219.
- CALDERÓN, S.; GARRIDO, G.; OLIVEROS, V.; AGUIRRE, L. y VERGARA, M. 2009. Estratigrafía y metamorfismo de las formaciones Río Damas y Lo Valdés y su contacto con unidades cenozoicas, valle del Río Volcán (34°S), Chile Central. Congreso Geológico Chileno N° 22. Actas **1**: 1-10. Santiago.
- CAMPBELL, D. 2005. Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocín y Aconcagua: implicancias en la evolución meso-cenozoica de la zona. Tesis para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología. 113 pp. Santiago.
- CARTER, W.D. & AGUIRRE, L. 1965. Structural geology of Aconcagua Province and its relationship to the central valley graben, Chile. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. **76**: 651-664.
- CEPEDA, A. 1974. Geología del área del Yacimiento Río Blanco, Provincia de Aconcagua, Instituto de Investigaciones Geológicas (Inédito): 14 pp. Santiago.
- CHARRIER, R.; BAEZA, O.; ELGUETA, S.; FLYNN, J.J.; GANS, P.; KAY, S.M.; MUÑOZ, N.; WYSS, A.R. & ZURITA, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern central Andes, Chile (33°-36°S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **15** (1): 117-139.
- COCHILCO, 2016. Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. Dirección de Estudios y políticas públicas (Inédito): 61 pp. Santiago.

- COVACEVICH, V. 1975. Faunas fósiles neocomianas del área Melipilla-Aculeo, Cordillera de la Costa, provincia de Santiago. Instituto Investigaciones Geológicas (Inédito): 21 pp. Santiago.
- COVACEVICH, V. 1994. Informe paleontológico de la Hoja Santiago (2213), Parte 1. Muestras de terreno colectadas por Renate Wall. Servicio Nacional de Geología y Minería (Inédito): 13 pp. Santiago.
- DECKART, K.; CLARK, A. & CUADRA, P. 2013. Refinement of the time-space evolution of the giant Mio-Pliocene Río Blanco-Los Bronces porphyry Cu–Mo cluster, Central Chile: new U–Pb (SHRIMP II) and Re–Os geochronology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology data. *Mineralium Deposita*. Vol. **48**: 57-79.
- DECKART, K.; CLARK, A.H.; CELSO, A.A.; RICARDO, V.R.; BERTENS, A.N.; MORTENSEN, J.K. & FANNING, M. 2005. Magmatic and hydrothermal chronology of the giant Rio Blanco porphyry copper deposit, central Chile: implications of an integrated U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ database. *Economic Geology*. Vol. **100** (5): 905-934.
- DEERE D. & MILLER, R. 1966. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Technical Report for Air Force Weapon Laboratory (Inédito): 327 pp. Nuevo México.
- DÍAZ, C. & SOLÉ, C. 2014. Anexo 5: Asociaciones de Alteración. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geología, CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 16 pp. Los Andes.
- DRAKE, R.E.; CURTIS, G. & VERGARA, M. 1976. Potassium-argon dating of igneous activity in the central Chilean Andes-latitude 33°S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **1**: 285-295
- EQUIPO GEOMECÁNICA MINAS RAJO Y SUBTERRÁNEA, 2022. Informe de caracterización geotécnica y revisión geomecánica PLAN 2023-2027, Diciembre 2022. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 58 pp. Los Andes.
- ESPINOZA, A. 2019. Backanalysis Propiedades de Resistencia al Corte de Estructuras en Mina Rajo. Nota Interna Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 7 pp. Los Andes.
- FARIAS, E. 2006. Backanalysis Cuñas Mina Don Luis. Nota Interna Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 30 pp. Los Andes.
- FOCK, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile. Departamento de Geología (Inédito): 179 pp. Santiago.
- FOCK, A.; CHARRIER, R.; MAKSAEV, V.; FARÍAS, M. & ÁLVAREZ, P. 2006. Evolución cenozoica de los Andes de Chile central (33-34°S). Congreso Geológico Chileno N° 11. Actas **1**: 205 - 208. Antofagasta.
- FRIKKEN, P. 2003. Breccia-hosted copper-molybdenum mineralisation at Río Blanco, Chile. PhD Thesis. Universidad de Tasmania (Inédito): 290 pp. Tasmania.
- FRIKKEN, P.; COOKE, D.; WALSH, J.; ARCHIBALD, D.; SKARMETA, J.; SERRANO, L. & VARGAS, R. 2005. Mineralogical and Isotopic Zonation in the Sur-Sur Tourmaline Breccia, Río Blanco-Los Bronces Cu-Mo Deposit, Chile: Implications for Ore Genesis. *Economic Geology*. Vol. **100**: 935-961.

- FUENTES, F. 2004. Petrología y metamorfismo de muy bajo grado de unidades volcánicas oligoceno–miocenas en la ladera occidental de los Andes de Chile central (33°S). Tesis para optar al grado de Doctor en ciencias mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 398 pp. Santiago.
- GANNA, P. & WALL, R. 1997. Evidencias geocronológicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K/Ar de un hiatus Cretácico Superior - Eoceno en Chile central (33°00'-33°30'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **24** (2): 145-163. Santiago.
- GE, Y.; KULATILAKE, P.H.S.W.; TANG, H. & XIONG, C. 2014. Investigation of natural rock joint roughness. *Computers Geotechnics*. Vol. **55**: 290-305.
- GIAMBIAGI, L. & RAMOS, V. 2002. Structural evolution of the Andes between 33°30' and 33°45'S, above the transition zone between the flat and normal subduction segment, Argentina and Chile. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **15**: 101–116.
- GIAMBIAGI, L.; TUNIK, M. & GHIGLIONE, M. 2001. Cenozoic tectonic evolution of the Alto Tunuyán foreland basin above the transition zone between the flat and normal subduction segment (33°30'S-34°S), western Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **14**: 707-724.
- GODOY, E. 1981. Sobre la discordancia intrasenoniana y el origen de los depósitos de caolín de Montenegro, Región Metropolitana, Chile. Congreso Geológico Argentino N° 8. Actas **1**: 233-241. San Luis.
- GODOY, E.; SCHILLING, M.; SOLARI, M. & FOCK, A. 2009. Geología del área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua. Mapa escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería: 50pp. Santiago.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall: 715 pp. Madrid.
- GONZÁLEZ, O. 1963. Observaciones geológicas en el valle del río Volcán. *Revista Minerale*. Vol. **18** (81): 20-61. Santiago.
- GONZÁLEZ, O. & VERGARA, M. 1962. Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35° y 38° latitud sur. Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile. Vol. **19** (19):19-121. Santiago.
- GRASSELLI, G. 2001. Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description. PhD Thesis. Ecole Polytechnique Federale De Lausanne (Inédito): 126 pp. Ecublens.
- GROEBER, P. 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. 1. Hoja Chos Malal. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. **1** (3): 177-208. Buenos Aires.
- HALLAM, A.; BIRÓ, L. & PÉREZ, E. 1986. Facies analysis of the Lo Valdés Formation (Tithonian–Hauterivian) of the high Cordillera of central Chile, and the palaeogeographic evolution of the Andean Basin. *Geological Magazine*. Vol. **123** (4): 425-435.
- HENCHER, S.R. & RICHARDS, L.R. 2015. Assessing the shear strength of rock discontinuities at laboratory and field scales. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. **48**: 883-905.
- HERMOSILLA, J. 2015. Caracterización geológica y cronológica de los eventos de intrusión/brechización y alteración/mineralización del yacimiento Río Blanco, Región de Valparaíso, Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Geología Económica mención Exploración Minera. Universidad Católica del Norte. Departamento de Ciencias de la Ingeniería (Inédito): 181 pp. Antofagasta.

- HIRSCH, D. 2022. Análisis Retrospectivo de Inestabilidades. Presentación Práctica Profesional. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 21 pp. Los Andes.
- HOFFSTETTER, R.; FUENZALIDA, H. & CECIONI, G. 1957. *Léxique Stratigraphique International*, Amérique Latine, Chili-Chile. Centre National de la Recherche Scientifique, Vol. 7: 444 pp. Paris.
- ISRM, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomechanics Abstract*. Vol. 15: 319-368.
- JANG, H.; ZHANG, Q.; KANG, S. & JANG, B. 2018. Determination of the basic friction angle of rock surfaces by tilt tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 51: 989-1.004.
- JARA, P. 2013. Tectónica mezo-cenozoica en la Cordillera Principal de Chile Central entre 32° y 33°S. Análisis a partir de nuevos antecedentes de campo y modelamiento analógico. Memoria para optar al grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología (inédito): 331pp. Santiago.
- KARZULOVIC, A. 2007. Resistencia al corte de estructuras para efectos de análisis de estabilidad de taludes. Nota Geotécnica para Proyecto de Expansión de División Andina. A. Karzulovic & Asoc. Ltda (Inédito): 19 pp. Santiago.
- KLOHN, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, provincia de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto Investigaciones Geológicas Boletín. Vol. 8: 1-95.
- KROHN, C.E. & THOMPSON, A.H., 1986. Fractal sandstone pores: automated measurements using scanning-electron-microscope images. *Physical Review B*. Vol. 33 (9). 6.366-6.374.
- KURTZ, A.; KAY, S.; TITTLER, A.; MPODOZIS, C. & GODOY, E. 1995. Neogene magmatism in the Andean Cordillera (26° to 34°S): Evidence for spatial and temporal changes in crustal thickness. *Eos Earth & Space Science News*. Vol. 76 (17): 272 pp.
- LÓPEZ, L. & VERGARA, M. 1982. Geoquímica y Petrogénesis de Rocas Granodioríticas asociadas con el Yacimiento Cuprífero Río Blanco-Los Bronces. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 15: 59-70. Santiago.
- LI, C.; ZHANG, N. & RUIZ, J.; 2017. Measurement of the basic friction angle of planar rock discontinuities with three rock cores. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 78: 847-856.
- LIU, Q.; TIAN, Y.; LIU, D. & JIANG, Y. 2017. Updates to JRC-JCS model for estimating the peak shear strength of rock joints based on quantified surface description. *Engineering Geology*. Vol. 228: 282-300.
- MACHUCA, C. 2017. Estratigrafía y Estructuras de la Zona de Falla Pocuro entre los 32°30' y los 33°S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 116pp. Santiago.
- MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F.; MCWILLIAMS, M.; FANNING, M.; MATHUR, R.; RUIZ, J. & ZENTILLI, M. 2004. New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U-Pb, ⁴⁰Ar/³⁹Ar, Re-Os and fission-track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. 11: 15-54.
- MALDONADO, L.; HERMOSILLA, J.; DÍAZ, C. & SOLÉ, M. 2014. Anexo 2: Unidades Litológicas. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo.

- Superintendencia de Geología, CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 21 pp. Los Andes.
- MARDONES, V. 2016. Análisis estructural de los depósitos Mesozoicos y Cenozoicos en la Cordillera Principal en el valle del río Volcán, Región Metropolitana, Chile (33°44'S-35°56'S). Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 140 pp. Santiago.
- MARDONES, V. 2019. Evolución tectónica meso-cenozoica de la cordillera principal de Los Andes de Chile Central, 33° 30'S-34° S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 146 pp. Santiago.
- MARTÍNEZ, R., & OSORIO, R. 1963. Consideraciones preliminares sobre la presencia de Carófitas fósiles en la Formación Colimapu. *Revista Minerale*s. Vol. **82**: 28-43. Santiago.
- MOSCOSO, R.; PADILLA, H. & RIVANO, S. 1982. Hoja Los Andes, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Cartas Geológicas de Chile*. Vol. **52**: 1-67. Santiago.
- MUNIZAGA, F. & VICENTE, J.C. 1982. Acerca de la zonación plutónica y del volcanismo miocénico en los Andes de Aconcagua (Lat. 32-33°S): datos radiométricos K-Ar. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **16**: 3-21. Santiago.
- NASI, C. & THIELE, R. 1982. Estratigrafía del Jurásico y Cretácico de la Cordillera de la Costa, al sur del río Maipo, entre Melipilla y laguna de Aculeo (Chile Central). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **16**: 81-89. Santiago.
- PALMA, W. 1991. Estratigrafía y estructura de la Formación Colimapu entre el Estero del diablo y el Cordón Los Lunes, región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 95 pp. Santiago.
- PIQUER, J; SKARMETA, J & COOKE, D.R. 2015. Structural Evolution of the Rio Blanco-Los Bronces District, Andes of Central Chile: Control son Stratigraphy, Magmatism, and Mineralization. *Economic Geology*. Vol. **110** (8): 1.995-2.023.
- PIQUER, J.; BERRY, R.; SCOTT, R. & COOKE, D. 2016. Arc-oblique fault systems: their role in the Cenozoic structural evolution and metallogenesis of the Andes of central Chile. *Journal of Structural Geology*. Vol. **89**: 101-117.
- PIQUER, J.; CASTELLI, J. C.; CHARRIER, R., & YÁÑEZ, G. 2010. El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile central: estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas. *Andean geology*. Vol. **37** (1): 32-53. Santiago.
- PIRACES, R. & MAKSAEV, V. 1977. Geología de la Hoja Quillota, Instituto de Investigaciones Geológicas- Comisión Chilena de Energía Nuclear (Inédito): 140 pp. Santiago.
- POLANSKI, J. 1962. Estratigrafía neotectónica y geomorfología del Pleistoceno pedemontano entre los ríos Diamante y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. **27** (3-4): 127-149. Buenos Aires.
- RISSETTO, U. 2015. Evolución del borde occidental de la cuenca de Abanico en el extremo sur de Santiago (33°36'S-33°58'S). Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile. Departamento de Geología (Inédito): 119 pp. Santiago.
- RIVANO, S.; GODOY, E.; VERGARA, M. & VILLARROEL, R. 1990. Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32-34°S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **17** (2): 205-214. Santiago.

- RIVANO, S. 1996. Geología de las hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología de Chile: 232 pp. Santiago.
- ROSSEL, P.; OLIVEROS, V.; MESCUA, J.; TAPIA, F.; DUCEA, M. N.; CALDERÓN, S. & HOFFMAN, D. 2014. The Upper Jurassic volcanism of the Río Damas-Tordillo Formation (33°-35,5°S): Insights on petrogenesis, chronology, provenance and tectonic implications. *Andean Geology*. Vol. **41** (3): 529-557. Santiago.
- SALAZAR, C. 2012. The Jurassic-Cretaceous boundary (Tithonian-Hauterivian) in the Andean Basin, central Chile: Ammonite fauna, bio- and sequence stratigraphy and palaeobiogeography. Dr. rer. nat. Thesis. Universität Heidelberg (Inédito): 388 pp. Heidelberg.
- SALAZAR, C. & STINNESBECK, W. 2015. Redefinition, stratigraphy and facies of the Lo Valdés and Baños Morales formations (Upper Jurassic – Lower Cretaceous) in central Chile. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*. Vol. **64**: 41-68. Santiago.
- SARIC, N.; KREFT, C. & HUETE, C. 2003. Geología del yacimiento Lo Aguirre, Chile. *Andean Geology*. Vol. **30** (2): 317-331. Santiago.
- SELLÉS, D. 2000. La relación discordante entre las Formaciones Abanico y Las Chilcas en la localidad de Angostura: implicancias regionales. Congreso Geológico N° 9 Chileno. Actas **1**: 555-558. Puerto Varas.
- SELLÉS, D. & GANA, P. 2001. Geología del área Talagante - San Francisco de Mostazal, regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería: 30 pp. Santiago.
- SERRANO, L.; VARGAS, R.; STAMBUK, V.; AGUILAR, C.; GALEB, M.; HOLMGREN, C.; CONTRERAS, A.; GODOY, S.; VELA, I.; SKEWES, A.M. & STERN, C.R. 1996. The late Miocene to early Pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. **5**: 119-130.
- SGEOM. 2020. Roca Intacta y Actualización de Propiedades Escaladas para Macizo Rocosos de Grupos Litológicos Mina Rajo Abierto DAND Diciembre 2020. Superintendencia de Geomecánica, CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 45 pp. Los Andes.
- SKARMETA, J.; ORTIZ, F.; GALLARDO, A. & SOLÉ, M. 2017. Modelo estructural, División Andina 2017. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica, CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 52 pp. Los Andes.
- SKEWES, M.A. & HOLMGREN, C. 1993. Solevantamiento andino, erosión y emplazamiento de brechas mineralizadas en el depósito de cobre porfídico Los Bronces, Chile central (33°S): aplicación de geotermometría de inclusiones fluidas. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **20** (1): 71-83. Santiago.
- SKEWES, M. A. & STERN, C. 1997, Late Miocene mineralized breccias in the Andes of central Chile: Sr- and Nd-isotopic evidence for multiple magmatic sources. *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny*. Vol. **5**: 33-42.
- SRUOGA, P.; ETCHEVERRÍA, M.; FOLGUERA & A., REPOL, D., 2005. Hoja Geológica 3569-I Volcán Maipo. *Boletín del Servicio Geológico Minero Argentino*. Vol. **290**: 116 pp. Buenos Aires.
- STAMBUK, V.; BLONDEL, J. & SERRANO, L. 1982. Geología del Yacimiento Río Blanco. Congreso Geológico Chileno N° 3. Actas **2**: 419-442. Concepción.
- STAMBUK, V.; SERRANO, L. & VARGAS, R. 1985. Geología del sector Sur-Sur, yacimiento Río Blanco. Congreso Geológico Chileno N° 4. Actas **2**: 383-404. Antofagasta.

- STERN, C. R.; AMINI, H.; CHARRIER, R.; GODOY, E.; HERVÉ, F. & VARELA, J. 1984. Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the Rio Maipo and Rio Cachapoal (Chile) and the Rio Yaucha and Rio Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **23**: 39-52. Santiago.
- STIMPSON, B. 1981. A Suggested Technique for Determining the Basic Friction Angle of Rock Surfaces Using Core. *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract*. Vol. **18**: 63-65.
- SUAZO, H. 2010. Procedimiento para la descripción general de muestras petrocalcográficas. CODELCO Chile, División Andina (Informe inédito): 58 pp. Los Andes.
- TANG, Z.; PENG, M. & XIAO, S. 2022. Basic friction angle of granite fracture after heating and rapid cooling treatments. *Engineering Geology*. Vol. **302**: 106.626.
- TANG, Z.; ZHANG, Q. & PENG, J. 2019. Effect of Thermal Treatment on the Basic Friction Angle of Rock Joint. *Rock Mechanics and Engineering*. Vol. **53**: 1973-1990.
- TAPIA, F. 2015. Evolución Tectónica y configuración actual de los Andes Centrales del sur (34°45'-35°30'S). Tesis para Optar al Grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 306 pp. Santiago
- TAVERA, J. 1968. Informe sobre estudio de material paleontológico procedente del curso superior del río Yeso, recolectado por el geólogo Sr. Ricardo Thiele. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 9 pp. Santiago.
- THIELE, R. 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. *Carta Geológica de Chile*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Vol. **39**, 1 mapa 1:250.000, 51 pp. Santiago.
- THIELE, R. & KATSUI, Y. 1969. Contribución al conocimiento del volcanismo post-miocénico de los Andes en la provincia de Santiago, Chile. Universidad de Chile. Departamento de Geología, Publicación. Vol. **35**: 23 pp. Santiago
- THOMAS, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de Barriga. *Instituto de Investigaciones Geológicas Boletín*. Vol. **2**: 1-80. Santiago.
- TORO, J.C.; ORTÚZAR, J.; ZAMORANO, J.; CUADRA, P.; HERMOSILLA, J. & SPRÖHNLE, C. 2012. Protracted magmatic-hydrothermal history of the Río Blanco-Los Bronces district, Central Chile: development of world's greatest known concentration of copper. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. **16**: 105-126.
- VARGAS, R.; GUSTAFSON, L.B.; VUKASOVIC, M.; TIDY, E. & SKEWES, M.A. 1999. Ore Breccias in the Río Blanco-Los Bronces porphyry copper deposit, Chile. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. **7**: 281-297.
- VERGARA, M. & DRAKE, R. 1979. Edades de K/Ar en Secuencias Volcánicas Continentales Post-Neocomianas de Chile Central: su Depositación en Cuencas Intermontañas Restringidas. *Revista de la Asociación Geológica de Argentina*. Vol. **24** (1): 42-52. Buenos Aires.
- VERGARA, M. & LATORRE, J. 1984. El complejo volcánico pliocénico de Río Blanco, Santiago. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **22**: 49-60. Santiago
- VERGARA, M. & NYSTROM, J. O. 1996. Geochemical features of Lower Cretaceous back-arc lavas in the Andean Cordillera, Central Chile (31°-34°S). *Andean Geology*. Vol. **23** 1(): 97-106. Santiago.
- WALL, R.; GANA, P. & GUTIÉRREZ, A. 1996. Mapas Geológicos de Chile. Mapa Geológico del área de San Antonio-Melipilla. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Vol. **2**, 1 mapa 1:100.000, 20 pp. Santiago.

- WALL, R., LARA, L. E. & PÉREZ DE ARCE, C. 2001. Upper Pliocene-Lower Pleistocene $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of Pudahuel Ignimbrite (Diamante-Maipo Volcanic complex), Central Chile (33,5°S). Simposio Sudamericano de Geología Isotópica N° 3. Actas N° 1: 458-459. Pucón.
- WALL, R.; SELLES, D. & GANA, P. 1999. Mapas Geológicos de Chile. Área Tiltill-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Vol. 11, 1 mapa 1:100.000, 1 anexo. Santiago.
- WARNAARS, F.W.; HOLMGREN, C.D. & BARASSI, S. 1985. Porphyry copper and tourmaline breccias at Río Blanco-Los Bronces, Chile. *Economic Geology*. Vol. 80 (6): 1.544-1.565.
- ZHENG, B.; QI, S.; LUO, G.; LIU, F.; HUANG, X. & GUO, S. 2021. Characterization of discontinuity surface morphology based on 3D fractal dimension by integrating laser scanning with ArcGIS. *Bulletin of Engineering Geology Environment*. Vol. 80: 2.261-2.281.

ANEXOS

Índice de anexos

Anexo 1. Base de datos ángulo de fricción	96
Anexo 2. Base de datos JRC.....	116
Anexo 3. Base de datos JCS	122
Anexo 4. Base de datos tensión normal y resistencia al corte	128

Anexo 1. Base de datos ángulo de fricción

Tabla A.1. Medidas ángulo de fricción Andesita.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	5741_02	180-182	nq	Débil	1	37	33
					2	37	33
					3	39	35
					4	39	35
					5	36	32
					Promedio	37,6	33,7
2	6031_03	280-282	Hq	Débil	1	39	35
					2	39	35
					3	37	33
					4	40	36
					5	39	35
					Promedio	38,8	34,9
3	6041_01	82-84	Hq	Débil	1	38	34
					2	36	32
					3	32	28
					4	39	35
					5	39	35
					Promedio	36,8	33,0
4	6041_02	100-102	Hq	Débil	1	39	35
					2	36	32
					3	39	35
					4	35	31
					5	35	31
					Promedio	36,8	33,0
5	6041_03	122-124	Hq	Débil	1	39	35
					2	37	33
					3	37	33
					4	39	35
					5	37	33
					Promedio	37,8	33,9
6	6041_04	160-162	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	36	32
					4	37	33
					5	37	33
					Promedio	36,6	32,7
7	6041_05	182-184	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	36	32
					4	34	30
					5	37	33
					Promedio	35,4	31,6
8	6041_06	264-266	nq	Débil	1	36	32
					2	38	34
					3	37	33
					4	39	35
					5	38	34
					Promedio	37,6	33,7
9	6041_07	280-282	nq	Débil	1	35	31
					2	31	27
					3	36	32
					4	34	30
					5	35	31
					Promedio	34,2	30,5
10	6041_09	322-324	nq	Débil	1	35	31
					2	34	30
					3	32	28
					4	32	28
					5	33	29
					Promedio	33,2	29,5

Continuación Tabla A.1.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	6087_06	122-124	Hq	Débil	1	31	27
					2	31	27
					3	34	30
					4	32	28
					5	34	30
					Promedio	32,4	28,8
12	6087_09	182-184	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	38	34
					4	39	35
					5	39	35
					Promedio	37,8	33,9
13	6087_10	260_262	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	37	33
					4	36	32
					5	32	28
					Promedio	35	31,2
14	6098_01	20-22	Hq	Débil	1	36	32
					2	38	34
					3	37	33
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,8	32,9
15	6098_02	40-42	Hq	Débil	1	39	35
					2	37	33
					3	38	34
					4	35	31
					5	39	35
					Promedio	37,6	33,7
16	6098_03	62-64	Hq	Débil	1	40	36
					2	39	35
					3	39	35
					4	38	34
					5	37	33
					Promedio	38,6	34,7
17	6098_05	100-102	Hq	Débil	1	32	28
					2	33	29
					3	35	31
					4	31	27
					5	31	27
					Promedio	32,4	28,8
18	6098_06	120-122	Hq	Débil	1	39	35
					2	37	33
					3	39	35
					4	38	34
					5	40	36
					Promedio	38,6	34,7
19	6098_04	80-82	Hq	Débil	1	38	34
					2	39	35
					3	37	33
					4	35	31
					5	38	34
					Promedio	37,4	33,5

Tabla A.2. Medidas ángulo de fricción Intrusivo.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	5648.01	22-24	Hq	Débil	1	37	33
					2	38	34
					3	38	34
					4	39	35
					5	38	34
					Promedio	38,0	34,1
2	5720_22	442-444	Hq	Débil	1	37	33
					2	39	35
					3	36	32
					4	34	30
					5	32	28
					Promedio	35,6	31,8
3	5775_08	162-164	Hq	Débil	1	32	28
					2	35	31
					3	37	33
					4	34	30
					5	38	34
					Promedio	35,2	31,4
4	5775_09	180-182	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	34	30
					4	35	31
					5	34	30
					Promedio	34,8	31,0
5	5775_10	224-226	Hq	Débil	1	34	30
					2	36	32
					3	39	35
					4	33	29
					5	35	31
					Promedio	35,4	31,6
6	5775_13	300-302	Hq	Débil	1	33	29
					2	36	32
					3	39	35
					4	36	32
					5	39	35
					Promedio	36,6	32,8
7	5775_14	320-322	Hq	Débil	1	32	28
					2	35	31
					3	35	31
					4	34	30
					5	37	33
					Promedio	34,6	30,9
8	5709_05	460-462	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	34	30
					4	36	32
					5	35	31
					Promedio	35	31,2
9	5709_06	482-484	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	34	30
					4	32	28
					5	34	30
					Promedio	34,2	30,5
10	5709_07	540-542	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	36	32
					4	37	33
					5	38	34
					Promedio	36,4	32,6

Continuación Tabla A.2.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	5709_08	560-562	Hq	Débil	1	32	28
					2	36	32
					3	34	30
					4	35	31
					5	36	32
					Promedio	34,6	30,9
12	5709_09	580-582	Hq	Débil	1	32	28
					2	33	29
					3	35	31
					4	34	30
					5	34	30
					Promedio	33,6	29,9
13	5709_10	600-602	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	35	31
					4	33	29
					5	31	27
					Promedio	33,8	30,1
14	5793_01	22-24	Hq	Débil	1	33	29
					2	35	31
					3	31	27
					4	32	28
					5	34	30
					Promedio	33,0	29,4
15	5793_02	42-44	Hq	Débil	1	32	28
					2	34	30
					3	36	32
					4	34	30
					5	35	31
					Promedio	34,2	30,5
16	5793_03	60-62	Hq	Débil	1	32	28
					2	35	31
					3	35	31
					4	36	32
					5	35	31
					Promedio	34,6	30,9
17	5793_04	80-82	Hq	Débil	1	33	29
					2	34	30
					3	35	31
					4	33	29
					5	34	30
					Promedio	33,8	30,1
18	5793_05	100-102	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	36	32
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	35,2	31,4
19	5793_06	140-142	Hq	Débil	1	33	29
					2	35	31
					3	31	27
					4	32	28
					5	34	30
					Promedio	33,0	29,4
20	5793_09	200-202	Hq	Débil	1	33	29
					2	31	27
					3	33	29
					4	34	30
					5	34	30
					Promedio	33,0	29,4

Continuación Tabla A.2.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
21	5793_10	244-246	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	37	33
					4	35	31
					5	35	31
					Promedio	35,6	31,8
22	5793_12	280-282	Hq	Débil	1	32	28
					2	33	29
					3	34	30
					4	34	30
					5	33	29
					Promedio	33,2	29,5
23	5793_13	304-306	Hq	Débil	1	34	30
					2	36	32
					3	37	33
					4	35	31
					5	33	29
					Promedio	35,0	31,2
24	5793_14	320-322	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	34	30
					4	33	29
					5	34	30
					Promedio	34,2	30,5
25	5793_15	340-342	Hq	Débil	1	35	31
					2	37	33
					3	36	32
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,2	32,4
26	5793_18	420-422	Hq	Débil	1	32	28
					2	36	32
					3	36	32
					4	37	33
					5	35	31
					Promedio	35,2	31,4
27	5793_20	460-462	Hq	Débil	1	34	30
					2	36	32
					3	34	30
					4	35	31
					5	34	30
					Promedio	34,6	30,9

Tabla A.3. Medidas ángulo de fricción Intrusivo Duro.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	5711_01	20-30	Hq	Débil	1	37	33
					2	35	31
					3	35	31
					4	34	30
					5	36	32
					Promedio	35,4	31,6
2	5711_03	82-84	Hq	Débil	1	37	33
					2	36	32
					3	38	34
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	36,8	32,9
3	5711_04	108-110	Hq	Débil	1	38	34
					2	38	34
					3	37	33
					4	35	31
					5	36	32
					Promedio	36,8	32,9
4	5711_05	120-122	nq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	35	31
					4	36	32
					5	36	32
					Promedio	35,4	31,6
5	5711_06	142-146	nq	Moderado	1	40	36
					2	40	36
					3	40	36
					4	41	37
					5	39	35
					Promedio	40,0	36,0
6	5711_07	162-164	nq	Débil	1	37	33
					2	38	34
					3	35	31
					4	37	33
					5	37	33
					Promedio	36,8	32,9
7	5711_08	180-182	nq	Débil	1	37	33
					2	37	33
					3	39	35
					4	36	32
					5	39	35
					Promedio	37,6	33,7
8	5711_09	200-202	nq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	36	32
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	35,4	31,6
9	5711_10	220-222	nq	Débil	1	37	33
					2	37	33
					3	35	31
					4	34	30
					5	37	33
					Promedio	36,0	32,2
10	5711_11	240-242	nq	Débil	1	36	32
					2	34	30
					3	38	34
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,2	32,4

Continuación Tabla A.3.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	5711_13	280-282	nq	Débil	1	34	30
					2	34	30
					3	36	32
					4	35	31
					5	36	32
					Promedio	35,0	31,2
12	5711_14	300-302	nq	Débil	1	35	31
					2	34	30
					3	35	31
					4	34	30
					5	35	31
					Promedio	34,6	30,9
13	5711_16	340-342	nq	Débil	1	36	32
					2	36	32
					3	36	32
					4	37	33
					5	35	31
					Promedio	36,0	32,2
14	5711_18	380-382	Nq	Débil	1	37	33
					2	35	31
					3	38	34
					4	35	31
					5	35	31
					Promedio	36,0	32,2
15	5711_19	400-402	nq	Débil	1	35	31
					2	34	30
					3	36	32
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	35,0	31,2
16	6093_01	20-22	Hq	Débil	1	31	27
					2	36	32
					3	35	31
					4	35	31
					5	35	31
					Promedio	34,4	30,7
17	6093_02	40-42	Hq	Débil	1	36	32
					2	36	32
					3	35	31
					4	34	30
					5	35	31
					Promedio	35,2	31,4
18	6093_03	60-62	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	35	31
					4	35	31
					5	35	31
					Promedio	35,2	31,4
19	6093_04	80-82	Hq	Débil	1	34	30
					2	36	32
					3	39	35
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,4	32,6
20	6093_05	100-102	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	34	30
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	35,0	31,2

Continuación Tabla A.3.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
21	6093_06	120-122	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	34	30
					4	35	31
					5	33	29
					Promedio	34,6	30,9
22	6093_07	140-142	Hq	Débil	1	34	30
					2	33	29
					3	36	32
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	34,6	30,9
23	6093_08	160-162	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	31	27
					4	35	31
					5	35	31
					Promedio	34,4	30,7
24	6093_09	180-182	Hq	Débil	1	32	28
					2	34	30
					3	35	31
					4	35	31
					5	32	28
					Promedio	33,6	30

Tabla A.4. Medidas ángulo de fricción Diorita.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	6091_07	140-142	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	34	30
					4	36	32
					5	36	32
					Promedio	35,8	32,0
2	6091_08	162-164	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	35	31
					4	35	31
					5	34	30
					Promedio	35,4	31,6
3	6091_10	200-202	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	36	32
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	36,4	32,56
4	5830_04	80-82	Hq	Débil	1	31	27
					2	33	29
					3	31	27
					4	35	31
					5	34	30
					Promedio	32,8	29,17
5	5830_05	100-102	Hq	Débil	1	34	30
					2	35	31
					3	36	32
					4	37	33
					5	35	31
					Promedio	35,4	31,6
6	5830_06	120-122	Hq	Débil	1	34	30
					2	35	31
					3	37	33
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	35,8	32,0
7	5830_07	140-142	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	36	32
					4	33	29
					5	32	28
					Promedio	34,2	30,5
8	5523_02	38-40	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	35	31
					4	37	33
					5	37	33
					Promedio	36,0	32,2
9	5523_03	60-62	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	38	34
					4	34	30
					5	36	32
					Promedio	36,2	32,4
10	5523_04	80-82	Hq	Débil	1	34	30
					2	31	27
					3	30	27
					4	32	28
					5	34	30
					Promedio	32,2	28,6

Continuación Tabla A.4.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	5523_05	98-100	Hq	Débil	1	33	29
					2	32	28
					3	33	29
					4	30	27
					5	32	28
					Promedio	32,0	28,4
12	5523_06	120-122	Hq	Débil	1	34	30
					2	31	27
					3	30	27
					4	32	28
					5	34	30
					Promedio	32,2	28,6
13	5523_07	140-142	Hq	Débil	1	34	30
					2	34	30
					3	36	32
					4	35	31
					5	33	29
					Promedio	34,4	30,7
14	5523_08	160-162	Hq	Débil	1	37	33
					2	35	31
					3	36	32
					4	37	33
					5	32	28
					Promedio	35,4	31,6
15	5469_32	662-664	nq	Débil	1	33	29
					2	35	31
					3	35	31
					4	31	27
					5	33	29
					Promedio	33,4	29,7
16	5469_39	780-782	nq	Débil	1	37	33
					2	36	32
					3	34	30
					4	35	31
					5	34	30
					Promedio	35,2	31,4

Tabla A.5. Medidas ángulo de fricción de Pórfido.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	5893_12	260_262	nq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	37	33
					4	35	31
					5	36	32
					Promedio	35,8	32,0
2	5893_20	420-422	nq	Débil	1	34	30
					2	34	30
					3	35	31
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	35,2	31,4
3	5893_24	500-502	nq	Débil	1	38	34
					2	38	34
					3	36	32
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	37,0	33,1
4	5922_04	80-82	nq	Débil	1	31	27
					2	33	29
					3	33	29
					4	35	31
					5	34	30
					Promedio	33,2	29,5
5	5922_07	140-142	nq	Débil	1	36	32
					2	39	35
					3	35	31
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,6	32,8
6	5960_01	20-22	nq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	36	32
					4	38	34
					5	37	33
					Promedio	36,8	32,9
7	5960_06	120-122	nq	Débil	1	35	31
					2	37	33
					3	36	32
					4	36	32
					5	38	34
					Promedio	36,4	32,6
8	5676_01	22-24	Hq	Débil	1	40	36
					2	36	32
					3	38	34
					4	38	34
					5	39	35
					Promedio	38,2	34,3
9	5676_02	40-42	Hq	Débil	1	40	36
					2	35	31
					3	38	34
					4	39	35
					5	40	36
					Promedio	38,4	34,5
10	5676_03	64-66	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	37	33
					4	34	30
					5	36	32
					Promedio	35,4	31,6

Continuación Tabla A.5.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	5676_04	80-82	Hq	Débil	1	37	33
					2	38	34
					3	39	35
					4	36	32
					5	36	32
					Promedio	37,2	33,3
12	5676_05	100-102	Hq	Débil	1	34	30
					2	36	32
					3	37	33
					4	33	29
					5	37	33
					Promedio	35,4	31,6
13	5676_06	120-122	Hq	Débil	1	36	32
					2	38	34
					3	38	34
					4	36	32
					5	35	31
					Promedio	36,6	32,8
14	5676_07	142-144	Hq	Débil	1	39	35
					2	36	32
					3	35	31
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	36,6	32,8
15	5676_08	164-166	Hq	Débil	1	38	34
					2	34	30
					3	36	32
					4	36	32
					5	35	31
					Promedio	35,8	32,0
16	6009_1	20-22	Hq	Débil	1	34	30
					2	31	27
					3	30	27
					4	35	31
					5	30	27
					Promedio	32,0	28,4
17	6009_02	40-42	Hq	Débil	1	31	27
					2	32	28
					3	35	31
					4	34	30
					5	33	29
					Promedio	33,0	29,4
18	6009_03	60-63	Hq	Débil	1	31	27
					2	36	32
					3	36	32
					4	33	29
					5	37	33
					Promedio	34,6	30,9
19	6009_04	80-82	Hq	Débil	1	33	29
					2	32	28
					3	34	30
					4	35	31
					5	36	32
					Promedio	34,0	30,3
20	6009_05	100-102	Hq	Débil	1	31	27
					2	32	28
					3	33	29
					4	30	27
					5	35	31
					Promedio	32,2	28,6

Continuación Tabla A.5.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
21	6009_06	120-122	Hq	Débil	1	33	29
					2	30	27
					3	35	31
					4	32	28
					5	35	31
					Promedio	33,0	29,4
22	6009_07	140-142	Hq	Débil	1	32	28
					2	35	31
					3	34	30
					4	32	28
					5	34	30
					Promedio	33,4	29,7
23	6009_08	162-164	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	36	32
					4	38	34
					5	34	30
					Promedio	35,8	32,0
24	6009_09	180-182	Hq	Débil	1	35	31
					2	34	30
					3	35	31
					4	31	27
					5	34	30
					Promedio	33,8	30,1
25	6009_10	200-202	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	37	33
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,2	32,4
26	6009_11	220-222	Hq	Débil	1	34	30
					2	36	32
					3	37	33
					4	32	28
					5	30	27
					Promedio	33,8	30,1
27	6009_12	240-242	Hq	Débil	1	34	30
					2	32	28
					3	35	31
					4	34	30
					5	36	32
					Promedio	34,2	30,5
28	6009_13	260-262	Hq	Débil	1	33	29
					2	30	27
					3	33	29
					4	34	30
					5	36	32
					Promedio	33,2	29,5
29	6009_14	280-282	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	36	32
					4	34	30
					5	33	29
					Promedio	34,8	31,0

Tabla A.6. Medidas ángulo de fricción de Brechas.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	5743_06	162_164	Hq	Débil	1	32	28
					2	33	29
					3	35	31
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	34,6	30,9
2	6098_09	180-182	Hq	Moderado	1	39	35
					2	37	33
					3	36	32
					4	38	34
					5	35	31
					Promedio	37,0	33,1
3	6098_16	320-322	Hq	Débil	1	38	34
					2	39	35
					3	38	34
					4	39	35
					5	38	34
					Promedio	38,4	34,5
4	6098_17	340-342	Hq	Débil	1	37	33
					2	39	35
					3	39	35
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	37,6	33,7
5	5755_04	80-82	nq	Débil	1	32	28
					2	31	27
					3	32	28
					4	34	30
					5	34	30
					Promedio	32,6	29,0
6	5755_09	180-182	nq	Débil	1	34	30
					2	35	31
					3	32	28
					4	35	31
					5	36	32
					Promedio	34,4	30,7
7	5755_10	204-206	nq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	38	34
					4	34	30
					5	39	35
					Promedio	36,4	32,6
8	5755_14	224-226	nq	Débil	1	38	34
					2	34	30
					3	36	32
					4	38	34
					5	37	33
					Promedio	36,6	32,8
9	6146_10	200-202	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	31	27
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	34,4	30,7
10	6146_11	220-222	Hq	Débil	1	33	29
					2	34	30
					3	34	30
					4	39	35
					5	38	34
					Promedio	35,6	31,8

Continuación Tabla A.6.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	6146_12	240-242	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	36	32
					4	37	33
					5	38	34
					Promedio	36,4	32,6
12	6151_07	200-202	Hq	Débil	1	34	30
					2	37	33
					3	36	32
					4	38	34
					5	35	31
					Promedio	36,0	32,2
13	6151_08	220-222	Hq	Débil	1	33	29
					2	34	30
					3	35	31
					4	34	30
					5	32	28
					Promedio	33,6	29,9
14	6151_09	240-242	Hq	Débil	1	33	29
					2	32	28
					3	31	27
					4	36	32
					5	35	31
					Promedio	33,4	29,7
15	5717_15	340_342	nq	Débil a moderada	1	36	32
					2	37	33
					3	36	32
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,4	32,6
16	5717_24	500-502	nq	Débil	1	32	28
					2	34	30
					3	36	32
					4	32	28
					5	35	31
					Promedio	33,8	30,1
17	5717_03	80-82	Hq	Débil	1	38	34
					2	36	32
					3	37	33
					4	37	33
					5	38	34
					Promedio	37,2	33,3
18	5717_09	200-202	Hq	Débil	1	38	34
					2	38	34
					3	34	30
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,6	32,8

Tabla A.7. Medidas ángulo de fricción de Chimenea Dacítica.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	5774_02	40-42	Hq	Débil	1	40	36
					2	40	36
					3	38	34
					4	38	34
					5	36	32
					Promedio	38,4	34,5
2	5774_03	60-62	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	40	36
					4	38	34
					5	39	35
					Promedio	38,0	34,1
3	5774_04	80-82	Hq	Débil	1	40	36
					2	37	33
					3	41	37
					4	40	36
					5	41	37
					Promedio	39,8	35,8
4	5774_06	120-122	Hq	Débil	1	37	33
					2	39	35
					3	40	36
					4	38	34
					5	37	33
					Promedio	38,2	34,3
5	5774_07	140-142	Hq	Débil	1	39	35
					2	41	37
					3	42	38
					4	40	36
					5	40	36
					Promedio	40,4	36,4
6	5774_08	160-162	Hq	Débil	1	40	36
					2	40	36
					3	39	35
					4	40	36
					5	39	35
					Promedio	39,6	35,6
7	5774_09	180-182	Hq	Débil	1	37	33
					2	37	33
					3	35	31
					4	39	35
					5	40	36
					Promedio	37,6	33,7
8	5774_10	200-202	Hq	Débil	1	36	32
					2	39	35
					3	40	36
					4	39	35
					5	40	36
					Promedio	38,8	34,9
9	5774_11	220-222	Hq	Débil	1	40	36
					2	39	35
					3	41	37
					4	40	36
					5	41	37
					Promedio	40,2	36,2
10	5774_12	240-242	Hq	Débil	1	40	36
					2	39	35
					3	40	36
					4	41	37
					5	41	37
					Promedio	40,2	36,2

Continuación Tabla A.7.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	5774_13	260-262	Hq	Débil	1	35	31
					2	41	37
					3	41	37
					4	40	36
					5	41	37
					Promedio	39,6	35,6
12	5774_14	280-282	Hq	Débil	1	40	36
					2	39	35
					3	41	37
					4	40	36
					5	39	35
					Promedio	39,8	35,8
13	5774_15	302-304	Hq	Débil	1	40	36
					2	38	34
					3	37	33
					4	37	33
					5	36	32
					Promedio	37,6	33,7
14	5774_16	320-322	Hq	Débil	1	40	36
					2	38	34
					3	39	35
					4	40	36
					5	41	37
					Promedio	39,6	35,6
15	5774_17	340_342	Hq	Débil	1	39	35
					2	40	36
					3	40	36
					4	39	35
					5	39	35
					Promedio	39,4	35,4
16	5771_03	60-62	nq	Moderado	1	41	37
					2	44	40
					3	46	42
					4	45	41
					5	46	42
					Promedio	44,4	40,3
17	5771_04	80-82	nq	Moderado	1	45	41
					2	40	36
					3	45	41
					4	41	37
					5	43	39
					Promedio	42,8	38,7
18	5771_05	100-102	nq	Moderado	1	43	39
					2	42	38
					3	41	37
					4	42	38
					5	42	38
					Promedio	42,0	38,0
19	5771_06	120-122	nq	Moderado	1	42	38
					2	40	36
					3	36	32
					4	44	40
					5	41	37
					Promedio	40,6	36,6
20	5771_07	140_142	nq	Moderado	1	36	32
					2	40	36
					3	40	36
					4	45	41
					5	41	37
					Promedio	40,4	36,4

Tabla A.8. Medidas ángulo de fricción de Chimenea Riolítica.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
1	6074_02	40-42	Hq	Débil	1	34	30
					2	34	30
					3	36	32
					4	33	29
					5	39	35
					Promedio	35,2	31,4
2	6074_03	60-62	Hq	Débil	1	39	35
					2	35	31
					3	36	32
					4	35	31
					5	35	31
					Promedio	36,0	32,2
3	6074_04	80-83	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	37	33
					4	40	36
					5	36	32
					Promedio	37,2	33,3
4	6074_05	100-102	Hq	Débil	1	36	32
					2	37	33
					3	37	33
					4	34	30
					5	39	35
					Promedio	36,6	32,8
5	6074_06	120-122	Hq	Débil	1	37	33
					2	39	35
					3	37	33
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	36,6	32,8
6	6074_07	140-142	Hq	Débil	1	38	34
					2	34	30
					3	35	31
					4	33	29
					5	35	31
					Promedio	35,0	31,2
7	6074_08	160-162	Hq	Débil	1	32	28
					2	32	28
					3	33	29
					4	34	30
					5	37	33
					Promedio	33,6	29,9
8	6074_09	180-182	Hq	Débil	1	37	33
					2	37	33
					3	37	33
					4	36	32
					5	36	32
					Promedio	36,6	32,7
9	6074_10	200-202	Hq	Débil	1	35	31
					2	35	31
					3	35	31
					4	36	32
					5	34	30
					Promedio	35	31,2
10	6074_11	220-222	Hq	Débil	1	33	29
					2	36	32
					3	35	31
					4	32	28
					5	36	32
					Promedio	34,4	30,7

Continuación Tabla A.8.

N°	N° Sondaje	Probeta	Diámetro	Alteración geotécnica	Ensayo	Ángulo de fricción básico (°)	Ángulo Ajustado (°)
11	6074_12	240-242	Hq	Débil	1	35	31
					2	34	30
					3	36	32
					4	34	30
					5	38	34
					Promedio	35,4	31,6
12	6074_13	260-262	Hq	Débil	1	34	30
					2	35	31
					3	36	32
					4	38	34
					5	35	31
					Promedio	35,6	31,8
13	6081_14	260-262	Hq	Moderado	1	39	35
					2	40	36
					3	39	35
					4	38	34
					5	37	33
					Promedio	38,6	34,7
14	6081_15	300-302	Hq	Débil	1	35	31
					2	36	32
					3	38	34
					4	36	32
					5	37	33
					Promedio	36,4	32,6
15	6081_1	20-22	Hq	Moderado	1	33	29
					2	32	28
					3	38	34
					4	36	32
					5	35	31
					Promedio	34,8	31,1
16	6081_2	40_42	Hq	Moderado	1	37	33
					2	40	36
					3	40	36
					4	40	36
					5	38	34
					Promedio	39,0	35,1
17	6081_3	60_62	Hq	Débil	1	36	32
					2	35	31
					3	38	34
					4	35	31
					5	38	34
					Promedio	36,4	32,6

Anexo 2. Base de datos JRC

Tabla A.9. Medidas de JRC para Andesita.

Litología	Sector	Banco	Regla mano derecha		JRC
			Rumbo	Manteo	
Andesita	Fase 6 Norte	3904	25	60	3
					3
					1
					3
			215	80	3
					3
					3
					3
			265	80	3
					3
					3
					3
			100	88	3
					3
					1
					3
					3
					5
			3	50	3
					3
					3
					3
			186	80	3
					3
			45	58	3
					3
					1
					1
					3
					1
					3
					3
					3
5					
3					
3					
335	50	3			
		1			
		1			
		3			
		3			
		3			
		3			

Tabla A.11. Medidas de JRC para Intrusivo Duro.

Litología	Sector	Banco	Regla mano derecha		JRC
			Rumbo	Manteo	
Intrusivo Duro (GDCC)	Rampa Santa Teresa	3756	42	52	5
					3
					3
					5
					3
					3
			50	78	3
					3
					3
					5
					3
					3
			75	90	3
					5
					1
					3
					5
					3
3					

Tabla A.12. Medidas de JRC para Diorita

Litología	Sector	Banco	Regla mano derecha		JRC
			Rumbo	Manteo	
Diorita	Botadero	3916	150	54	1
					3
					1
					1
					1
			3		
			330	56	1
					3
					1
					3
1					

Tabla A.13. Medidas de JRC para Pórfido.

Litología	Sector	Banco	Regla mano derecha		JRC
			Rumbo	Manteo	
Pórfido Don Luis	Fase 6 Sur	3804	55	84	5
					5
					3
					5
			252	78	5
					7
					5
					5
			0	70	5
					5
					3
					5
	Fase 6 Norte	3904	70	90	5
					7
					5
					5
					5
					3
					5
					3
					5
					5
					7
					5
			295	60	5
					5
					5
					5
					7
					5
					3
					3
123	60	5			
		3			
		5			
		3			
		3			
		3			
250-260	55-60	1			
		3			
		3			
		3			
		3			
		3			
10-20	50-55	5			
		3			
		3			
		5			
		5			
		3			
		5			
		5			
210-215	50	3			
		5			
		5			
		5			
		3			

Tabla A.14. Medidas de JRC para Chimenea Dacítica.

Litología	Sector	Banco	Regla mano derecha		JRC
			Rumbo	Manteo	
Chimenea Dacítica	Fase 5DF Norte	3308	40	88	5
					3
					5
					7
					7
					7
			240	86	5
					7
					7
					3
					3
					7
					5
					3
					3
					5
					5
			215	60	7
					5
					5
					7
					5
					7
					3
					5
					7
					7
5					
5					

Anexo 3. Base de datos JCS

Tabla A.15. Datos tomados con Martillo de Schmidt para Andesita

Orientación Martillo	Rebote Medido (R_N)	Rebote Corregido (R_L)	JCS
Vertical	45	36	75
	40	32	58
	56	47	133
	47	38	84
	50	41	98
	48	39	88
	45	36	75
	40	32	58
	50	41	98
	55	46	126
	56	47	133
	51	42	103
	50	41	98
	50	41	98
	48	39	88
	55	46	126
	50	41	98
	60	50	164
	58	48	148
	48	39	88
	50	41	98
	50	41	98
	52	43	108
	51	42	103
	50	41	98
	54	45	120
	50	41	98
	53	44	114
	50	41	98
	50	41	98
	51	42	103
	46	37	79
	45	36	75
	50	41	98
58	48	148	
48	39	88	
60	50	164	
50	41	98	
52	43	108	
60	50	164	
55	46	126	
50	41	98	
55	46	126	
54	45	120	
45	36	75	
62	52	182	
48	39	88	
Horizontal	45	36	75
	48	39	88
	52	43	108
	53	44	114
45° hacia abajo	45	36	75
	40	32	58
	48	39	88
	50	41	98
	46	37	79
	43	34	68
	62	52	182
53	44	114	
62	52	182	

Tabla A.16. Datos tomados con Martillo de Schmidt para Intrusivo.

Orientación Martillo	Rebote Medido (R_N)	Rebote Corregido (R_L)	JCS
Vertical	53	44	105
	55	46	115
	53	44	105
	65	55	190
	55	46	115
	55	46	115
	55	46	115
	60	50	148
	62	52	164
	55	46	115
	58	48	134
	56	47	121
	65	55	190
	55	46	115
	55	46	115
	62	52	164
	60	50	148
	60	50	148
	63	53	172
	58	48	134
	57	48	128
	56	47	121
	58	48	134
	55	46	115
	58	48	134
	58	48	134
	57	48	128
	55	46	115
	63	53	172
	62	52	164
	65	55	190
	53	44	105
55	46	115	
45° hacia abajo	57	48	128
	59	49	141
	59	49	141
	59	49	141
	55	46	115
	56	47	121
	53	44	105
	62	52	164
	63	53	172
	62	52	164
	63	53	172
	60	50	148
	63	53	172
	58	48	134
	68	58	221
	69	59	232
	62	52	164
	72	62	269
	67	57	210
	63	53	172
	65	55	190
	62	52	164
	63	53	172
	67	57	210
	54	45	110
	52	43	99
	58	48	134

Tabla A.17. Datos tomados con Martillo de Schmidt para Intrusivo Duro.

Orientación Martillo	Rebote Medido (R_N)	Rebote Corregido (R_L)	JCS
Vertical	62	52	159
	63	53	167
	65	55	184
	63	53	167
	60	50	144
	55	46	112
	58	48	130
	60	50	144
	60	50	144
	62	52	159
	55	46	112
	63	53	167
	62	52	159
	58	48	130
	60	50	144
	55	46	112
	63	53	167
	62	52	159
	60	50	144
	58	48	130
	60	50	144
	55	46	112
	62	52	159
	63	53	167
	58	48	130
	70	60	235
	65	55	184
	65	55	184
	55	46	112
	65	55	184
	60	50	144
	70	60	235
70	60	235	
60	50	144	
65	55	184	
58	48	130	
45° hacia abajo	63	53	167
	55	46	112
	60	50	144
	55	46	112
	66	56	193
	60	50	144
	60	50	144
	62	52	159
	55	46	112
	55	46	112
	60	50	144
	55	46	112
	55	46	112
	70	60	235
	66	56	193
	56	47	118
	58	48	130
	57	48	124
	60	50	144
	55	46	112
	65	55	184
	65	55	184
	60	50	144
60	50	144	

Tabla A.18. Datos tomados con Martillo de Schmidt para Diorita.

Orientación Martillo	Rebote Medido (R _N)	Rebote Corregido (R _L)	JCS
Vertical	61	51	157
	60	50	150
	62	52	165
	65	55	192
	62	52	165
	58	48	135
	61	51	157
	58	48	135
	67	57	212
	64	54	183
	60	50	150
	61	51	157
	58	48	135
	62	52	165
	62	52	165
	60	50	150
	66	56	202
	66	56	202
	66	56	202
	65	55	192
	62	52	165
	60	50	150
	60	50	150
	60	50	150
	64	54	183
	67	57	212
	65	55	192
	61	51	157
	65	55	192
	62	52	165
65	55	192	
60	50	150	
45° hacia abajo	62	52	165
	67	57	212
	71	61	259
	69	59	235
	58	48	135
	65	55	192
	60	50	150
	64	54	183
	60	50	150
	63	53	174
	64	54	183
	65	55	192
	61	51	157
	66	56	202
	63	53	174
	65	55	192
	63	53	174
	60	50	150
	63	53	174
	60	50	150
63	53	174	
45 hacia arriba	61	51	157
	60	50	150
	66	56	202
	63	53	174
	60	50	150
	69	59	235

Tabla A.19. Datos tomados con Martillo de Schmidt para Pórfido.

Orientación Martillo	Rebote Medido (R _N)	Rebote Corregido (R _L)	JCS
Vertical	66	56	171
	63	53	148
	60	50	129
	65	55	163
	67	57	179
	63	53	148
	63	53	148
	66	56	171
	55	46	102
	62	52	142
	66	56	171
	60	50	129
	62	52	142
	60	50	129
	63	53	148
	62	52	142
	63	53	148
	60	50	129
	65	55	163
	68	58	188
	58	48	117
	63	53	148
	60	50	129
63	53	148	
60	50	129	
45° hacia abajo	60	50	129
	62	52	142
	61	51	135
	63	53	148
	69	59	197
	62	52	142
	69	59	197
	62	52	142
	60	50	129
	60	50	129
	65	55	163
	60	50	129
	58	48	117
	65	55	163
	58	48	117
	68	58	188
	62	52	142
	61	51	135
	59	49	123
	69	59	197
	61	51	135
	65	55	163
	58	48	117
56	47	107	
58	48	117	
58	48	117	
55	46	102	
61	51	135	
63	53	148	
62	52	142	
63	53	148	
45° hacia arriba	62	52	142
	60	50	129
	66	56	171
	56	47	107

Tabla A.20. Datos tomados con Martillo de Schmidt para Chimenea Dacítica.

Orientación Martillo	Rebote Medido (R_N)	Rebote Corregido (R_L)	JCS
Vertical	44	35	57
	42	33	52
	52	43	82
	43	34	55
	53	44	86
	52	43	82
	54	45	90
	52	43	82
	51	42	79
	58	48	109
	58	48	109
	52	43	82
	52	43	82
	56	47	99
	55	46	95
	56	47	99
	50	41	75
	44	35	57
	53	44	86
	55	46	95
52	43	82	
45° hacia abajo	50	41	75
	46	37	63
	40	32	48
	49	40	72
	44	35	57
	48	39	69
	55	46	95
	50	41	75
	51	42	79
	48	39	69
	53	44	86
	55	46	95
	53	44	86
	54	45	90
	53	44	86
	48	39	69
	50	41	75
	48	39	69
	56	47	99
	50	41	75
	52	43	82
	50	41	75
	52	43	82
	50	41	75
55	46	95	
62	52	130	
53	44	86	
55	46	95	
52	43	82	
45° hacia arriba	65	55	149
	65	55	149
	50	41	75
	43	34	55
	59	49	114
52	43	82	

Anexo 4. Base de datos tensión normal y resistencia al corte

Tabla A.21. Datos de tensión normal y resistencia al corte para Andesita

Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)	JRC*LOG ₁₀ (JCS/ σ_n)	Φ_{peak}	τ (MPa)
146,386	59,975	1,628921	0,01112757	11,83	44,83	0,01106347
348,076	106,196	2,88428336	0,00828636	12,22	45,22	0,00834983
272,211	134,885	3,6634766	0,01345822	11,59	44,59	0,01326546
290,668	122,026	3,31422616	0,0114021	11,80	44,80	0,01132385
290,265	182,412	4,95430992	0,01706823	11,28	44,28	0,01664288
712,773	660,905	17,9501798	0,02518359	10,77	43,77	0,02412517
244,264	143,241	3,89042556	0,01592713	11,37	44,37	0,01557919
107,576	30,401	0,82569116	0,00767542	12,32	45,32	0,0077612
156,17	59,758	1,62302728	0,0103927	11,92	44,92	0,01036498
159,564	54,277	1,47416332	0,0092387	12,08	45,08	0,00926351
130,284	57,2	1,553552	0,01192435	11,74	44,74	0,01181842
94,049	18,522	0,50305752	0,00534889	12,79	45,79	0,00549825
676,673	274,518	7,45590888	0,01101848	11,85	44,85	0,01095991
408,092	310,129	8,42310364	0,02064021	11,03	44,03	0,01995259
120,084	39,988	1,08607408	0,00904429	12,10	45,10	0,00907736
84,625	22,5	0,6111	0,00722127	12,40	45,40	0,00732226
138,086	60,395	1,6403282	0,01187903	11,75	44,75	0,01177555
30,138	5,188	0,14090608	0,00467536	12,96	45,96	0,00483544
175,254	48,592	1,31975872	0,00753055	12,34	45,34	0,00762131
201,973	100,912	2,74076992	0,01356998	11,58	44,58	0,01337058

Tabla A.22. Datos de tensión normal y resistencia al corte para Intrusivo

Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)	JRC*LOG ₁₀ (JCS/ σ_n)	Φ_{peak}	τ (MPa)
46,013	11,882	0,31107076	0,0067605	12,93	43,93	0,00651253
181,57	70,972	1,85804696	0,01023323	12,39	43,39	0,00967356
70,864	26,318	0,68900524	0,00972292	12,46	43,46	0,00921261
75,46	13,262	0,34719916	0,0046011	13,43	44,43	0,00451062
90,208	34,292	0,89776456	0,00995216	12,43	43,43	0,00941981
78,319	13,849	0,36256682	0,00462936	13,42	44,42	0,00453706
108,303	27,872	0,72968896	0,00673748	12,93	43,93	0,00649136
2163,703	4118,298	107,817042	0,04982987	10,33	41,33	0,04381849
202,842	104,755	2,7424859	0,01352031	12,03	43,03	0,01261966
67,981	14,459	0,37853662	0,00556827	13,18	44,18	0,00541159
666,135	527,993	13,8228567	0,02075083	11,47	42,47	0,01899368
775,492	666,278	17,443158	0,02249302	11,36	42,36	0,02051269
701,573	520,662	13,6309312	0,0194291	11,55	42,55	0,01783738
168,793	49,971	1,30824078	0,00775056	12,75	43,75	0,00741997
77,869	25,703	0,67290454	0,00864149	12,61	43,61	0,00823202
1191,81	962,343	25,1941397	0,02113939	11,44	42,44	0,01933295
279,331	219,632	5,74996576	0,02058477	11,48	42,48	0,0188486
167,739	65,535	1,7157063	0,01022843	12,39	43,39	0,00966923
43,792	10,49	0,2746282	0,0062712	13,03	44,03	0,00606186
373,066	306,766	8,03113388	0,02152738	11,42	42,42	0,01967144

Tabla A.23. Datos de tensión normal y resistencia al corte para Intrusivo Duro

Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)	JRC*LOG ₁₀ (JCS/ σ_n)	Φ peak	τ (MPa)
193,096	49,87	1,2911343	0,00668649	13,00	44,00	0,00645695
701,441	548,447	14,1992928	0,02024303	11,56	42,56	0,01858592
337,33	154,706	4,00533834	0,01187365	12,25	43,25	0,01117014
288,107	181,326	4,69453014	0,0162944	11,84	42,84	0,01510938
797,438	719,383	18,6248259	0,02335583	11,37	42,37	0,02130431
620,269	443,107	11,4720402	0,01849527	11,67	42,67	0,01705135
563,988	366,626	9,49194714	0,01683005	11,80	42,80	0,01558307
563,59	224,327	5,80782603	0,01030506	12,44	43,44	0,00975726
235,982	95,24	2,4657636	0,01044895	12,42	43,42	0,00988725
266,389	58,303	1,50946467	0,00566639	13,22	44,22	0,00551325
74,65	18,786	0,48636954	0,00651533	13,03	44,03	0,0062991
364,01	239,053	6,18908217	0,01700251	11,78	42,78	0,01573543

Tabla A.24. Datos de tensión normal y resistencia al corte para Diorita

Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)	JRC*LOG ₁₀ (JCS/ σ_n)	Φ peak	τ (MPa)
669,125	848,625	22,301865	0,03332989	3,69	34,69	0,02307411
184,492	119,772	3,14760816	0,01706095	3,99	34,99	0,01193976
133,802	60,086	1,57906008	0,01180147	4,15	35,15	0,00830823
243,751	136,593	3,58966404	0,01472677	4,05	35,05	0,01033072
367,218	132,517	3,48254676	0,00948359	4,24	35,24	0,00669999
73,581	26,138	0,68690664	0,00933538	4,25	35,25	0,00659695
22,848	3,315	0,0871182	0,00381295	4,64	35,64	0,00273345
39,286	11,584	0,30442752	0,00774901	4,33	35,33	0,00549234
464,058	331,893	8,72214804	0,01879538	3,94	34,94	0,01313303
214,643	113,26	2,9764728	0,01386709	4,08	35,08	0,00973709
67,751	14,575	0,383031	0,00565351	4,47	35,47	0,00402743

Tabla A.23. Datos de tensión normal y resistencia al corte para Pórfido

Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)	JRC*LOG ₁₀ (JCS/ σ_n)	Φ peak	τ (MPa)
1,383127	0,178	0,00441618	0,0031929	23,24	54,24	0,00443366
1,239685	0,148	0,00367188	0,00296195	23,40	54,40	0,00413774
2,174182	0,311	0,00771591	0,00354888	23,01	54,01	0,00488658
0,585399	0,063	0,00156303	0,00267003	23,63	54,63	0,0037611
2,11311	0,28	0,0069468	0,00328748	23,18	54,18	0,00455437
0,838693	0,069	0,00171189	0,00204114	24,21	55,21	0,00293814
3,60105	0,523	0,01297563	0,00360329	22,98	53,98	0,00495549
6,761592	1,857	0,04607217	0,00681381	21,59	52,59	0,00891031
14,303522	6,545	0,16238145	0,01135255	20,49	51,49	0,01426494
0,860586	0,088	0,00218328	0,00253697	23,74	54,74	0,00358838
0,506303	0,025	0,00062025	0,00122506	25,32	56,32	0,00183833
2,511614	0,389	0,00965109	0,00384258	22,84	53,84	0,0052576
11,321162	4,337	0,10760097	0,00950441	20,87	51,87	0,01210915
1,493758	0,264	0,00654984	0,00438481	22,55	53,55	0,00593692
0,797868	0,071	0,00176151	0,00220777	24,04	55,04	0,00315791
1,845713	0,239	0,00592959	0,00321263	23,23	54,23	0,00445887
1,593052	0,179	0,00444099	0,00278772	23,54	54,54	0,00391333
24,064092	8,932	0,22160292	0,00920886	20,94	51,94	0,01176157
0,606831	0,041	0,00101721	0,00167627	24,64	55,64	0,00245177
2,278774	0,259	0,00642579	0,00281985	23,51	54,51	0,00395478
0,396426	0,03	0,0007443	0,00187753	24,39	55,39	0,00272097
1,340594	0,138	0,00342378	0,00255393	23,73	54,73	0,00361043
3,582701	0,625	0,01550625	0,00432809	22,58	53,58	0,00586618
1,488958	0,263	0,00652503	0,00438228	22,55	53,55	0,00593377
3,804807	0,792	0,01964952	0,00516439	22,20	53,20	0,00690247
3,138868	0,604	0,01498524	0,00477409	22,37	53,37	0,00642059
3,663263	0,747	0,01853307	0,00505917	22,24	53,24	0,00677284
1,344436	0,127	0,00315087	0,00234364	23,91	54,91	0,00333614
13,727465	5,633	0,13975473	0,01018067	20,72	51,72	0,0129014
20,199388	6,844	0,16979964	0,00840618	21,14	52,14	0,01081317
0,716623	0,053	0,00131493	0,0018349	24,44	55,44	0,00266415
2,8361	0,445	0,01104045	0,00389283	22,81	53,81	0,00532085
1,658278	0,218	0,00540858	0,00326156	23,19	54,19	0,00452132
0,872605	0,105	0,00260505	0,00298537	23,39	54,39	0,00416784
9,235919	4,153	0,10303593	0,0111156	20,52	51,52	0,01403703
6,136975	1,345	0,03336945	0,00543744	22,08	53,08	0,00723791
62,029099	38,364	0,95181084	0,01534459	19,83	50,83	0,01883557
20,783818	7,172	0,17793732	0,00856134	21,10	52,10	0,01099702
94,771265	95,915	2,37965115	0,02510942	18,76	49,76	0,02967331
48,223792	29,257	0,72586617	0,01505203	19,87	50,87	0,01850401
103,58371	117,49	2,9149269	0,02814078	18,51	49,51	0,03296582
1,66859	0,144	0,00357264	0,00214111	24,11	55,11	0,00307015
38,220828	22,058	0,54725898	0,01431834	19,98	50,98	0,01767032
27,431105	12,493	0,30995133	0,01129927	20,50	51,50	0,01420318
33,006357	16,827	0,41747787	0,01264841	20,25	51,25	0,0157603
100,020212	108,659	2,69582979	0,02695285	18,61	49,61	0,03167892
90,678428	52,59	1,3047579	0,01438885	19,97	50,97	0,01775056
10,979724	3,079	0,07638999	0,00695737	21,55	52,55	0,00908316
633,572202	486,288	12,0648053	0,01904251	19,36	50,36	0,02298805
17,53362	8,347	0,20708907	0,01181097	20,40	51,40	0,01479535
51,889516	38,08	0,9447648	0,01820724	19,46	50,46	0,02205593
68,835544	55,921	1,38740001	0,02015529	19,24	50,24	0,02422506

Tabla A.24. Datos de tensión normal y resistencia al corte para Chimenea Dacítica

Área (m ²)	Volumen (m ³)	T (MPa)	σ_n (MPa)	JRC*LOG ₁₀ (JCS/ σ_n)	Φ_{peak}	τ (MPa)
249,391	73,139	1,75753017	0,00704729	28,46	64,46	0,0147488
179,746	53,556	1,28695068	0,00715983	28,41	64,41	0,01495201
174,613	51,929	1,24785387	0,0071464	28,42	64,42	0,01492777
208,067	101,638	2,44236114	0,01173834	26,91	62,91	0,02294806
223,467	133,267	3,20240601	0,01433055	26,30	62,30	0,02729899
80,725	30,664	0,73685592	0,00912798	27,67	63,67	0,01844804
616,909	629,857	15,1354637	0,02453435	24,67	60,67	0,04366304
503,372	438,446	10,5358574	0,02093056	25,15	61,15	0,0379959
301,746	119,353	2,86805259	0,00950486	27,55	63,55	0,01910643
377,387	231,751	5,56897653	0,01475667	26,21	62,21	0,02800484
130,341	60,36	1,4504508	0,01112812	27,07	63,07	0,02190795