

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



**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA DE LA
ROCA INTACTA (IRS) Y DEL ÍNDICE GEOLÓGICO DE
RESISTENCIA (GSI) EN LAS UNIDADES GEOTÉCNICAS
BÁSICAS DE MINA CHUQUICAMATA.
REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

ROMINA NATALIA ESPINOZA ORTEGA

CONCEPCIÓN, 2018



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



**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA DE LA ROCA
INTACTA (IRS: *INTACT ROCK STRENGTH*) Y DEL ÍNDICE
GEOLÓGICO DE RESISTENCIA (GSI: *GEOLOGICAL STRENGTH
INDEX*) EN LAS UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS DE MINA
CHUQUICAMATA. REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Romina Natalia Espinoza Ortega

Profesor Patrocinante:

Msc. Abraham Elías González Martínez

Profesores Comisión:

Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Concepción, 2018

ÍNDICE

Página

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.1.1. Objetivo General	1
1.1.2. Objetivos Específicos	1
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS	2
1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	3
1.4. TRABAJOS ANTERIORES	4
1.5. AGRADECIMIENTOS	5
2. MARCO GEOLÓGICO	7
2.1. GENERALIDADES	7
2.2. GEOLOGÍA DISTRITAL	8
2.2.1. Rocas Estratificadas	10
2.2.1.1. Formación Collahuasi	10
2.2.1.2. Estratos de Quetena.....	10
2.2.1.3. Estratos Cerros de Chuquicamata	10
2.2.1.4. Formación Quehuita.....	11
2.2.1.5. Formación Tolar	11
2.2.1.6. Formación Quebrada Mala.....	11
2.2.1.7. Formación Icanche	11
2.2.1.8. Formación Calama	12
2.2.1.9. Grupo El Loa.....	13
2.2.2. Rocas Intrusivas	13

2.2.2.1. Complejo Plutónico y Meta-Plutónico Cerros de Chuquicamata	13
2.2.2.2. Pórfidos Hipabisales.....	14
2.2.2.3. Diorita Los Picos.....	15
2.2.2.4. Complejo Granodiorítico Fortuna	15
2.2.2.5. Pórfidos de Toki y Mina Ministro Hales.....	16
2.2.2.6. Complejo Porfídico Chuquicamata	16
2.2.3. Estructuras	17
2.3. GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO CHUQUICAMATA	20
2.3.1. Complejo Porfídico Chuquicamata.....	21
2.3.1.1. Pórfido Este	22
2.3.1.2. Pórfido Banco.....	22
2.3.1.3. Pórfido Oeste.....	23
2.3.2. Rocas de caja del Pórfido Chuquicamata.....	23
2.3.2.1. Granodiorita Elena	23
2.3.2.2. Granodiorita Fortuna.....	24
2.3.2.3. Metavolcanitas y Metasedimentitas	24
2.3.3. Eventos de Alteración y Mineralización Hipógenos	25
2.3.3.1. Eventos Tempranos de Alteración con Asociaciones de Baja Pirita	25
2.3.3.2. Eventos Tardíos de Cuarzo y Sericita con Asociaciones de Alta Pirita.....	28
2.3.4. Eventos de Alteración y Mineralización Supérgenos	30
2.3.4.1. Zona de Sulfatos.....	30
2.3.4.2. Enriquecimiento Secundario	31
2.3.5. Estructuras Principales	32
2.3.5.1. Zonas de Cizalle Frágil – Dúctil de orientación NNE–SSW	32
2.3.5.2. Foliación Dúctil en el Pórfido Chuquicamata	34
2.3.5.3. Sistema de Fallas Estanques Blancos y Portezuelo.....	35
2.3.5.4. Zona de Falla Oeste.....	36
2.3.5.5. Zona de Falla NNW – SSE y WNW – ESE.....	37
3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA ESTRUCTURAL.....	38
3.1. GENERALIDADES.....	38

3.2. UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS	38
3.2.1. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Fortuna (GDF)	40
3.2.2. Unidad Geotécnica Básica Brecha Entre Falla (BEF)	41
3.2.3. Unidad Geotécnica Básica Zona Cizalle Intenso (ZCI)	42
3.2.4. Unidad Geotécnica Básica Zona de Cizalle Moderado (ZCM)	44
3.2.5. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Elena Sur (GES)	45
3.2.6. Unidad Geotécnica Básica Metasedimentos (MET)	46
3.2.7. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Clorítico (PEC)	48
3.2.8. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Potásico (PEK)	49
3.2.9. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Sericítico (PES)	50
3.2.10. Unidad Geotécnica Básica Roca Cuarzo Sericita (RQS)	51
3.2.11. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Igual Sericita (Q = S)	52
3.2.12. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Menor Sericita (Q < S)	53
3.2.13. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Mayor Sericita (Q > S)	54
3.2.14. Unidad Geotécnica Básica Lixiviado (LIX)	55
4. CLASIFICACION GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO	57
4.1. GENERALIDADES	57
4.2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	58
4.2.1. Frecuencia de Fracturas (FF)	58
4.2.2. Espaciamento (S)	59
4.2.3. Condición de las Discontinuidades (JC)	59
4.2.4. Condición de Agua (WC)	60
4.2.5. Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS)	61
4.2.6. RQD (<i>Rock Quality Designation</i>)	62
4.3. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA	63
4.3.1. Índice GSI (<i>Geological Strength Index</i>)	63
5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	65
5.1. GENERALIDADES	65

5.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA	66
5.3. BLOQUE OESTE.....	67
5.3.1. UGTB Granodiorita Fortuna	67
5.3.2. UGTB Brecha Entre Falla	72
5.3.3. UGTB Zona de Cizalle Intenso.....	77
5.3.4. UGTB Zona de Cizalle Moderado.....	80
5.4. BLOQUE ESTE	82
5.4.1. UGTB Granodiorita Elena Sur	82
5.4.2. UGTB Metasedimentos	84
5.4.3. UGTB Pórfido Este Clorítico.....	85
5.4.4. UGTB Pórfido Este Potásico.....	89
5.4.5. UGTB Pórfido Este Sericítico.....	93
5.4.6. UGTB Cuarzo Igual Sericita	97
5.4.7. UGTB Cuarzo Menor Sericita.....	99
5.4.8. UGTB Cuarzo Mayor Sericita.....	101
5.4.9. UGTB Lixiviado (Homogéneo y Heterogéneo)	103
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
7. REFERENCIAS	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1. Mapa de ubicación y accesos a Mina Chuquicamata.....	2
2.1. Mapa de ubicación del Distrito Chuquicamata	8
2.2. Principales Unidades Geológicas presentes en el Distrito Chuquicamata	9
2.3. Geología local y estructuras principales del yacimiento Chuquicamata.....	21

3.1. Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB) presentes en Mina Chuquicamata	39
3.2. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Fortuna	40
3.3. Unidad Geotécnica Básica Brecha Entre Falla	41
3.4. Unidad Geotécnica Básica Zona de Cizalle Intenso	43
3.5. Unidad Geotécnica Básica Zona de Cizalle Moderado.....	45
3.6. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Elena Sur	46
3.7. Unidad Geotécnica Básica Metasedimentos	47
3.8. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Clorítico	48
3.9. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Potásico.....	49
3.10. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Sericítico	50
3.11. Unidad Geotécnica Básica Roca Cuarzo Sericita	51
3.12. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Igual Sericita	52
3.13. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Menor Sericita.....	53
3.14. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Mayor Sericita.....	54
3.15. Unidad Geotécnica Básica Lixiviado.....	55
4.1. Esquema de definición de macizo rocoso y roca intacta.....	57
4.2. Esquema para la determinación del espaciamiento.....	59
4.3. Esquema que ilustra la definición del índice RQD	62
4.4. Cartilla para evaluar el Índice de Resistencia Geológica (GSI).....	64
5.1. Gráfico de deriva espacial para el IRS en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de sondajes en dirección E-W	68
5.2. Gráfico de deriva espacial para el IRS en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de sondajes en dirección N-S.....	69
5.3. Gráfico de deriva espacial para el GSI en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de sondajes en dirección N-S.....	69
5.4. Gáficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de celdas y sondajes en profundidad	71
5.5. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de celdas y sondajes en dirección E-W.....	73
5.6. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de sondajes en dirección N-S.....	74

5.7. Gráficos de deriva espacial para el IRS en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de celdas y sondajes en profundidad.....	75
5.8. Gráficos de deriva espacial para el GSI en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de celdas y sondajes en profundidad.....	77
5.9. Gráficos de deriva espacial para el IRS en la UGTB Zona de Cizalle Intenso con datos de celdas en dirección E-W y N-S	78
5.10. Gráfico de deriva espacial para el GSI en la UGTB Zona de Cizalle Intenso con datos de sondajes en dirección E-W	78
5.11. Gráficos de deriva espacial para el GSI en la UGTB Zona de Cizalle Intenso con datos de celdas y sondajes en dirección N-S	79
5.12. Gráfico de deriva espacial para el IRS en la UGTB Zona de Cizalle Moderado con datos de sondajes en direccion E-W.....	81
5.13. Gráfico de deriva espacial para el IRS en la UGTB Zona de Cizalle Moderado con datos de sondajes en profundidad	82
5.14. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Granodiorita Elena Sur con datos de celdas y sondajes en direccion E-W.....	83
5.15. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Clorítico con datos de sondajes en direccion E-W.....	86
5.16. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Clorítico con datos de celdas y sondajes en dirección N-S.....	87
5.17. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Clorítico con datos de celdas y sondajes en profundidad.....	89
5.18. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Potásico con datos de sondajes en dirección E-W.....	90
5.19. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Potásico con datos de celdas y sondajes en dirección N-S.....	91
5.20. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Potásico con datos de celdas en profundidad	93
5.21. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Sericítico con datos de celdas y sondajes en dirección E-W.....	94

5.22. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Sericítico con datos de sondajes en dirección N-S.....	95
5.23. Gráficos de deriva espacial para el IRS y el GSI en la UGTB Pórfido Este Sericítico con datos de sondajes en profundidad.....	96
5.24. Gráficos de deriva espacial para el IRS en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas y sondajes en dirección E-W	98
5.25. Gráfico de deriva espacial para el GSI en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas en dirección E-W.....	98
5.26. Gráfico de deriva espacial para el IRS en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas en dirección N-S.....	99
5.27. Gráficos de deriva espacial para el GSI en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas y sondajes en profundidad.....	99
5.28. Gráficos de deriva espacial para el IRS en la UGTB Cuarzo Menor Sericita con datos de celdas y sondajes en profundidad.....	101
5.29. Gráfico de deriva espacial para el IRS en la UGTB Cuarzo Mayor Sericita con datos de sondajes en dirección N-S	102
6.1. Gráfico de la resistencia a la compresión uniaxial en relación a el tipo de alteración y su intensidad en una misma litología	106

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
5.1. Tramo del sondaje DD6806, desde los 33,12 m a los 42,30 m, UGTB Zona de Cizalle Intenso.....	70
5.2. Tramo del sondaje CHDD7233, desde los 774,81 m hasta los 789,10 m, UGTB Granodiorita Fortuna.....	72
5.3. Identificación de una de las trazas de la Falla Oeste en el sondaje CHDD6735.	74
5.4. Tramos del sondaje DD6605, desde los 611,65 m hasta los 619,80 m y desde los 623,90 m hasta los 632,16 m, UGTB Brecha Enre Falla.....	76

5.5. Rajo de Chuquicamata. Deformacion del Bloque Oeste.....	80
5.6. Tramo del sondaje CH5717, desde los 70,50 m hasta los 73,50 m, contacto entre las unidades Granodiorita Elena Sur y Metasedimentos.....	84
5.7. Sector del rajo de Chuquicamata ubicado en el talud Este, cerca del codo Sur, en la cota 2445, frente a Chancador M1	88
5.8. Zona de Mala Calidad Geotécnica, sector Norte del rajo, Pórfido Este Sericítico.	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4.1. Calificación del macizo rocoso según FF/m.	58
4.2. Estimación de Terreno para el UCS.....	61



RESUMEN

Se realiza un análisis estadístico de dos parámetros geotécnicos fundamentales en la caracterización del macizo rocoso como son la Resistencia de la Roca Intacta (IRS) y el Índice Geológico de Resistencia (GSI), con el objetivo de determinar la variabilidad espacial que muestran estos parámetros, tanto en dirección Este-Oeste, Norte-Sur y en profundidad, dentro de las Unidades Geotécnicas Básicas definidas en la Mina Chuquicamata.

El Distrito Chuquicamata está ubicado en la precordillera del desierto de Atacama, al Oeste de arco volcánico moderno de la Cordillera de Los Antes. Corresponde a un mega depósito de tipo pórfido cuprífero y está relacionado a un magmatismo intrusivo de edad Eoceno-Oligoceno, siendo parte de una franja metalogénica de pórfidos cupríferos asociados y alineados al Sistema de Falla Domeyko, los cuales ocurrieron en un periodo restringido de tiempo (41-31 Ma), como culminación de un evento tectónico compresivo mayor, que implicó acortamiento, engrosamiento y alzamiento cortical, junto con un cese del magmatismo, de tal forma que los pórfidos y sus plutones asociados representa la última actividad magmática en el área antes de la migración del arco magmático hacia el Este.

El depósito Chuquicamata, cuerpo elongado de dirección NNE-SSW, con 4 km de largo, 300 a 900 m de ancho en dirección E-W y una columna vertical de mineralización económica de 1600 m, ocurre como un mega dique subvertical, limitado en su flanco occidental por la Falla Oeste, que lo pone en contacto con el Complejo Granodiorítico Fortuna, y en su flanco oriental por la Falla Mesabi o Zona de Deformación Este, que lo contacta con la Granodiorita Elena y los Metasedimentos. El denominado Complejo Porfídico Chuquicamata corresponde a una granodiorita a cuarzo-monzodiorita y se divide en tres variedades texturales, donde el Pórfido Este es el más importante volumétricamente, y los pórfidos Banco y Oeste influyen menos en la distribución de las leyes de cobre del depósito.

Las características y el comportamiento del macizo rocoso están íntimamente ligada a la geología del yacimiento, el estudio de los procesos formadores del depósito permite identificar y definir unidades litológicas y de alteración-mineralización, así mismo, la caracterización geotécnica estructural de estas unidades es la base de los procesos ingenieriles de diseño minero y de análisis de estabilidad, y para lo cual se desarrolla el concepto de Unidades Geotécnicas Básicas, definidas como cuerpos homogéneos y que son el resultado de la sobreimposición de las Unidades Geológicas de Alteración a las Unidades Litológicas del yacimiento.

En la caracterización geotécnica estructural se utilizan sistemas de calificación y clasificación geotécnica de macizos rocosos, los cuales permiten evaluar el comportamiento geomecánico de estos y estimar parámetros geotécnicos de diseño, estos métodos han sido desarrollados suponiendo que el macizo rocoso se encuentra fracturado o intersectado por discontinuidades que definen bloques que, implícitamente, no conforman un conjunto masivo.

De los parámetros estudiados en este análisis el IRS determina la resistencia de un bloque de roca intacta y cómo esta característica gobierna parcialmente la resistencia del macizo. Su definición es estimativa y se efectúa proporcionando golpes a la roca con un martillo geológicos, y, según la respuesta de esta, se le asigna una resistencia en MegaPascales (MPa). Mientras que el GSI, corresponde a la estimación de la calidad del macizo rocoso y se determina, mediante observaciones en terreno, en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos como son la blocosidad y la condición de las discontinuidades

La importancia de la Falla Oeste como el rasgo estructural de mayor relevancia en Mina Chuquicamata, presente a lo largo de todo el rajo y responsable de que se encuentren en contacto rocas estériles (Bloque Oeste) y rocas mineralizadas (Bloque Este), permitió realizar el estudio enfocándose en cada bloque por separado, puesto que su comportamiento siempre será diferente.

El análisis se realiza mediante gráficos de deriva espacial, el cual está en función de las coordenadas de los datos utilizados, y permite identificar tendencias del parámetro en estudio, las que fueron asociadas a eventos de alteración y mineralización, zonas de contacto, estructuras mayores u otros factores geológicos según fuera el caso.

1. INTRODUCCIÓN

Este Trabajo de Titulación o Memoria se efectúa en la Superintendencia de Geotecnia de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollos de la División Chuquicamata de Codelco Chile, en el área de Caracterización Geotécnica.

El tema fue otorgado por la necesidad de conocer la variabilidad espacial de ciertos parámetros geotécnicos de interés para la caracterización del macizo rocoso, como son la Resistencia de la Roca Intacta (IRS: *Intact Rock Strength*) y el Índice Geológico de Resistencia (GSI: *Geological Strength Index*). Esta variabilidad es estudiada en función de las Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB).

El análisis se generara a partir de datos geotécnicos obtenidos hasta diciembre de 2014 y se utilizaran las Unidades Geotécnicas Básicas definidas en el Modelo 2014.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Realizar un análisis estadístico de parámetros geotécnicos de interés para la Mina Chuquicamata de modo de obtener la variabilidad espacial de dichos parámetros, identificando zonas de interés o anómalas, que pueden asociarse a eventos de alteración y mineralización, zonas de contacto, estructuras mayores u otros factores geológicos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Hacer gráficos comparativos de parámetros geotécnicos en función de Unidades Geotécnicas Básicas.
- Describir la variación espacial de los parámetros geotécnicos.

- Inferir un control geológico que explique la variación espacial de los parámetros geotécnicos.

1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS

El Distrito Chuquicamata se ubica en la Zona Norte de Chile, en el sector precordillerano de la Región de Antofagasta, a una altitud de 3.000 m s.n.m., a una distancia aproximada de 200 km al Noreste de la ciudad costera de Antofagasta, capital regional, y a 20 km al Norte de la ciudad de Calama, capital de la Provincia El Loa (Figura 1.1).

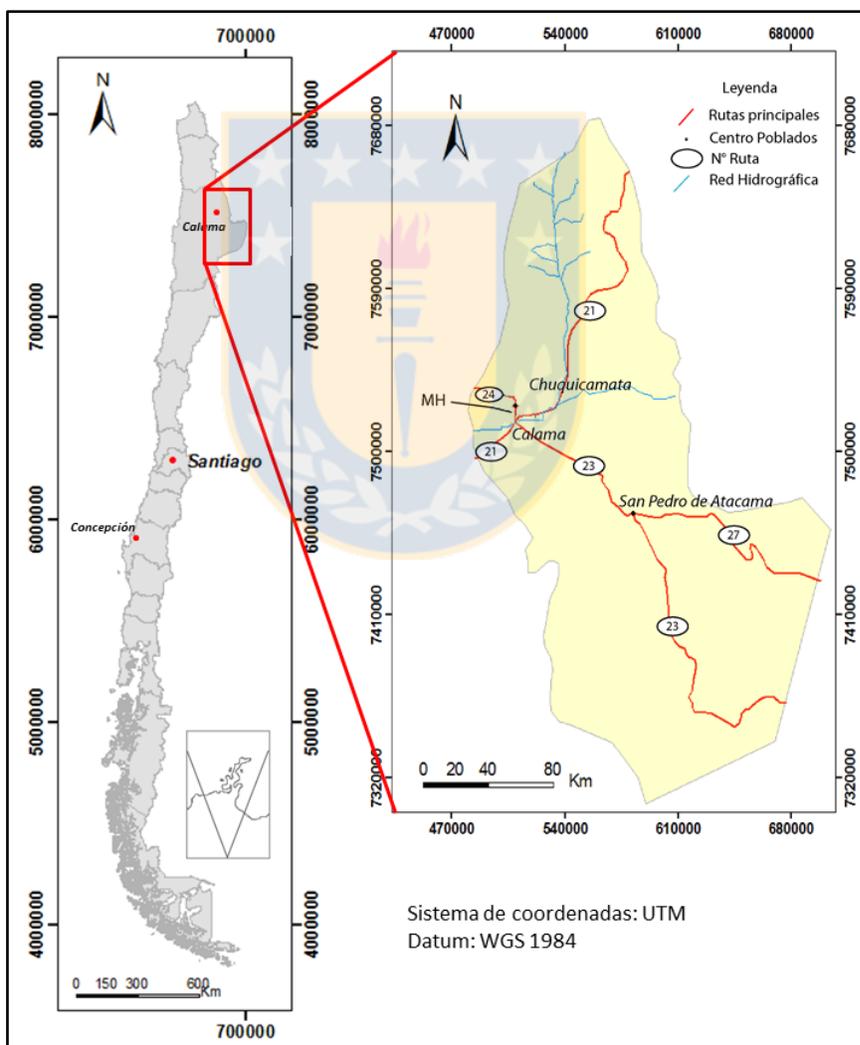


Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos a Mina Chuquicamata, Provincia El Loa, Región de Antofagasta, Chile.

Por vía terrestre se accede, desde la ciudad de Antofagasta, por la Ruta-26 que conecta a la Ruta-5 Norte, para luego tomar la Ruta-25 que conduce a Calama. También se puede continuar por la Ruta Panamericana (5 Norte) hasta interceptar con la Ruta-24 que une Tocopilla con Chuquicamata. El acceso principal a la Mina Chuquicamata se encuentra en el control de ingreso Puerta N°2.

El área de estudio está comprendida entre las coordenadas UTM 19K 7.534.000 – 7.538.000N y 509.500 – 511.500E (*Datum* Provisorio Sudamericano 1984) y entre las coordenadas locales 1500 – 6500N, 1500 – 5000E y 1500 – 3200Z.

1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se trabajó con dos bases de datos en formato tipo planilla de *Microsoft Excel*, la primera contiene el mapeo geotécnico de 3.841 celdas de mapeo realizadas entre los años 2000 y 2014, y la segunda contiene el mapeo geotécnico de 641 sondajes perforados y mapeados entre los años 2010 y 2014, esto último corresponde a un total de 131.521 registros, ambas bases de datos son utilizadas en los actuales modelos geotécnicos para la Mina Chuquicamata.

Las bases de datos se preparan para ser tratadas en el *software* estadístico *Statistica 10*, realizando en primera instancia una validación de la información a través del *software* de modelamiento *Vulcan 8.2*. Durante esta etapa se descartan 78 celdas de mapeo debido a la falta de información o duplicidad de datos, quedando, un total de 3.763 celdas (registros). Mientras que, en la base de datos de sondajes se descartan 19 sondajes, según los mismos criterios mencionados anteriormente, obteniendo, un total de 622 sondajes. Finalmente, para este estudio se cuenta con un total de 125.061 registros.

Cabe señalar que, si la información faltante correspondía a la variable UGTB (Unidades Geotécnicas Básicas), ésta se completó utilizando el *software Vulcan 8.2*, por lo que ninguna celda de mapeo o sondaje fue descartado bajo ese criterio.

Los datos para cada parámetro geotécnico son analizados mediante herramientas estadísticas con el *software Statistica 10*, y específicamente mediante histogramas y gráficos de deriva espacial, restringiéndolos a las Unidades Geotécnicas Básicas, las cuales están relacionadas con las condiciones de alteración del yacimiento.

Por último, se compara la variabilidad espacial de los parámetros con zonas de alteración, zonas de contactos, estructuras mayores, etc. previamente definidas en el depósito, con el fin de relacionar estos sectores con las tendencias (*trends*) obtenidas de los análisis.

1.4. TRABAJOS ANTERIORES

El Distrito de Chuquicamata es uno de los sectores de Chile con más estudios geológicos, realizados desde el comienzo de la explotación hasta la actualidad. Los trabajos incluyen geología económica, regional, estructural, etc. Los principales trabajos que están vinculados con el tema son:

Soto (1979) en un estudio de la alteración y mineralización primaria en Chuquicamata interpreta los fenómenos geológicos que controlan el emplazamiento de las diversas etapas de mineralización; a continuación de esto, **Aracena (1981)** estableció las posibles relaciones entre la litología y los procesos de alteración, (migmáticos e hidrotermales) que estaban unidos a los procesos mineralizadores. Caracterizó y estableció la distribución de las unidades litológicas y de alteración.

Posteriormente, **Chong y Pardo (1993)** describen las distintas unidades litológicas, los sistemas estructurales, las zonas de alteración y los distritos mineros, a escala 1:50.000, para la Superintendencia de Exploraciones Exteriores y Desarrollo Geológico y en **1994 Zentilli y Lindsay** estudiaron la Evolución Geológica de Chuquicamata a partir de dataciones radiométricas realizadas a la litología y alteración del depósito, además relacionaron los eventos de alteración y mineralización con un modelo estructural.

Lindsay y otros (1997) plantean una posible hipótesis sobre la evolución estructural que afecta al yacimiento y su relación con la intrusión del pórfido y los eventos de alteración y mineralización. Ese mismo año **Fréaut y otros** propusieron el Modelo Geológico 1997 de Chuquicamata, que incluye la litología, alteración, mineralización, estructuras y reservas del depósito.

En **2001 Ossandón y otros** estudiaron la alteración y mineralización del yacimiento, además de los eventos de deformación asociado a los sistemas de fallas principales.

Finalmente, mediante geoestadística aplicada a parámetros geotécnicos para el proyecto Chuquicamata Subterráneo, **Egaña (2008)** propone generar un modelo geotécnico confiable en su Memoria de Título.

1.5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los miembros de la Superintendencia de Geotecnia de la División Chuquicamata por permitirme desarrollar este tema, en especial al geólogo Cristian Guajardo por brindarme todo su apoyo y paciencia.

A la empresa DERK y a Rodrigo Cruces, por facilitarme equipos, espacio y tiempo para realizar mi memoria, así como también a todos los compañeros de trabajo que me ayudaron en las diferentes etapas de este proceso.

A cada uno de los profesores y auxiliares del Departamento Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción, por entregar las herramientas para mi formación profesional y por todos esas conversaciones y consejos que ayudaron en mi crecimiento personal.

También quiero agradecer a mis padres, Nina y Fernando, por su entrega incondicional, por que sin ellos nada de esto hubiese sido posible. Esto es para ustedes. Los Amo.

A mi esposo, Pedro, por su apoyo y motivación. Te Amo.

Por último, a todos mis amigos y familiares que fueron parte de mi experiencia universitaria, ustedes lograron que fuera la mejor!



2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. GENERALIDADES

Chuquicamata se localiza en la precordillera del desierto de Atacama, al Oeste del arco volcánico moderno de la Cordillera de Los Andes. El depósito es del tipo pórfido cuprífero y está relacionado a un magmatismo intrusivo de edad Eoceno – Oligoceno (Maksaev y otros, 1988; Maksaev, 1990, todos en Siña y otros, 2005), cuyo emplazamiento está estrechamente asociado al Sistema de Falla Domeyko (Maksaev, 1990; Lindsay y otros, 1995; Tomlinson y Blanco, 1997 a,b, todos en Siña y otros, 2005). Este sistema regional de fallas de orientación N–S representa una importante debilidad cortical y ha sido interpretado como un sistema transcurrente de intra-arco, relacionado a tectónica transpresiva originada en un periodo de subducción oblicua que habría ocurrido en el Eoceno – Oligoceno (Lindsay y otros, 1995; Reutter y otros, 1996, todos en Siña, 2005).

Este mega depósito es parte de la franja metalogénica de pórfidos cupríferos del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior, alineados según el Sistema de Falla Domeyko, que va desde Quebrada Blanca – Collahuasi hasta Potrerillos – El Salvador, incluyendo Escondida (Siña y otros 2005).

Maksaev y Zentilli (1988 en Siña y otros, 2005) plantearon que estos depósitos se emplazaron en un periodo restringido de tiempo (41-31 Ma), como culminación de un evento tectónico compresivo mayor (Fase Incaica), que implicó acortamiento, engrosamiento y alzamiento cortical, junto con el virtual cese del magmatismo que tuviera amplia distribución en la zona durante el Cretácico Superior – Terciario Inferior, de tal forma que los pórfido cupríferos y sus plutones asociados, representan la última actividad magmática en el área antes de la migración del arco magmático hacia el Este.

2.2. GEOLOGÍA DISTRITAL

El Distrito Chuquicamata alberga grandes yacimientos de tipo pórfidos con mineralización diseminada de Cobre y Molibdeno, con una estrecha relación genética entre sí (Rivera y otros, 2012). Al Noreste del depósito homónimo se encuentra la Mina Radomiro Tomic, inmediatamente al Sur, y con orientación SE–NW, se reconoce su yacimiento exótico asociado, denominado Mina Sur; un poco más al Sur está la Mina Ministro Hales y hacia el Suroeste aparecen los cuerpos menores del Clúster Toki, Quetena, Genoveva, Miranda y Opache, todos ocurren en una franja de orientación NNE–SSW de aproximadamente 30 km de largo por 10 km de ancho (Siña y otros, 2005) (Figura 2.1).

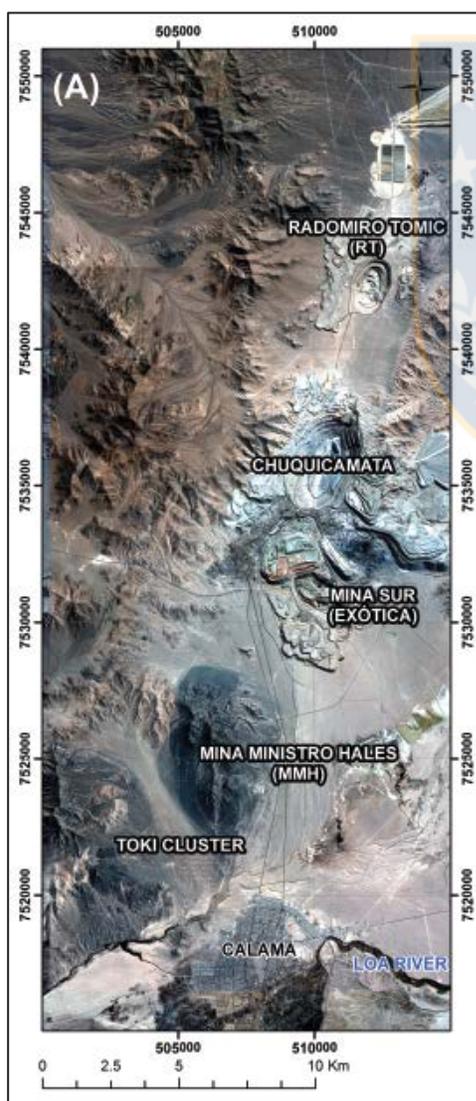


Figura 2.1. Mapa de ubicación del Distrito Chuquicamata. Se muestra la distribución de los yacimientos alineados con una tendencia NNE–SSW desde Radomiro Tomic en el Norte hacia el Clúster Toki en el Sur. (Modificado de Rivera y otros, 2012).

A continuación se describen las principales unidades de rocas identificadas en el Distrito Chuquicamata (Figura 2.2).

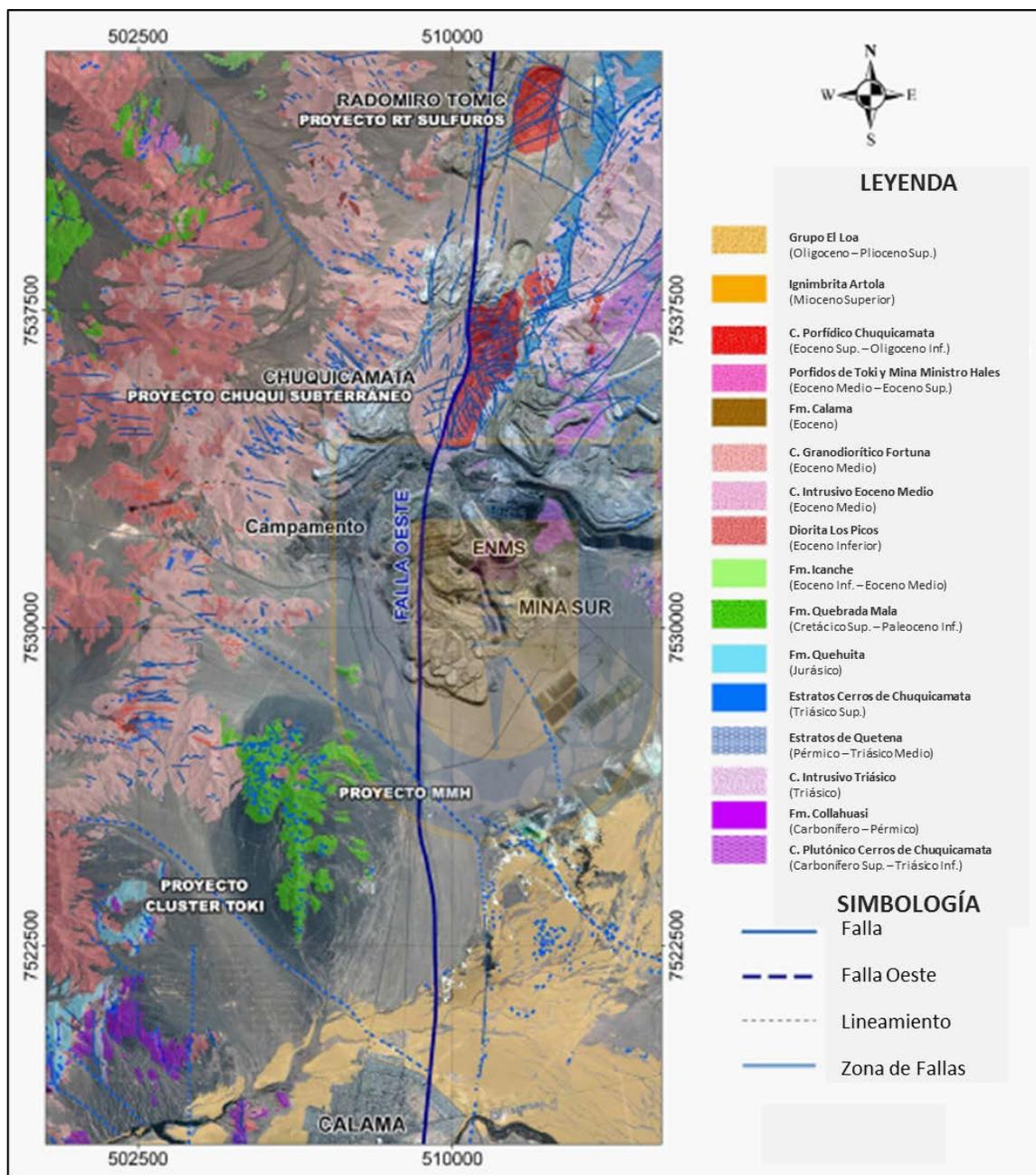


Figura 2.2. Principales Unidades Geológicas presentes en el Distrito Chuquicamata (Tomado de Córdova y otros, 2010).

2.2.1. Rocas Estratificadas

2.2.1.1. Formación Collahuasi (Carbonífero – Pérmico)

Las unidades estratificadas más antiguas corresponden a rocas volcánicas de edad Carbonífero – Pérmico, que comprenden más de 500 m de flujos andesíticos y rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas, con intercalaciones de brechas sedimentarias y areniscas, además de lutitas intercaladas hacia el techo. Hacia la base se observa un mayor grado de metamorfismo y el desarrollo de marcada foliación (Rivera y otros, 2012).

2.2.1.2. Estratos de Quetena (Pérmico – Triásico)

Ubicada al Suroeste del área, en la Sierra Quetena, consiste en una unidad de conglomerados polimícticos, de 2 a 20 m de espesor, que contienen clastos de esquistos de muscovita paleozoicos y vetas de cuarzo. Corresponde a un conglomerado basal que muestra la transición hacia brechas volcánicas triásicas y rocas sedimentarias marinas de la Formación Quehuita. El conglomerado y la brecha volcánica que la sobreyace son denominados Estratos de Quetena (Tomlinson y Blanco, 2008).

Por la posición estratigráfica del conglomerado se le asigna una edad Pérmico – Triásico (Alcota y otros, 2009 en Rivera y otros, 2012). Estas rocas evidencian un alzamiento y erosión del basamento paleozoico, antes del Triásico Medio (Rivera y otros, 2012).

2.2.1.3. Estratos Cerros de Chuquicamata (Triásico Superior)

Rocas volcánicas y sedimentarias de edad Triásico Medio a Superior (ex Formación Agua Dulce), consisten principalmente en flujos andesíticos y brechas, con intercalaciones de conglomerados y areniscas, e intercalaciones piroclásticas dacíticas poco frecuentes. Inmediatamente al Este de los yacimientos de Chuquicamata y Radomiro Tomic, estratos de rocas calcáreas y pizarras parecen estar intercaladas con las rocas volcánicas de edad Triásico (Tomlinson y Blanco, 2008).

2.2.1.4. Formación Quehuita (Jurásico)

En la Sierra Quetena y alrededor del Clúster Toki, afloran rocas sedimentarias marinas jurásicas del miembro inferior de la Formación Quehuita (Tomlinson y Blanco, 2008), estas consisten en calizas, limolitas y pizarras, parcialmente afectadas por metamorfismo de contacto. El miembro superior de esta unidad se compone de areniscas y limolitas que afloran en la parte centro–Norte del área, donde está en contacto erosivo con la Formación Tolar que la sobreyace.

2.2.1.5. Formación Tolar (Cretácico Superior)

Consiste en estratos rojos, conglomerados (con clastos Paleozoicos) y tobas dacíticas. Sobreyace al miembro superior de la Formación Quehuita y a las rocas volcánicas de la Formación Collahuasi. En el anticlinal de San Lorenzo se encuentra mejor expuesta, y se le ha asignado una edad Cretácico Superior, sobre la base de su posición estratigráfica (Tomlinson y Blanco, 2008).

2.2.1.6. Formación Quebrada Mala (Cretácico Superior – Paleoceno Inferior)

En el sector de Cerro Negro, al Oeste de la Mina Ministro Hales, se observa la Formación Quebrada Mala. El miembro inferior de esta unidad se compone de brechas sedimentarias, tobas, conglomerados y areniscas que sobreyacen en inconformidad a la Formación Collahuasi. El miembro superior está formado por lavas andesíticas y tobas con intercalaciones piroclásticas dacíticas, que presenta metamorfismo de contacto por un plutón [REDACTED], adyacente a la formación (Alcota y otros, 2009 en Rivera y otros, 2012).

2.2.1.7. Formación Icanche (Eoceno Inferior – Eoceno Medio)

En el sector Norte del área, afloran rocas volcánicas que sobreyacen en conformidad a la Formación Tolar. Consisten en más de 500 m de espesor de lavas andesíticas y rocas piroclásticas, con intercalaciones menores de arenisca, las que se encuentran metamorfizadas a cuarcitas en las cercanías de los plutones de edad Eoceno (Rivera y otros, 2012). Esta formación

está cortada por numerosos diques de andesita porfídica y localmente afectada por alteración argílica avanzada, características que, junto a las facies volcánicas, sugieren un edificio volcánico parcialmente preservado, cuyos intrusivos de edad equivalente se encuentran parcialmente exhumados más al Oeste. Estas intrusiones son anteriores al mayor evento de alzamiento y la depositación de las gravas sintectónicas coinciden con el emplazamiento de los sistemas porfídicos de cobre (Blanco y Tomlinson, 2006 en Rivera y otros, 2012).

2.2.1.8. Formación Calama (Eoceno)

La Formación Calama es la unidad más relevante para comprender la relación entre la estratigrafía del Distrito y el emplazamiento de los pórfidos (May y otros, 1999, 2005; Blanco y otros, 2003; Tomlinson y Blanco, 2007, todos en Rivera y otros, 2012). Está expuesta en varios cerros pequeños y se reconoce también en sondajes perforados en la parte oriental de la Mina Ministro Hales, pero no se ha encontrado en el bloque occidental de la Falla Oeste.

Fue dividida en una unidad inferior, Miembro Topater, de ortoconglomerados de bloques con intercalaciones de lavas andesíticas y brechas laháricas, y en otra superior, Miembro Chorrillos, de conglomerados gruesos y de bloques, areniscas gruesas y limolitas arenosas de guijarros (Tomlinson y Blanco, 2008).

En la Mina Ministro Hales, más de 500 m de conglomerados correlacionados a esta formación, se encuentran en contacto por falla con rocas mineralizadas al Oeste a través de la Falla Oeste (Álvarez y Miranda, 1991; Sillitoe y otros, 1996; Müller y Quiroga, 2003, todos en Rivera y otros, 2012).

La depositación de la Formación Calama coincide con el tiempo de la mineralización de los pórfidos cupríferos y, aunque la depositación no fue necesariamente continua, los conglomerados y la ausencia de unidades volcánicas, con excepción de la parte inferior, sugieren un alzamiento tectónico activo, durante una época de poco o nada de volcanismo contemporáneo. Esto afirma que existe una relación temporal y espacial directa entre alzamiento, erosión y depositación de

estos sedimentos sintectónicos y el emplazamiento de los sistemas porfídicos de cobre del Distrito Chuquicamata (Rivera y otros, 2012).

Relaciones similares han sido observadas por Perelló y otros (2011 en Rivera y otros, 2012) en Telégrafo y en otros depósitos del Distrito Sierra Gorda, por Hervé y otros (2013 en Rivera y otros, 2012) y por Sillitoe y Perelló (2005 en Rivera y otros, 2012) en otros depósitos de pórfido de cobre del Eoceno al Oligoceno, asociados al Sistema de Falla Domeyko, del cual la Falla Oeste forma parte.

2.2.1.9. Grupo El Loa (Oligoceno – Plioceno Superior bajo)

Gravas y rocas sedimentarias de grano fino, incluyendo calizas lacustres, sobreyacen a la Formación Calama en el bloque oriental y a rocas del Paleozoico y Mesozoico en el bloque occidental (ambos respecto de la Falla Oeste).

El Grupo consiste en dos unidades: la inferior, Formación Jalquinche, que comprende fangolitas, areniscas y capas de yeso, con intercalaciones de tobas en la base y techo (Tomlinson y Blanco, 2008; Alcota y otros, 2009 en Rivera y otros, 2012); y la superior o Formación Opache, formada por calizas y sedimentos lacustres, con intercalaciones de tobas (Tomlinson y Blanco, 2008).

Estas formaciones representan las etapas finales de deposición en la Cuenca de Calama y en su mayoría son posteriores a los últimos movimientos en la Falla Oeste (Rivera y otros, 2012).

2.2.2. Rocas Intrusivas

2.2.2.1. Complejo Plutónico y Meta-Plutónico Cerros de Chuquicamata (Carbonífero Superior – Triásico Inferior)

Las rocas plutónicas más antiguas en el área son del Complejo Plutónico y Meta-Plutónico Cerros de Chuquicamata, el cual se compone de cinturones de orientación NNE–SSW que decrecen en edad de Este a Oeste. La unidad más antigua del complejo es el Granito Mesa, que comprende granitos, sienogabros y monzogranitos foliados, datados en 305 a 295 Ma (Tomlinson

y Blanco, 2008). Este cuerpo se encuentra intruido por dioritas, cuarzo-dioritas y meta-dioritas, también con una marcada foliación. La fase más tardía es la Granodiorita Elena, datada en 238 a 229 Ma (Tomlinson y Blanco, 2008), la cual se distribuye en forma elongada con orientación NE–SW, corta a las dioritas en su flanco oriental y está en contacto con calizas y rocas volcánicas triásicas (Estratos Cerros de Chuquicamata) hacia el Oeste a través de la Falla Mesabi.

Un segundo cuerpo de la Granodiorita Elena intruye a la parte occidental de las rocas volcánicas triásicas al Oeste de la Falla Mesabi y constituye la roca caja del Complejo Porfídico Chuquicamata, en su lado oriental. Éste parece ser el extremo Sur–occidental de un gran plutón de granodiorita triásica, el cual también aflora al Noreste de la Mina Radomiro Tomic. Estas granodioritas son cortadas por cuerpos hipabisales dacíticos a riolíticos, principalmente diques de orientación NNE–SSW a casi E–W. La Granodiorita Elena está truncada hacia el Suroeste por la Falla Oeste, sin embargo, intrusivos similares han sido reconocidos más al Sur, en forma de rocas de caja en Mina Ministro Hales y en zonas orientales del Clúster Toki.

La petrografía, edades radiométricas y las relaciones con intrusiones hipabisales sustentan la correlación entre la Granodiorita Elena con las granodioritas que aparecen hacia al Sur, a través de la Falla Oeste (Rivera y otros, 2012). Estudios petrogenéticos recientes de estas rocas indican afinidades adakíticas, similares a, pero menos pronunciadas que, aquellas en los pórfidos del Eoceno al Oligoceno (Wilson y otros, 2011 en Rivera y otros, 2012). Granodioritas de edad Triásico difieren de las rocas del Complejo Porfídico Chuquicamata en que carecen de cantidades significativas de esfeno (J. Proffett, 2005 en Rivera y otros, 2012).

2.2.2.2. Pórfidos Hipabisales (Cretácico Superior)

Desde el Cretácico Superior se emplazan una serie de pórfidos hipabisales, los que disminuyen en edad desde el Oeste hacia el Este. Los más antiguos corresponden a monzonita y granodioritas, datados entre 69 a 63 Ma (Ballard y otros, 2001; Campbell y otros, 2006 en Rivera y otros, 2012), los cuales cortan rocas sedimentarias del miembro superior de la Formación Quehuita, generando metamorfismo de contacto y metasomatismo (Tomlinson y Blanco, 2008).

2.2.2.3. Diorita Los Picos (Eoceno Inferior)

La Diorita Los Picos (también del Complejo Monzonítico – Granodiorítico Los Picos) está datada en 43 a 42 Ma (Dilles y otros, 1997, 2011; Campbell y otros, 2006; Tomlinson y otros, 2010, todos en Rivera y otros, 2012). Se compone de dioritas, monzonitas y monzodioritas distribuidas en un cinturón N–S de aproximadamente 30 km de longitud por 7 a 8 km de ancho, intruyendo a las formaciones Collahuasi, Quehuita, Quebrada Mala e Icanche y a los Estratos Cerros de Chuquicamata (Rivera y otros, 2012).

2.2.2.4. Complejo Granodiorítico Fortuna (Eoceno Medio alto)

Este Complejo aflora al Este de la Diorita Los Picos, como un cinturón subparalelo a ella (Dilles y otros, 1997, 2011 en Rivera y otros, 2012). Está conformado por cuatro unidades principales que muestran una evolución comagmática, la más antigua es la Granodiorita Antena (o Gris), fase de grano medio y abundante hornblenda y biotita, comúnmente con foliación NNE–SSW, que aflora en el sector centro–occidental del Complejo, formando un cinturón a unos 3 km al Oeste de Chuquicamata, y se puede reconocer por aproximadamente 30 km de Norte a Sur. Está datada en 39 a 38 Ma e intruye a la Diorita Los Picos, a los intrusivos cretácicos y a las rocas volcánicas de la Formación Icanche.

La Granodiorita Antena esta intruida por la Granodiorita Fiesta, roca con grandes cristales de hornblenda y feldespato, localmente porfídica (Dilles y otros, 1997, 2011 en Rivera y otros, 2012). Intrusiones más jóvenes del Complejo Fortuna son los pórfidos Tetera y San Lorenzo, datados en aproximadamente ~38 Ma (Dilles y otros, 1997, 2011; Barra y otros, 2006, todos en Rivera y otros, 2012). El Pórfido Tetera es de composición granítica y es más común en la parte Norte del complejo. El Pórfido San Lorenzo, relativamente más joven, es frecuente en la zonas centro y Sur, y corresponde a granodioritas y cuarzo-monzodioritas, con mineralización de cobre asociada (Rivera y Pardo, 2004; Dilles y otros, 2011, todos en Rivera y otros, 2012).

2.2.2.5. Pórfidos de Toki y Mina Ministro Hales (Eoceno Medio – Eoceno Superior)

Los pórfidos mineralizados de Toki, son similares en composición al Pórfido San Lorenzo (Barra y otros, 2006 en Rivera y otros, 2012), intruyen a las rocas volcánicas de la Formación Collahuasi, a tonalitas del Eoceno Inferior (~45 Ma) y granodioritas del tipo Elena de ~229 Ma (Proffett y otros, no publicado, en Rivera y otros, 2012). Estos intrusivos son sin- a post-mineral, de orientación NE–SW, con diques subverticales a manteos pronunciados hacia el Este, de 20 a 50 m de ancho, con longitudes en el rumbo de unos cientos de metros, los cuales han sido reconocidos hasta profundidades de aproximadamente 1.000 m bajo la superficie. Ellos están cortados y desplazados por sistemas de orientación NW–SE, y por vetillas tipo D, sobresalientes, con alteración sericítica (Rivera y otros, 2012).

2.2.2.6. Complejo Porfídico Chuquicamata (Eoceno Superior – Oligoceno Inferior)

El Complejo Porfídico Chuquicamata o Pórfido Chuquicamata (Ambrus, 1975, 1978 en Rivera y otros, 2012; Ossandón y otros, 2001; Faunes y otros, 2003), está ubicado completamente en el bloque oriental del distrito. Corresponde a un mega dique de aproximadamente 14 km de largo y 1,5 km de ancho de orientación NNE–SSW, con manteo vertical a levemente al Oeste, extendiéndose desde Chuquicamata hasta el Norte de Radomiro Tomic. El Complejo, hospedado en la Granodiorita Elena y en rocas volcano-sedimentarias triásicas, está cortado por la Falla Oeste, que lo pone en contacto con el Complejo Intrusivo Fortuna hacia occidente. La edad de emplazamiento es de 36 a 33 Ma.

El complejo está estrechamente relacionado a la génesis de la mineralización y alteración hidrotermal del Yacimiento Chuquicamata, presentando una composición granodiorítica y granítica. Está constituido por cuatro unidades principales: Pórfido Este (predominante), Pórfido Oeste, Pórfido Banco y Pórfido Fino (este último identificado solo en Radomiro Tomic) entre los cuales es común reconocer contactos foliados (Ossandón y otros, 2001; Tomlinson y Blanco, 2008; Rivera y otros, 2012).

2.2.3. Estructuras

El Distrito Chuquicamata ha sufrido los efectos de sucesivas deformaciones desde el Paleozoico, culminando con el evento compresivo Incaico, el cual generó alzamiento así como también cuencas, resultando en la depositación de los sedimentos sintectónicos de la Formación Calama. En un sentido amplio, este distrito está dentro del área de influencia del Sistema de Falla Domeyko, responsable de haber ejercido un control regional directo en el emplazamiento de los grandes sistemas porfídicos de cobre del Norte de Chile (Maksaev y Zentilli, 1988, 1999; Sillitoe y Perelló, 2005, todos en Rivera y otros, 2012; Camus, 2003).

En el bloque Este del distrito, la intrusión del Complejo Ígneo Cerros de Chuquicamata tiene una marcada foliación, por lo general orientada al NE–SW. Relaciones de campo muestran evidencias de varias edades de deformación al Este y Noreste de Chuquicamata. En la parte central de la mina, se observa una foliación milonítica intensa de rumbo NNW–SSE y manteo al NE, la que es truncada por la Granodiorita Elena de edad Triásico, mientras que, al Noreste de la mina, hay foliación de orientación similar que se sobrepone a la intrusión de la Granodiorita Elena y forma contactos locales con rocas volcánicas triásicas (Lindsay, 1998; Proffett y Alcota, 2005, todos en Rivera, 2012). La foliación que afecta al Pórfido Este también lo hace a los cuerpos porfídicos más pequeños, que lo intruyen, así como también a la alteración potásica (Ossandón y otros, 2001). Los contactos intrusivos del Pórfido Este generalmente tienen rumbo NNW–SSE, subparalelo a la mayoría de la foliación.

La Falla Mesabi corresponde a una importante estructura a escala distrital, tiene una tendencia hacia el NNE–SSW, desde la parte Sureste de la mina Chuquicamata y mantea al Oeste. Esta falla posiciona rocas volcánicas y sedimentarias, localmente foliadas, de edad Triásico en su lado occidental con anfibolitas de edad Paleozoico y la Granodiorita Elena, de edad Triásico, en su lado oriental (Rivera y otros, 2012). Se interpreta como una falla normal en su origen, la que ha sufrido reactivaciones en modo normal inverso, esto asociado a su alto ángulo de manteo. Los desplazamientos verticales, relacionados a su actividad en el tiempo, habrían condicionado la depositación, preservación y/o erosión de las unidades estratigráficas (Castelli, 2002). La Zona de Falla Mesabi induce una deformación de fábrica dúctil y semi-dúctil, con milonitas y flujo

cataclástico, que posee indicadores cinemáticos dextrales (Lindsay y otros, 1995; Reutter y otros, 1996, todos en Siña, 2005). Estos autores evidenciaron que esta falla estuvo activa antes y después del emplazamiento del Pórfido Chuquicamata y, probablemente también durante la formación de las etapas tempranas de la mineralización, por lo cual le han asignado un rol clave en la localización y génesis del depósito.

La Falla Estanques Blancos y otras fallas dextrales de orientación NE–SW, desplazan a la Falla Mesabi, al Complejo Porfídico Chuquicamata, y a todas las rocas antiguas, desde unos pocos a unos cientos de metros (Chong y Pardo, 1993; Lindsay y otros, 1995, todos en Rivera, 2012). En las minas Chuquicamata y Radomiro Tomic, donde las fallas de este sistema cortan a las rocas del Pórfido Chuquicamata, éste tiende a dividirse en varias hebras, muchas de las cuales se encuentran mineralizadas. Estas hebras se doblan de Suroeste a Sur cerca de la Falla Oeste, al parecer debido a la fricción sinistral, y en última instancia, aparentemente truncadas por la Falla Oeste. Un segundo sistema de fallas se observa localmente en la Mina Chuquicamata, este tiene orientación NW–SE, mantea abruptamente, y tiene desplazamientos sinestrales (Perry, 1952; Lindsay y otros, 1995, todos en Rivera y otros, 2012).

Es evidente que el Complejo Porfídico Chuquicamata y sus rocas cajas han sido sometidos a varios eventos de deformación, los cuales han actuado de forma continua o discontinua durante un periodo prolongado de tiempo. Algunas de las estructuras resultantes pueden haber facilitado el emplazamiento del complejo porfídico e influenciado en una orientación original NNW–SSE del mega dique, modificada posteriormente a una orientación NNE–SSW, debido a los desplazamientos de fallas de orientación NE–SW del Sistema Estanques Blancos. Por lo menos algunas estructuras dúctiles, las más cercanas en edad al emplazamiento del pórfido y a la mineralización de cobre, indican acortamiento de Este a Oeste y engrosamiento de la corteza terrestre, también los sistemas de falla frágiles indican acortamiento de Este a Oeste, pero con extensión de Norte a Sur, durante y después del período de mineralización.

En el bloque Oeste del distrito, en el área del Clúster Toki, las rocas volcánicas paleozoicas de la Formación Collahuasi y las rocas sedimentarias marinas de edad Jurásico están plegadas y falladas. Las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Quebrada Mala, de edad

Cretácico Superior, fueron plegadas en un sinclinal de orientación N–S en el área de Cerro Negro. Más al Norte, unidades cretácicas de la Formación Tolar fueron deformadas generando el anticlinal San Lorenzo de tendencia NE–SW (Rivera y otros, 2012).

La foliación milonítica, de orientación NE–SW, es cortada por todas las fases del Batolito Fortuna, pero existe una foliación de orientación similar que se superpone a algunas de las rocas intrusivas, indicando una deformación coincidente con el emplazamiento. Esto es interpretado como una zona de falla dúctil a lo largo de la cual fue intruido el Batolito Fortuna (Dilles y otros, 2011 en Rivera y otros 2012).

La falla Toki Norte, de rumbo NW–SE, se encuentra bajo la cubierta de gravas en el sector Norte del Clúster Toki. En la parte Noreste de la falla, rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico Superior yacen directamente sobre el basamento conformado por la Formación Collahuasi, rocas volcánicas triásicas y granodioritas triásicas, y están intruidas hacia el Oeste por la Granodiorita Fortuna. En el lado Suroeste de la falla, el basamento de la formación Collahuasi y los conglomerados, rocas volcánicas y granodioritas de edad Triásico están cubiertas por una gruesa capa de rocas carbonatadas y otras rocas sedimentarias jurásicas, y están intruidas por monzodioritas cuarcíferas tipo Los Picos y por pórfidos del Clúster Toki (Rivera y otros, 2012).

Son comunes también las estructuras de orientación NW–SE a NNW–SSE, la mayoría con pequeños desplazamientos sinestrales, que se observan en el depósito Ministro Hales y pueden estar relacionadas con el sistema de orientación NW–SE descrito anteriormente (Tomlinson y otros, 2010; Dilles y otros, 2011, todos en Rivera y otros, 2012).

La Falla Oeste es el rasgo estructural de mayor relevancia en el Distrito y su última actividad corresponde al evento de deformación más reciente. Su plano de falla es mapeable entre Mina Radomiro Tomic y Mina Ministro Hales y está acotada tanto al Norte como al Sur. En Mina Chuquicamata, yuxtapone pórfidos mineralizados y la Granodiorita Elena, por el Este, contra una estéril y petrográficamente distinta Granodiorita Fortuna, por el Oeste, mientras que en Mina Ministro Hales posiciona el sistema mineralizado, por el Oeste, contra la gravas de la Formación Calama, por el Este (Rivera y otros, 2012).

Se ha propuesto un desplazamiento sinistral de 30 a 35 km a lo largo de esta falla desde el Eoceno, sobre la base de correlaciones entre intrusiones del Complejo Fortuna y sus rocas caja, con otros intrusivos de edades, composiciones y rocas cajas similares, presentes en el Complejo Intrusivo de El Abra, al Norte del Distrito (Dilles y otros, 1997, 2011; Tomlinson y Blanco, 1997a, 1997b, todos en Rivera y otros, 2012). Esto es consistente con la ocurrencia de que intrusivos triásicos, como la Granodiorita Elena, se encuentren más extendidos, en ambos lados de la Falla Oeste, que los intrusivos del Eoceno, con distancias de 13 km a más de 22 km de desplazamiento sinistral.

Si se asume que la mineralización de Mina Ministro Hales proviene del Depósito Chuquicamata, se tendría apenas un desplazamiento sinistral de 7 a 9 km, por lo que estos dos yacimientos no pueden haber sido originalmente parte del mismo depósito (Álvarez, 1993; Sillitoe y otros, 1996, todos en Rivera y otros, 2012). A pesar de esto, siendo originalmente partes de diferentes depósitos, ninguna de las porciones desplazadas ha sido descubierta aún (Rivera y otros, 2012).

El gran espesor de los conglomerados de la Formación Calama, que se encuentran en contacto por falla con la mineralización de Mina Ministro Hales a través de la Falla Oeste, indica que el último desplazamiento en la falla tuvo lugar después de su depositación y de los últimos eventos de alteración y mineralización hace 31,5 Ma aproximadamente. Este movimiento es anterior a la sedimentación de la Formación Jalquinche hace aproximadamente 16 Ma, la cual ocurrió en ambos lados de la falla (Álvarez y Miranda, 1991; Rivera, 1995; Sillitoe y otros, 1996; Müller y Quiroga, 2003, todos en Rivera, 2012).

2.3. GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO CHUQUICAMATA

Chuquicamata es un depósito elongado en dirección NNE–SSW, con 4 km de largo, 300 a 900 m de ancho en dirección E–W, más angosto en el Sur, más ancho en el Norte, y una columna vertical de mineralización económica reconocida de 1.600 m, 800 m bajo el fondo del rajo actual (Siña y otros, 2005). Sus unidades se describen a continuación (Figura 2.3).

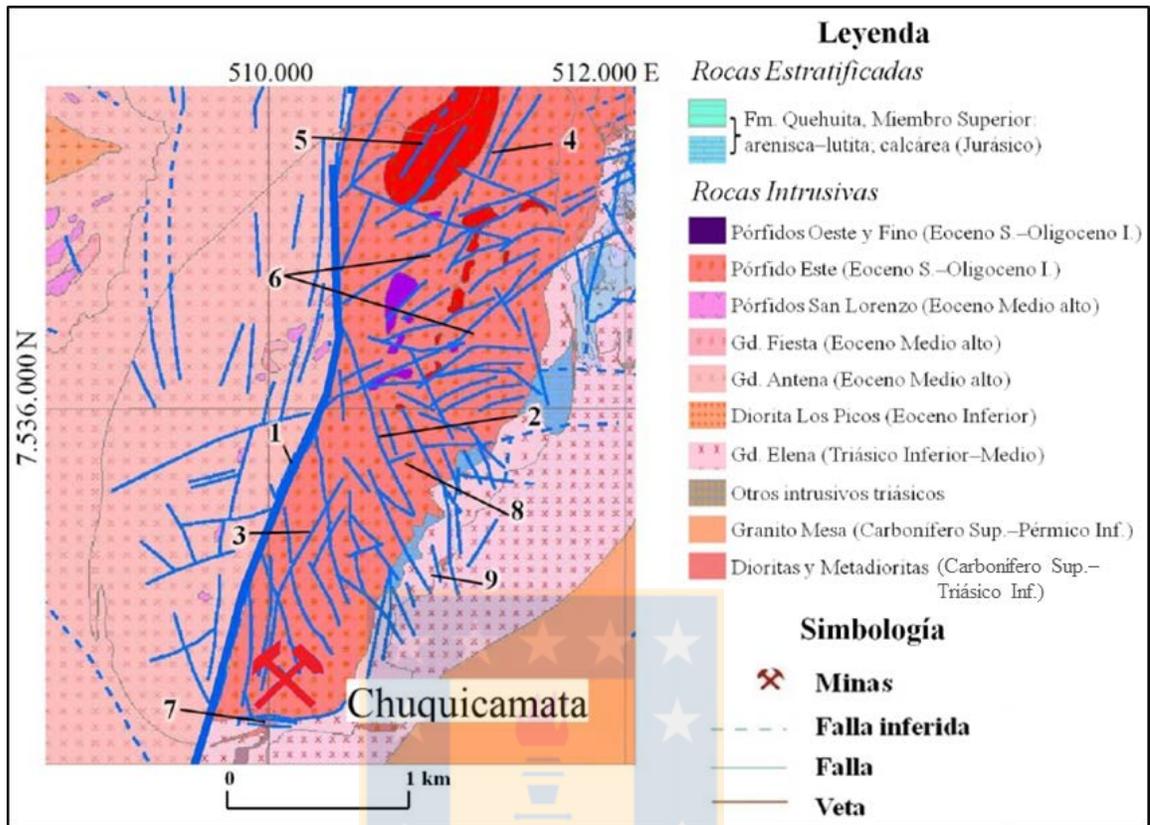


Figura 2.3. Geología local y estructuras principales del yacimiento Chuquicamata. (1) Falla Oeste; (2) Fallas NNW-SSE; (3) Falla Americana; (4) Falla C2; (5) Falla Zaragoza; (6) Sistema Estanques Blancos; (7) Falla Portezuelo; (8) Falla NNE-1; (9) Zona de Deformación Este. (Modificado de Rivera y otros, 2012).

2.3.1. Complejo Porfídico Chuquicamata

Complejo Intrusivo del Eoceno Inferior – Oligoceno Superior, que ocurre como un mega dique subvertical, está limitado, en su flanco occidental, por la Falla Oeste, que lo pone en contacto con el Complejo Granodiorítico Fortuna, y en su flanco oriental, por la Falla Mesabi o Zona de Deformación Este, que lo contacta con la Granodiorita Elena. Hacia el Sur el Complejo Intrusivo se acuña hasta alcanzar la forma de un pequeño dique de 30 a 40 m de espesor adosado a la Falla Oeste y limitado por la Falla Portezuelo, mientras que hacia el Norte, tiene continuidad más allá del Depósito Chuquicamata, abarcando el Proyecto Chuqui Norte y el Yacimiento Radomiro Tomic. Actualmente, se le ha reconocido a profundidades cercanas a los 2.000 m bajo la superficie, por lo que representa uno de los sistemas porfídicos más grandes del mundo. Los

eventos mineralizadores desarrollados en este complejo porfídico se presentan cortando a estas rocas, por lo cual se considera que su emplazamiento debió ser pre-mineral (Tomlinson y Blanco, 2008; Rivera y otros, 2012).

El Complejo se divide en tres variedades texturales principales, cuya composición general es granodiorita a cuarzo-monzodiorítica: Pórfido Este, Pórfido Banco y Pórfido Oeste de los cuales el primero es, por lejos, el más importante volumétricamente.

2.3.1.1. Pórfido Este

El Pórfido Este corresponde a una granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita, con textura fanerítica e incipientemente porfídica, de grano medio. Se compone de esporádicos a frecuentes cristales centimétricos de feldespato potásico con textura poikilítica. Su mineralogía se caracteriza por plagioclasa subhedral a euhedral, cuarzo deformado con feldespato potásico intersticiales, biotita subhedral y escasa hornblenda. Como accesorios se reconocen magnetita, esfeno y zircón (Siña y otros, 2005; Tomlinson y Blanco, 2008). Es este cuerpo el que alberga la mayor parte de la mineralización metálica de beneficio económico, con un contenido de fondo de cobre entre los 0,1 a 0,2% en peso, con las mayores leyes hospedadas en zonas de debilidad estructural que han sido el acceso tanto para los pórfidos más tardíos como para los sistemas de vetas y stockwork (Rivera y otros, 2012).

La edad de cristalización del Pórfido Este está datada en 34,6 Ma por el método U-Pb en circón (Ballard y otros, 2001). Los pórfidos Banco y Oeste aparecen como pequeños cuerpos cortando al Pórfido Este hacia la zona centro-Norte y hacia el Noreste del yacimiento respectivamente (Ossandón y otros, 2001).

2.3.1.2. Pórfido Banco

Este cuerpo es un conjunto de filones de composición monzogranítica, más fino y más porfídico que el Pórfido Este (Ossandón y otros, 2001). Se distribuye principalmente hacia el Norte del depósito, sus contactos con el Pórfido Este son nítidos y abruptos, y es menor en volumen que

este último. Se caracteriza por sus fenocristales bimodales de plagioclasa, cuarzo, biotita y escasa hornblenda, junto a megacristales de feldespato potásico, contenidos en una masa fundamental aplítica muy fina de cuarzo y feldespato potásico (Tomlinson y Blanco, 2008). Su edad es de $34,1 \pm 0,3$ Ma datado por U-Pb en circón (Ballard y otros, 2001).

2.3.1.3. Pórfido Oeste

Aflora hacia el Norte del depósito en forma de cuerpos irregulares intruyendo al Pórfido Este con contactos gradacionales y difusos. Mineralógica y químicamente es similar al Pórfido Este, sin embargo, tiene textura bimodal, claramente porfídica, con masa fundamental aplítica de grano más fino. También está localmente foliado y contiene megacristales de feldespato potásico (Rivera y otros, 2012). Su edad U-Pb en circón es de $34,0 \pm 0,3$ Ma (Ballard y otros, 2001).

Los pórfidos Oeste y Banco influyen menos en la distribución de las leyes de cobre. El Pórfido Banco puede definir zonas de menor ley, pero, en general, ambos están cortados y afectados por los principales eventos de alteración y mineralización, de manera similar al Pórfido Este y, por lo tanto, el Pórfido Chuquicamata, considerado así en su conjunto de variedades texturales, puede asumirse esencialmente de naturaleza pre-mineral, al menos en cuanto a los eventos de mineralización principales del depósito (Siña y otros, 2005).

2.3.2. Rocas de caja del Pórfido Chuquicamata

2.3.2.1. Granodiorita Elena

Corresponde a una granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita y subordinada hornblenda, es de color gris rosado claro a gris medio, muy similar al Pórfido Este, diferenciándose por su textura hipidiomórfica equigranular de grano medio y por no tener megacristales de feldespato potásico. La Granodiorita Elena posee muy escasa a nula mineralización de sulfuros, la que está principalmente asociada a los contactos con diques andesíticos; es decir, esta litología sería una roca muy poco receptiva a la mineralización de sulfuros aun cuando posee alteración esencialmente clorítica y corresponde a la roca de caja.

Aparece expuesta al Este y Noreste del yacimiento, sectores donde está limitada por la Falla Mesabi. Por el lado Oeste, en el extremo Sur del yacimiento, la Granodiorita Elena se encuentra en contacto con el Pórfido Este, es un límite que se considera difuso por la similitud macroscópica de ambas rocas. Su edad, obtenida con el método U-Pb en circón, arrojó 37,7 Ma (Ballard y otros, 2001).

2.3.2.2. Granodiorita Fortuna

Es un stock granodiorítico de hornblenda y biotita, con textura fanerítica de grano medio a grueso, con variaciones locales. En las cercanías de la Falla Oeste, dicha unidad está afectada por fuerte brechización y cizalle, con abundantes vetillas de calcita y hematita. Sus minerales máficos están generalmente cloritizados, en una alteración de baja intensidad cuya relación con los eventos mineralizadores que ocurren en el Pórfido Chuquicamata no es clara, aunque se han identificado en ella localmente sectores profundos ubicados entre 1 a 2 km al Oeste de la Falla Oeste, con débil alteración potásica (biotita secundaria y feldespato potásico) y mineralización tardimagmática de baja ley (pirita, calcopirita y molibdenita subordinada), la que está asociada a su facie Pórfido San Lorenzo.

Por el Este, la Granodiorita Fortuna está truncada por la Falla Oeste, quedando en contacto con el Pórfido Chuquicamata. Su edad es de 39-38 Ma (U-Pb en circón; Ballard y otros, 2001).

2.3.2.3. Metavolcanitas y Metasedimentitas

Se compone de una asociación de rocas de origen sedimentario, volcánico e ígneo que ha sido afectada por un metamorfismo de contacto y dinámico, dando como resultado un conjunto de rocas parcialmente metamorfizadas y milonitizadas, y rocas completamente silicificadas.

En este conjunto se distinguen metasedimentos clásticos y químicos, milonitas, cataclasitas, andesitas volcánicas, rocas córneas y rocas deformadas indiferenciadas. Por lo general, estas rocas metamorfizadas son estériles, aunque cabe destacar que algunos sondeos profundos han

cortado las metavolcanitas y metasedimentitas con tramos de interés en mineralización tipo skarn de calcopirita y magnetita.

Aflora como una franja irregular de orientación N-S. El cuerpo se encuentra “colgado” con contactos principalmente estructurales hacia el Oeste con el Pórfido Este y hacia el Este con la Granodiorita Elena (Siña y otros, 2005).

2.3.3. Eventos de Alteración y Mineralización Hipógenos

La mineralización está hospedada en el Complejo Porfídico Chuquicamata y consiste en un gran volumen de alteración potásica de fondo con zonas más intensas, las cuales se encuentran sobreimpuestas por una alteración filica de sericita-pirita más joven (Rivera y otros, 2012).

Se ha comprobado que la inyección de cobre al sistema hidrotermal ha sido en gran parte, gracias a los eventos tempranos de mineralización y alteración, pero que las mayores leyes hipógenas ocurren en zonas con alteración cuarzo-sericítica tardía que a su vez obliteró las asociaciones de alteración tempranas (Codelco Norte, 2009).

2.3.3.1. Eventos Tempranos de Alteración con Asociaciones de Baja Pirita

Corresponden a las etapas hidrotermales más tempranas reconocidas en el depósito y se caracterizan por ser de sulfuración baja a intermedia, con menores contenidos de pirita.

Alteración Potásica de Fondo

Se caracteriza por reemplazos mineralógicos que preservan la textura original del Pórfido Chuquicamata. Existe reemplazo selectivo de los máficos por biotita secundaria, las plagioclasas están albitizadas y suelen estar parcial y selectivamente alteradas a feldespato potásico, sericita y/o arcillas. La magnetita original de la roca intrusiva está destruida o hematitizada. Biotita y feldespato potásico también se encuentran como escasas microvetillas con cuarzo, calcita y sulfuros (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

La mineralización ocurre principalmente diseminada y, en menor medida, en microvetillas, donde la calcopirita es el sulfuro predominante y solo localmente puede presentarse asociada con bornita o pirita (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

Corresponde al evento más temprano de alteración y mineralización, típicamente tardimagmático, y se reconoce mejor distribuido hacia el Este y Norte del depósito. Sin embargo, en otros sectores aparecen relictos que indican que esta alteración estaba distribuida en todo el yacimiento, siendo sobreimpuesta y obliterada por eventos posteriores (Siña y otros, 2005).

Alteración Clorítica

Se caracteriza por una cloritización selectiva de los máficos primarios o secundarios y/o la aparición de vetillas de clorita cercana al sistema mineralizado, ocurre principalmente en los márgenes del depósito, coincidiendo con la disminución de las leyes de cobre. En las partes más altas del yacimiento, este límite clorítico coincide con la aparición de magnetita primaria preservada, demarcando también los límites del Potásico de Fondo. Sin embargo, en profundidad se ha detectado la ocurrencia de zonas marginales de baja ley con muy escasa clorita, pero que tienen magnetita primaria y/o hornblenda fresca preservada, no biotitizada, por lo cual tampoco pueden ser consideradas como pertenecientes al Potásico de Fondo. Por dicha razón, es que se les ha preferido llamar en forma genérica Alteración Clorítica y, en cualquiera de los casos, la textura del pórfido predominante se encuentra bien conservada (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

Características de este tipo de alteración son albitización selectiva de las plagioclasas y microvetillas de calcita y ankerita. Se reconoce escasamente la presencia de epidota en las partes más distales del depósito (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

La mineralización de baja ley del evento clorítico está diseminada y con la asociación característica de pirita y/o calcopirita. Hematita especular tardía en vetillas y diseminada es bastante frecuente (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

Potásico Intenso: Feldespato Potásico – Cuarzo de Grano Fino (Ksil)

Es la primera de una serie de alteraciones pervasivas que, en el caso del Ksil, oblitera la roca de manera parcial a totalmente, otorgándole un color grisáceo. Consiste en un reemplazo moderado a intenso de feldespatos y biotita por un agregado fino de feldespato potásico hidrotermal, cuarzo y sericita, en algunos casos asociados con albita secundaria. En la zona hipógena del depósito es común la ocurrencia significativa en el Ksil, de anhidrita diseminada y en vetillas (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

La mineralización ocurre principalmente en vetillas y microvetillas, donde las asociaciones características son bornita + calcopirita, además de digenita \pm covelina. Se aprecia una zonación de la mineralización del Ksil, predominando la bornita sobre la calcopirita en el Norte y centro del yacimiento, gradando a mayor calcopirita o solo calcopirita, hacia el Sur del mismo. Si bien estas asociaciones (bornita predominante o calcopirita mayoritaria) pueden estar juntas, en partes parecen representar dos pulsos distintos de mineralización, diferenciables en escala de detalle (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

Vetas y Vetillas de Cuarzo – Molibdenita

Aparece en cantidades importantes como “vetas azules” y “vetillas bandeadas” tipo B, en el eje central del depósito. Las zonas donde estas vetas y vetillas son más abundantes configuran un núcleo groseramente vetiforme, que se presenta con una orientación general N-S a NNE-SSW ubicado en el sector Sur del depósito.

Este evento corresponde al más importante en la introducción de molibdeno al sistema, de tal forma que el principal control geológico de la ley de molibdeno en el depósito está dado por la frecuencia volumétrica de las vetas y vetillas de cuarzo-molibdenita (Ossandón y otros, 2001).

Potásico Intenso: Sericita Gris Verde Temprana

Esta alteración está representada por la destrucción de la textura original de la roca debido al reemplazo de los minerales del pórfido por un agregado de sericita y cuarzo con feldespato

potásico subordinado. La sericita temprana se caracteriza por su color gris a gris-verdoso y por ser más gruesa que la sericita de alteraciones más tardías (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

La mineralización asociada esta finamente diseminada en forma de halos a lo largo de fracturas y vetillas tempranas, con bornita + calcopirita \pm digenita \pm covelina, cuyo evento es el que aporta la mayor cantidad de cobre al sistema mineralizado (Córdova y otros 2010).

Presenta las mismas asociaciones que el Ksil, pero sin pirita, mostrando una relación espacial con esta alteración, lo que ha permitido englobarla en una unidad de alteración mayor denominada Potásico Intenso (Siña y otros, 2005).

Vetillas de Calcopirita con Halos Sericíticos

En varias zonas del depósito, y con una disposición marginal a los cuerpos de alteración potásica intensa, se reconocen zonas con vetillas de calcopirita masiva y halos de cuarzo-sericita de color gris claro, con calcopirita diseminada y pirita subordinada, escasa o ausente. Aparentemente, constituyen el más tardío de los eventos tempranos de baja pirita, pues cortan a todos los tipos de alteración y mineralización descritos anteriormente (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

2.3.3.2. Eventos Tardíos de Cuarzo y Sericita con Asociaciones de Alta Pirita

Corresponden a las etapas hidrotermales más tardías del depósito y están caracterizadas por ser eventos de alta sulfuración con altos contenidos de pirita.

Alteración Cuarzo – Sericítica Pervasiva

Esta alteración consiste esencialmente en agregados de sericita (muscovita e illita), cuarzo y pirita que obliteran la textura original del pórfido, mediante el reemplazo intenso de los feldespatos y la biotita. También ocurren cantidades menores de arcillas del tipo caolinita, reemplazando principalmente a la plagioclasa, y escasas vetillas de alunita-cuarzo, bajo el techo de sulfatos, se observa la presencia de anhidrita. (Siña y otros, 2005; Rivera y otros, 2012).

Varios pulsos de mineralización sulfurada, asociados a esta etapa fílica tardía, reflejan una evolución de asociaciones de alta pirita, que se superponen en el tiempo y el espacio, según un incremento paulatino en su estado de sulfuración: pirita-calcopirita, pirita-bornita, pirita-digenita, pirita-enargita (con blenda y tennantita subordinadas) y pirita-covelina. El ciclo también incluye un pulso tardío y marginal, en zonas adyacentes a la Falla Oeste, de vetillas de pirita estériles (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010).

Un evento más tardío de pirita-enargita, constituye el principal aporte de arsénico al sistema. Se localiza preferentemente en el sector Sur del depósito, aunque también se extiende hacia la zona central. Este evento ocurrió en un ambiente más frágil, emplazándose con un evidente control estructural, como vetas masivas o también como matriz de brechas en zonas de abundantes vetas tectonizadas de cuarzo-molibdenita (Siña y otros, 2005).

Su distribución se observa principalmente en la mitad occidental del Depósito Chuquicamata y las vetas se distribuyen en varias orientaciones, aunque aquellas estructuras mayores, de hasta ~1 m de espesor, tienden a seguir los rumbos NE-SW o NW-SE de fallas dextrales o sinestrales, respectivamente (Rivera y otros, 2012).

Potásico Intenso Relicto

En zonas con alteración Cuarzo-Sericítica Tardía pueden reconocerse alteraciones tempranas relictas o texturas “fantasma” (Ksil o Sericita Gris Verde), a veces como halos de vetillas tempranas, con abundantes sulfuros finamente diseminados, que sugieren que antes de la superposición del evento tardío existió mineralización temprana de alta ley, asociada a la alteración Potásica Intensa. En este caso, las asociaciones tempranas (calcopirita-bornita-digenita) fueron posteriormente transformadas y reemplazadas por una asociación tardía de mayor sulfuración (pirita-digenita o pirita-covelina), pero pudieron conservar, al menos parcialmente, las texturas y modo de ocurrencia de la mineralización del evento Potásico Intenso, ya sea en microvetillas o con sulfuros finamente diseminados.

En consecuencia, a las zonas más o menos continuas que poseen estas características, se las ha denominado Potásico Intenso Relicto, las que se distribuye en franjas con orientación N-S y al

interior de la zona de alteración Cuarzo-Sericítica, donde se concentran las mayores leyes de cobre del depósito (Siña y otros, 2005; Córdova y otros, 2010; Rivera y otros, 2012).

2.3.4. Eventos de Alteración y Mineralización Supérgenos.

La actividad supérgena en Chuquicamata originó importantes cambios en la parte más alta del depósito, generándose amplias zonas lixiviadas, oxidadas, con enriquecimiento secundario y lixiviación total o parcial de los sulfatos de calcio (Siña y otros, 2005).

2.3.4.1. Zona de Sulfatos

Zonas donde se encuentra anhidrita diseminada y en vetillas, y yeso en vetillas. Estos sulfatos son importantes componentes de la zona hipógena del depósito, ocurren de manera abundante en las zonas de Potásico Intenso y de Cuarzo-Sericítica Tardía mientras que en el Potásico de Fondo, son más bien escasos y, en la alteración Clorítica, se reconocen muy esporádicamente (Siña y otros, 2005 y Córdova y otros, 2010).

Uno de los efectos más notorios y resaltantes de la actividad supérgena en la parte superior del depósito es la lixiviación parcial o total de estos sulfatos, que genera cavidades y fracturas abiertas, originando una roca más porosa y con mayor fracturamiento. A partir del modelamiento de los sulfatos del depósito y de los procesos supérgenos que los afectan, se han definido tres zonas principales (Siña y otros, 2005):

Zona Primaria

Con anhidrita y yeso, no tiene cavidades, por lo que estos minerales se encuentran sellando la roca, la cual es, particularmente, competente.

Zona de Transición o Parcialmente Lixiviada

Posee un contenido mayor de yeso, con anhidrita esporádica, tiene cavidades y fracturas abiertas, por lo que corresponde a una roca menos competente.

Zona Secundaria

Ausencia de anhidrita y yeso, ya que han sido totalmente lixiviados, tiene abundantes cavidades y fracturas abiertas, resultando en una roca poco competente. En esta zona puede encontrarse, localmente y de manera escasa, un yeso selenítico muy tardío de origen supérgeno, pero que no se considera para efectos del modelamiento de estas zonas.

Las zonas Secundaria y de Transición alcanzan grandes profundidades hacia el Oeste del depósito en la unidad de alteración Cuarzo-Sericítica, debido a sus características menos reactivas y de altos contenidos en pirita, propenso a la generación de ácido en las soluciones supergénicas, que origina una cuenca profunda de este mineral, que alcanza hasta la cota 1.600 m s.n.m. (Siña y otros, 2005).

2.3.4.2. Enriquecimiento Secundario

El enriquecimiento con sulfuros secundarios es una característica muy relevante de las zonas supérgenas remanentes en el depósito. Se reconocen tres zonas (Siña y otros, 2005):

Primario

No hay sulfuros secundarios ni actividad supérgena, por lo tanto no existe enriquecimiento. La mineralización es hipógena y coincide, en términos generales, con la zona sellada de anhidrita y yeso.

Enriquecimiento Débil

Se encuentran sulfuros secundarios subordinados, en fracturas, zonas de fallas y reemplazando incipientemente a los sulfuros de cobre primarios. La mineralización es generalmente hipógena y la pirita se observa limpia y brillante. Esta zona está en la Zona de Transición de sulfatos, es decir, coexiste con yeso, pero también con cavidades y fracturas abiertas producto de la lixiviación parcial de sulfatos (anhidrita).

Enriquecimiento Fuerte

Los sulfuros secundarios son predominantes, reemplazan en más de un 75% a los sulfuros de cobre primarios. La bornita está totalmente sustituida. La mineralogía es fundamentalmente supérgena y la pirita se observa sucia con pátinas de sulfuros secundarios. Ocurre en la Zona Secundaria de sulfatos lixiviados, con abundantes cavidades y alto fracturamiento, la cual está explotada casi en su totalidad. El sulfuro secundario más importante es calcosina, pero también hay cantidades significativas de covelina secundaria.

2.3.5. Estructuras Principales

El emplazamiento de los pórfidos y la formación del Depósito de Chuquicamata, así como sus eventos de mineralización y alteración, están fuertemente controlados por las estructuras, a lo largo de toda su historia genética (Ossandón y otros, 2001). Los rasgos estructurales más importantes se describirán a continuación en orden cronológico.

2.3.5.1. Zonas de Cizalle Frágil – Dúctil de orientación NNE–SSW (Sistema Mesabi)

Formada por la Zona de Deformación Este, las zonas cataclásticas que controlan la distribución de la alteración Potásica Intensa, la Falla Americana, la Falla Zaragoza y la Zona de Falla C-2. Este juego de estructuras es el más temprano del depósito, y probablemente controló el emplazamiento del Pórfido Chuquicamata y de las etapas tempranas de la mineralización.

Zona de Deformación Este

Ha sido reconocida e interpretada, espacialmente, de manera continua en los sectores central y Suroriental del depósito, conformando el contacto entre el Complejo Porfídico Chuquicamata y la Granodiorita Elena (Figura 2.3-9). Es una zona compleja, constituida por rocas de falla cohesivas como milonitas, cataclasitas y brechas de falla recrystalizadas, de potencia variable, con manteo abrupto hacia el Oeste ($\pm 80^\circ$). Las brechas contienen fragmentos de los tipos litológicos intrusivos que las encajan y también de cuarzo, probablemente de las etapas tempranas de

mineralización, en una matriz recristalizada de clorita, feldespatos y magnetita, propia de un protolito ígneo.

La brecha se observa sobreimpuesta por la fábrica dúctil y penetrativa de las milonitas, y ambas litologías están, a su vez, cortadas por vetillas y pequeñas brechas tardías de especularita, con trazas esporádicas de piritita y calcopiritita. A veces las milonitas también se encuentran cortadas por vetillas tardías, no deformadas, de epidota.

Las cataclasitas constituyen sectores de actividad tectónica más frágil y todos estos tipos litoestructurales poseen fuerte variabilidad en su localización e importancia a lo largo de la superficie de la Zona de Deformación Este, la cual es, a su vez, variable también en su geometría.

El reconocimiento de una deformación equivalente y con similares características en los metasedimentos y metavolcanitas que están en contacto con el Pórfido Chuquicamata, en el margen Noreste del yacimiento, permite extrapolar esta zona hacia el Norte y considerarla como una prolongación hacia el Sur del sistema de Falla Mesabi con un progresivo curvamiento hacia el Oeste por un truncamiento y desplazamiento dextral de ella, a través de los sistemas Estanques Blancos y Portezuelo, asociado a un sentido de movimiento dextral, deducido sobre la base de indicadores cinemáticos dúctiles. Debido a las relaciones geológicas de contacto observadas entre la milonitización, la brechización, los fragmentos de cuarzo y el Pórfido Chuquicamata, se puede inferir que esta zona de deformación tiene una historia compleja y multiepisódica, que con seguridad, existía antes de la intrusión del pórfido y tuvo reactivaciones posteriores a su emplazamiento, deformándolo en etapas entre eventos mineralizadores más o menos profundos y confinando el sistema hidrotermal por el Este (Reutter y otros, 1996; Lindsay, 1997, todos en Siña y otros, 2005).

Zona de Falla Americana

Esta zona de falla es un rasgo estructural mayor de orientación aproximada N-S y un manteo variable entre 80° y 88° al Oeste. Está vinculada a la formación del sistema mineralizado, asociado a la zona de cizalle Riedel post-mineral. Esta estructura se manifiesta como una zona de brecha con matriz de piritita y enargita que fractura y tectoniza principalmente a vetas de cuarzo-molibdenita, se reactiva debido al cizalle sinistral expresado por la Zona de Falla Oeste. Bajo

esta condición, ocurre como estructura antigua sin mineral, cumpliendo el rol de limitar por el Este a la zona de descarga hidrotermal de aquellos eventos de alteración y mineralización primarios, función que comparte con la Zona de Falla C2, ocurriendo ambas condicionadas a la cinemática de la Zona de Falla Estanques Blancos (Siña y otros, 2005; Véliz, 2009).

Se localiza principalmente en el sector Sur de la mina, adosada a la Zona de Falla Oeste hasta la coordenada 3500N, donde deja de ser continua debido a la presencia de fallas menores de orientación ENE–WSW y WNW–ESE (Figura 2.3-3) hacia el Sur se encuentra truncada por la Zona de Falla Portezuelo (Veliz, 2009).

Zona de Falla C2

Se localiza en el extremo Norte del depósito (Figura 2.3-4) y, tal como la Zona de Falla Americana, es una estructura antigua asociada a la formación del sistema mineralizado, cuya traza es visible entre las coordenadas 5800N – 6400N y 5200N – 4600N. Su dominio corresponde a una franja de hasta 150 m con una actitud aproximada N20°E/80°NW. En esta franja coexiste una deformación frágil cohesiva, con brechas y pseudotaquilitas, junto con salbanda gris. Las brechas tienen indicadores cinemáticos asociados a movimientos dextrales sincrónicos con la mineralización primaria, mientras que la salbanda posee indicadores cinemáticos compatibles con movimientos sinestrales, similares a los de la Zona de Falla Americana. Esta estructura se interpreta como la porción septentrional de la Zona de Falla Americana, cumpliendo un rol similar a ésta (Véliz, 2009).

Falla Zaragoza

Ubicada en el extremo Norte de la mina (Figura 2.3-5), cercana a la Zona de Falla Oeste. Es una estructura vertical de rumbo N–S a NNE–SSW y corresponde a una veta con cataclasis reactivada como falla sinistral-inversa (Véliz, 2009).

2.3.5.2. Foliación Dúctil en el Pórfido Chuquicamata

Este rasgo estructural corresponde a diferentes zonas de ocurrencia discreta, caracterizadas por un cizalle milonítico con foliación y lineación dúctil, causadas por orientación, aplanamiento y estiramiento de minerales máficos y granos de cuarzo, en las distintas variedades litológicas del Pórfido Chuquicamata. Relaciones de contacto evidencian que esta deformación es posterior a las alteraciones potásicas tempranas, pero anterior a la alteración Cuarzo-Sericítica Tardía (Siña y otros, 2005).

2.3.5.3. Sistema de Fallas Estanques Blancos y Portezuelo

Consiste en un set de fallas de actitud general ENE–WSW/subvertical, que se dispone a lo largo de todo el depósito, pero es particularmente penetrativo en la parte Norte, donde se ubica la Zona de Falla Estanques Blancos y hacia el Sur con la Zona de Falla Portezuelo (Siña y otros, 2005).

Zona de Falla Estanques Blancos

De orientación ENE–WSW con manteo al SSE, está presente entre las coordenadas 5000N – 6000N (Figura 2.3-6) y corresponde a un conjunto de estructuras con movimiento dextral–normal, posterior a la mineralización primaria, que pone en contacto porciones profundas del sistema porfídico en el bloque yacente (Norte) y partes más superficiales del mismo en el bloque colgante (Sur) (Véliz, 2009).

Esta estructura cumple el rol de limitar dos ambientes del sistema porfídico. En el bloque Norte, el escaso desarrollo del evento hidrotermal revela una mayor heterogeneidad del sistema mineralizado, mientras que el bloque Sur, vinculado a la zona de descarga hidrotermal, la heterogeneidad es comparativamente menor. Esta zona de falla tiene formas anastomosadas e incluye vetas de cuarzo-molibdenita, pirita-enargita con halos argílicos y rocas miloníticas, lo que implica una directa relación con la formación del sistema mineralizado. La salbanda que se puede observar indicaría su posterior reactivación mediante movimientos dextrales–normales, que cortan y desplazan la mineralización primaria, y al Pórfido Banco (Véliz, 2009).

Zona de Falla Portezuelo y NNE-1

La Falla Portezuelo se encuentra en el extremo Sur de la mina (Figura 2.3-7), con un patrón de orientación ENE–WSW y manteo consistente y sistemático hacia el Noroeste. Se manifiesta mediante trazas más o menos continuas, que muestran movimientos post-mineralización primaria, dextrales–normales. Esta zona de falla flexiona a la Falla Oeste, modificando su manteo en aproximadamente 25°.

Al igual que la Zona de Falla Estanques Blancos, está asociada a la formación del sistema mineralizado y, por lo tanto, reactiva la anisotropía heredada cortando a este sistema, al cual ella ayudó a permeabilizar (Véliz, 2009).

De igual manera, el sistema NNE-1, ubicado en el sector central–Sur del depósito (Figura 2.3-8), se desarrollaría bajo una estrecha relación con los dos ya mencionados, siendo post-mineralización primaria, de orientación NNE–SSW y carácter dextral–normal, configurando, en conjunto, un sistema escalonado que va exponiendo las partes más profundas del cuerpo mineralizado desde el Norte (área de Mina Radomiro Tomic y Norte de Chuquicamata) a las más superficiales hacia el Sur (Mina Ministro Hales) (Siña y otros, 2005; Véliz, 2009).

2.3.5.4. Zona de Falla Oeste

Corresponde al rasgo estructural más importante de la Mina Chuquicamata y su traza está presente a lo largo de todo el yacimiento (Figura 2.3-1). De rumbo N–S a N10°E, con manteo variable al Oeste y espesores que fluctúan entre 15 a 60 m. Su aspecto más característico es que, aun manteniendo generalmente hacia el Oeste, su traza mantiene su diseño conforme sube en cota, no siendo perturbado por la topografía del rajo e incluso más compatible con un manteo hacia el Este. Este efecto es causado por otros rasgos estructurales posteriores a la Falla Oeste, que generan flexión plástica de su traza, la que, al estar conformada principalmente por arcillas (salbanda) no se comporta de manera totalmente frágil ante los esfuerzos (Véliz, 2009).

La Falla Oeste genera un pliegue de arrastre del sistema mineralizado, el cual cambia desde una orientación NNE–SSW (Falla C2) ubicada en el sector Norte del depósito, a una dirección paralela a su traza y cercana a la N–S (Falla Americana). Esta estructura posee, al menos, dos

eventos de deformación, uno temprano, expresado mediante brechas de falla, y otro tardío, representado por salbanda negra (Traza Este) y salbanda roja (Traza Oeste). Ambos eventos se observan a lo largo de toda la traza, sin embargo, el evento temprano predomina en el sector central de la mina, donde desarrolla su mayor espesor (Véliz, 2009).

2.3.5.5. Zona de Falla NNW – SSE y WNW – ESE (Cizalle Riedel)

Corresponden a estructuras con arreglo geométrico y cinemático compatible con zonas de cizalle transcurrente sinistral. Las estructuras NNW–SSE son sintéticas (R) y las fallas WNW–ESE son antitéticas (R') al movimiento de la falla maestra, que corresponde a la Falla Oeste. Estas estructuras, en posición Riedel, expresan desplazamientos oblicuos con una componente horizontal más importante que la componente vertical. Las de orientación NNW–SSE son fallas que exhiben rechazos horizontales sinestrales, mientras que las de orientación WNW–ESE son dextrales (Véliz, 2009).

Esta zona de cizalle está bien definida y gobierna los patrones direccionales en el sector Sureste y central de la mina, hasta aproximadamente la coordenada 4500N, extendiéndose en forma débil hasta la coordenada 5300N. La zona de cizalle total involucra un espesor variable de hasta 1 km y desplaza a las fallas de orientación NNE–SSW y a la traza de la Falla Oeste (Véliz, 2009).

3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA ESTRUCTURAL

3.1. GENERALIDADES

La caracterización geotécnica estructural es la base de los procesos ingenieriles de diseño minero y de análisis de estabilidad. Las características y el comportamiento del macizo rocoso están íntimamente ligados a la geología de cada yacimiento, la cual es estudiada para entender los procesos formadores del depósito, lo que permite identificar y definir unidades litológicas y de alteración y mineralización. Bajo este contexto, y desde el punto de vista de la geotecnia, se describen a continuación las definiciones del modelo de Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB).

3.2. UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS

Para la caracterización geotécnica de Mina Chuquicamata, se ha desarrollado, a partir del año 1999, el concepto de Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB), las que consisten en cuerpos relativamente homogéneos y que son, básicamente, el resultado de la superposición de las Unidades Geológicas de Alteración (UGA) a las Unidades Litológicas.

En actualizaciones posteriores esta relación de superposición está restringida a la zona mineralizada del rajo, esto es, la zona comprendida entre la Falla Oeste y el límite Este de la UGA Clorítico. Respecto a los sectores sin información del modelo UGA, se han realizado actualizaciones del modelo de UGTB del año 2005 con información de sondajes geotécnicos e hidrogeológicos, celdas superficies, cruzados geotécnicos y secciones de la Fase 9 de Expansión Norte Mina Sur (ENMS) (Codelco Norte, 2009).

De todo lo anterior se desprenden 13 Unidades Geotécnicas Básicas (Figura 3.1). Los valores de los parámetros geotécnicos característicos para cada unidad pueden ser revisados en el Anexo E.

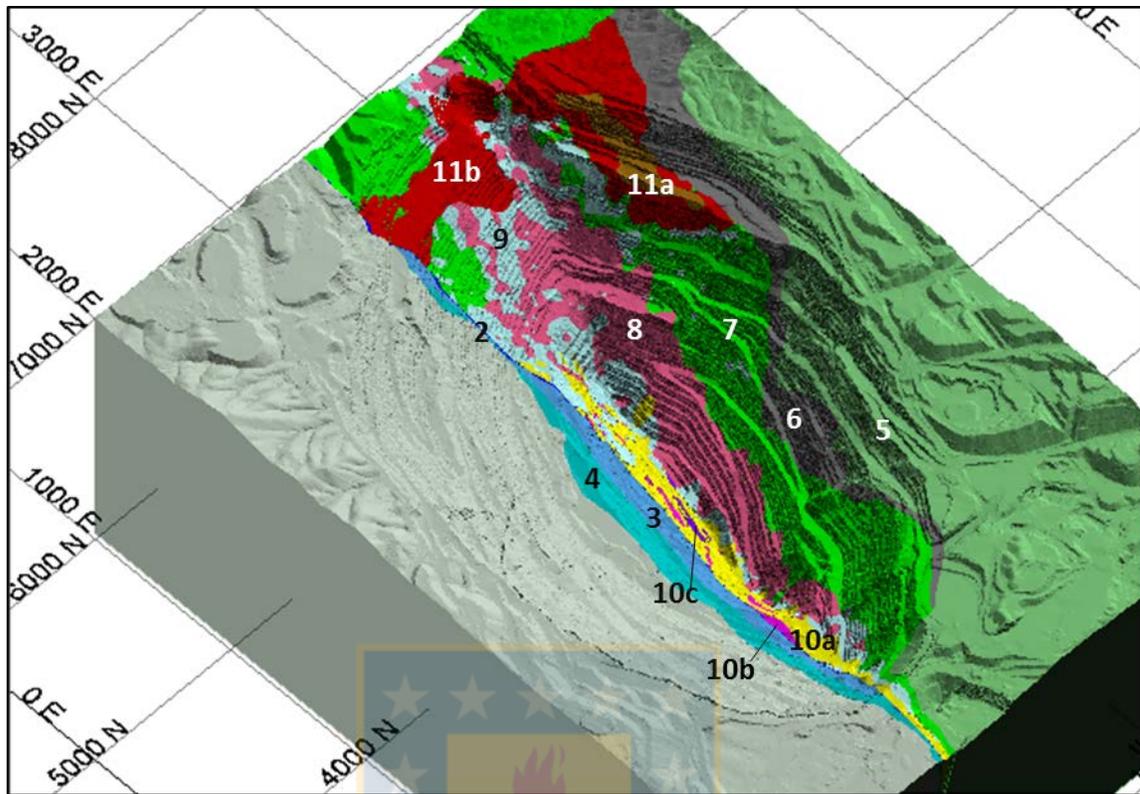


Figura 3.1. Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB) presentes en Mina Chuquicamata. (1) Granodiorita Fortuna, (2) Brecha Entre Falla, (3) Zona Cizalle Intenso, (4) Zona Cizalle Moderado, (5) Granodiorita Elena Sur, (6) Metasedimentos, (7) Pórfido Este Clorítico, (8) Pórfido Este Potásico, (9) Pórfido Este Sericítico, (10) Roca Cuarzo Sericita (10a) Cuarzo Igual Sericita, (10b) Cuarzo Menor Sericita, (10c) Cuarzo Mayor Sericita, (11) Lixiviado (11a) Homogéneo, (11b) Heterogéneo. (Sólidos creados en software Vulcan 8.2, tomados de la actualización de las UGTB de 2014).

Previo a la descripción de cada una de estas unidades es importante aclarar algunos conceptos geotécnicos como son:

- **PLT:** *Point Load Test*, corresponde a un ensayo *in situ* del testigo, a través de un instrumento de carga puntual, el cual entrega la resistencia del material ensayado en unidades KN (kiloNewton) y Bar.
- **UCS:** *Uniaxial Compressive Strength*, indica la resistencia de la roca a una compresión axial o simple. Este concepto será descrito en detalle más adelante.

- **Is:** Índice de resistencia, el cual se normaliza a un testigo de roca de 50 mm de diámetro para obtener Is_{50} .
- **GSI:** *Geological Strength Index*, corresponde a la estimación de la calidad del macizo rocoso. Este concepto será descrito en detalle más adelante.

3.2.1. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Fortuna (GDF)

La unidad Granodiorita Fortuna está compuesta exclusivamente por la Unidad Litológica del mismo nombre, y corresponde a una roca de textura equigranular de grano medio a grueso, con abundante hornblenda, cuyos cristales alcanzan tamaños entre 4 a 12 mm. Se reconoce una alteración constituida principalmente de clorita, además de sericita, feldespato potásico y minerales de arcilla.

Esta unidad es la de mayor expresión superficial de todas las unidades de la mina, distribuyéndose completamente hacia el Oeste de la Falla Oeste, en toda su extensión longitudinal, siendo el límite occidental del yacimiento (Figuras 3.1-1 y 3.2).

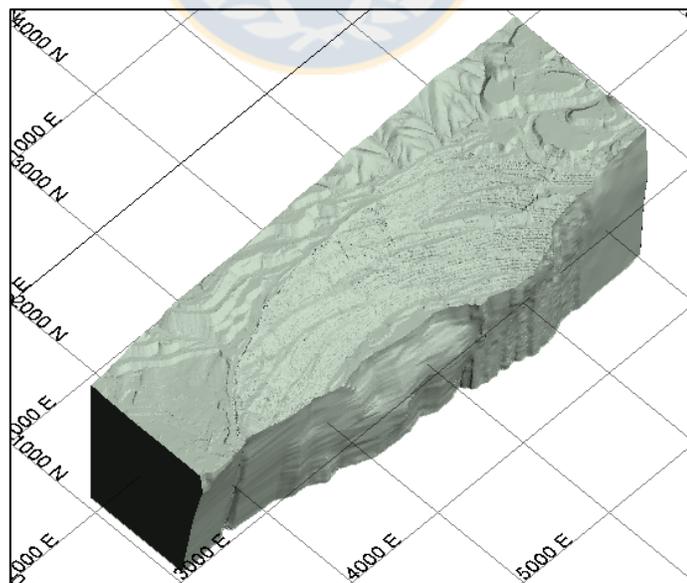


Figura 3.2. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Fortuna (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

El macizo rocoso se caracteriza por ser Muy Resistente a la compresión uniaxial, según estimación de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($I_{s50} = 3,08$ MPa con factor de conversión a UCS de 39) y de Buena a Regular Calidad Geotécnica de acuerdo al índice GSI, clasificado como un macizo Fracturado a Fuertemente Fracturado en Bloques con una Buena a Regular Condición de las Discontinuidades.

3.2.2. Unidad Geotécnica Básica Brecha Entre Falla (BEF)

La unidad Brecha Entre Falla corresponde a una franja elongada N-S, compuesta exclusivamente por mega brechas tectónicas producto de las reactivaciones de la mega estructura Falla Oeste (Figuras 3.1-2 y 3.3). Esta zona de brechización tectónica tiene un protolito de Granodiorita Fortuna y se caracteriza por tener fragmentos de roca en una matriz de roca molida y arcillas de apariencia compacta, aunque a veces disgregable a golpes de martillo. Es de color rojo, característica dada por la presencia de hematita y óxidos de hierro en general, que rellenan discontinuidades.

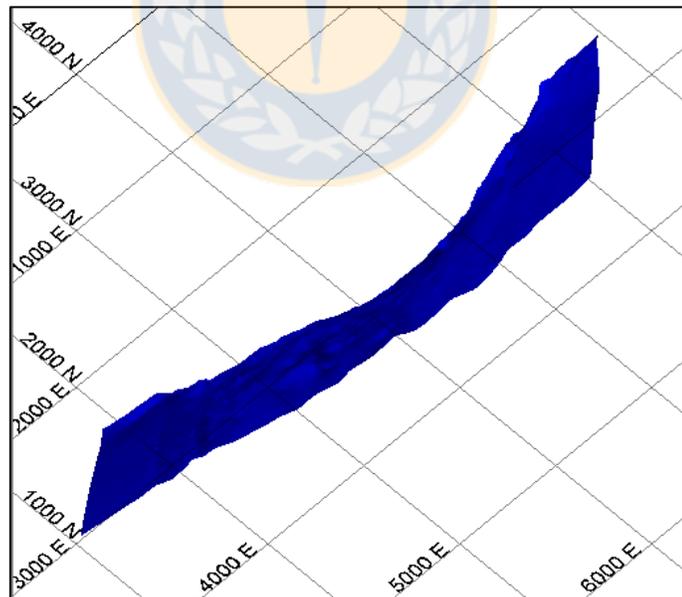


Figura 3.3. Unidad Geotécnica Básica Brecha Entre Falla (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

La unidad puede alcanzar espesores de hasta 60 m (medidos de Este a Oeste) y, en algunos casos, estar ausente. La brecha se ubica específicamente entre las trazas Este y Oeste, donde la primera marca el contacto del Pórfido Chuquicamata con la Granodiorita Fortuna y se compone de salbanda color negra, variando a verde en el sector Norte. Generalmente es fácil de reconocer, sin embargo, hay lugares en que la zona de daño es muy desarrollada hacia el Este, por lo cual tiende a confundirse el punto exacto por donde pasa esta traza. Por su parte, la traza Oeste marca el contacto entre la brecha y una zona de cizalle mayor adosada al costado occidental de la Zona de Falla Oeste, caracterizada por salbanda rojiza a negra con espesor centimétricos.

La zona brechizada tiene alteración principalmente de calcita, además de feldespatos potásico y minerales de arcilla. También se observa cuarzo secundario rellenando microfracturas y/o venillas y clorita reemplazando a cristales de biotita primaria.

El macizo rocoso se caracteriza por ser Débil a Moderadamente Resistente a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($Is_{50} = 1,71$ MPa con factor de conversión a UCS de 21). El fracturamiento es polidireccional, las superficies se encuentran selladas y rellenas, por lo general de hematita y salbanda arcillosa. El índice GSI indica que este macizo es de Mala Calidad Geotécnica y se clasifica como Fuertemente Fracturado en Bloques a Fracturado y Perturbado con una Pobre a Regular Condición de las Discontinuidades.

3.2.3. Unidad Geotécnica Básica Zona Cizalle Intenso (ZCI)

Es parte de la zona de cizalle adosado a la traza occidental de la Falla Oeste y corresponde al sector con mayor grado de deformación que experimentó la roca Granodiorita Fortuna con ocasión de este evento tectónico. La deformación que afecta a esta unidad es tal, que prácticamente se encuentra destruida su textura original, dejando un material con numerosos planos de cizalle (más de 4 en un bloque de 10 cm) en forma polidireccional que presentan biotitas reorientadas y se encuentran rellenos con abundante arcilla.

La alteración consiste principalmente de calcita, la cual ocurre como relleno de microfracturas y/u oquedades. Además, se reconocen minerales de arcilla alterando, junto a sericita, a fragmentos de cristales de plagioclasa y/o como constituyentes de la matriz.

En profundidad se interpreta, sobre la base de información de sondajes geotécnicos, como una franja paralela a la orientación de la Falla Oeste que va disminuyendo su potencia (Figuras 3.1-3 y 3.4).

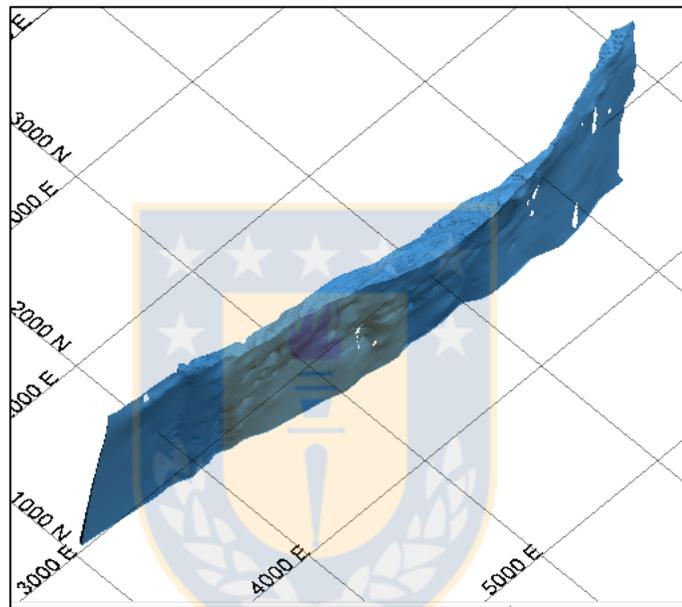


Figura 3.4. Unidad Geotécnica Básica Zona de Cizalle Intenso (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

Este material es similar a una brecha no cohesiva, con algunos bloques no mayores a 10 cm de lado, en una matriz arcillosa que alcanza aproximadamente el 15% del volumen total, esta condición hace que se comporte geomecánicamente como un material tipo suelo, prácticamente sin cohesión, lo que implica que está en constante desprendimiento.

Ensayos de terreno en testigos de sondaje (PLT), indican que es una unidad Débil a Moderadamente Resistente ($I_{s50} = 1,97$ MPa con factor de conversión a UCS de 11). Mientras que la resistencia a la compresión uniaxial medida en muestras de mano se estima de 15 a 50 MPa considerándose como Muy Mala a Mala. Por su parte, el índice GSI considera al macizo

como Fracturado y Perturbado a Desintegrado, con una Condición de las Discontinuidades Muy Pobre a Pobre, clasificándolo geotécnicamente de Mala Calidad.

Dentro de esta zona se incluye la unidad “Franja Milonítica”, la cual se encuentra en contacto directo con la traza occidental de la Falla Oeste y corresponde a una unidad producto del metamorfismo dinámico que afecta a la Granodiorita Fortuna por efecto del movimiento de la falla. Es de color gris claro, con texturas de flujo asociadas a cristales relictos de cuarzo y feldespato en una matriz mayoritariamente arcillosa, siendo el espesor máximo reconocido de 8 m.

3.2.4. Unidad Geotécnica Básica Zona de Cizalle Moderado (ZCM)

Corresponde a la Unidad Litológica Granodiorita Fortuna afectada por la deformación generada con el desplazamiento de la Falla Oeste. Es el sector con menos grado de deformación y consiste en fragmentos de granodiorita, fracturada en múltiples planos irregulares y polidireccionales de cizalle, con relleno de arcilla.

Esta zona se distribuye en superficie en una franja N-S como un halo externo a la Zona de Cizalle Intenso, mientras que en profundidad se interpreta como una franja externa paralela a la misma que se va angostando (Figuras 3.1-4 y 3.5).

La unidad tiene alteración de calcita, feldespato potásico, minerales de arcilla, cuarzo rellenando microfracturas y/o venillas y clorita alterando a cristales de biotita primaria. Ensayos de terreno en testigos de sondaje (PLT), indican que es una unidad Resistente ($I_{S50} = 2,76$ MPa con factor de conversión a UCS de 25).

El macizo rocoso se caracteriza por ser de Regular Calidad Geotécnica. De acuerdo al índice GSI, esta unidad se clasifica como un macizo Fracturado y Perturbado a Fuertemente Fracturado en Bloques con una Pobre a Regular Condición de las Discontinuidades.

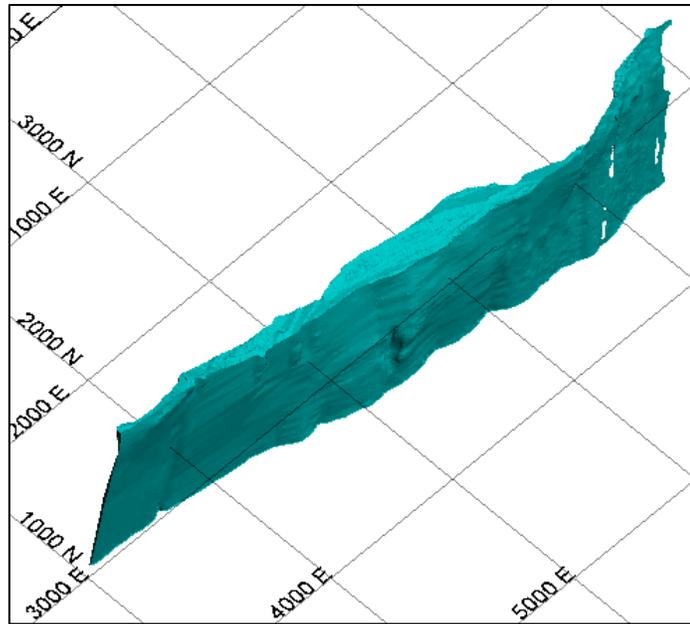


Figura 3.5. Unidad Geotécnica Básica Zona de Cizalle Moderado (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

3.2.5. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Elena Sur (GES)

La unidad Granodiorita Elena Sur está compuesta exclusivamente de la Unidad Litológica del mismo nombre. Se desarrolla en la parte Este del rajo, como una franja N-S, siendo el límite oriental del yacimiento (Figuras 3.1-5 y 3.6).

El macizo rocoso se caracteriza por ser Resistente a Muy Resistente a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($I_{s50} = 4,76$ MPa con factor de conversión a UCS de 30). Su fracturamiento se presenta en direcciones bien definidas pero no ortogonales entre sí, con buena correlación preferencial de los sistemas estructurales mayores. En general, los planos de las diaclasas son sellados a levemente abiertos, en este último caso se generan bloques de tamaño promedio de lado 25 cm.

Su clasificación, de acuerdo al índice GSI, va en un rango variable desde Fracturado a Fuertemente Fracturado en Bloques, con una Regular a Buena Condición de las Discontinuidades considerándose como un macizo de Regular Calidad Geotécnica.

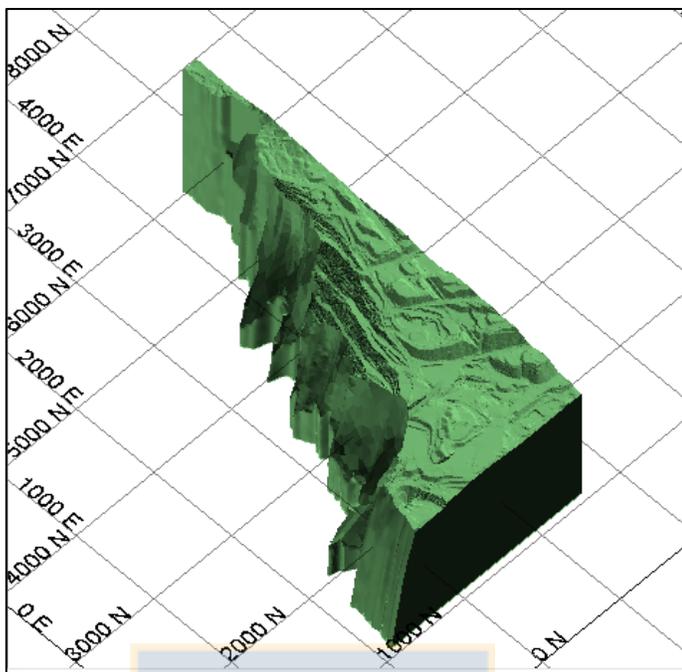


Figura 3.6. Unidad Geotécnica Básica Granodiorita Elena Sur (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

3.2.6. Unidad Geotécnica Básica Metasedimentos (MET)

La unidad Metasedimentos se compone de una asociación de rocas de origen sedimentario, volcánico e ígneo, que han sido afectadas por metamorfismo de contacto y dinámico, dando como resultado un conjunto de rocas parcialmente metamorfizadas, milonitizadas y completamente silicificadas. En este conjunto se distinguen metasedimentos clásticos, metasedimentos químicos, milonitas, cataclasitas, andesitas volcánicas, rocas córneas y rocas deformadas indiferenciadas.

Esta unidad se distribuye en el talud Este como una franja continua e irregular de orientación NNE–SSW. El cuerpo se encuentra “colgado” presentando contactos principalmente estructurales hacia el Oeste con la unidad Pórfido Este Clorítico, y hacia el Este, con la unidad Granodiorita Elena Sur (Figuras 3.1-6 y 3.7).

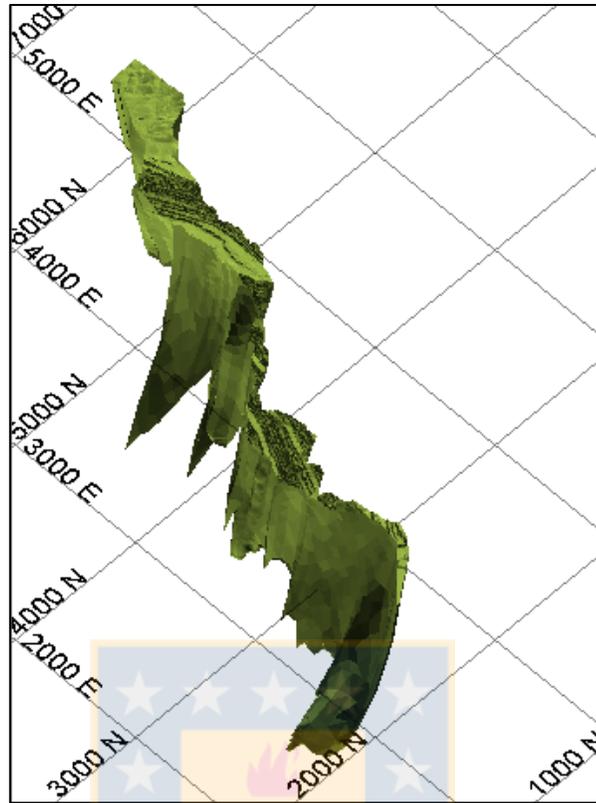


Figura 3.7. Unidad Geotécnica Básica Metasedimentos (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

En superficie el macizo rocoso se caracteriza por ser Resistente a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($Is_{50} = 4,53$ MPa con factor de conversión a UCS de 15). El fracturamiento es intenso y no presenta orientaciones preferenciales, generando una blocosidad irregular con bloque de tamaño promedio de 15 cm y 8 cm de lado respectivamente, los cuales se encuentran semi-trabados.

Esta unidad se clasifica, de acuerdo al índice GSI, como Fuertemente Fracturado en Bloques a Fracturado y Perturbado con una Regular a Pobre Condición de las Discontinuidades, esto responde al fracturamiento polidireccional que la afecta y, a que las discontinuidades poseen pátinas de calcita, arcilla y óxidos de hierro en zonas lixiviadas.

3.2.7. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Clorítico (PEC)

La unidad Pórfido Este Clorítico es el resultado de la superposición de la Unidad Geológica de Alteración Clorítica a la Unidad Litológica Pórfido Este. Posee orientación elongada en dirección N-S a NNE-SSW y se encuentra, en la parte central del rajo, en contacto gradacional con las unidades Pórfido Este Sericítico y Pórfido Este Potásico hacia el Oeste. Mientras que hacia el Este, se reconoce en disconformidad con las unidades Metasedimentos y/o Granodiorita Elena Sur (Figuras 3.1-7 y 3.8).

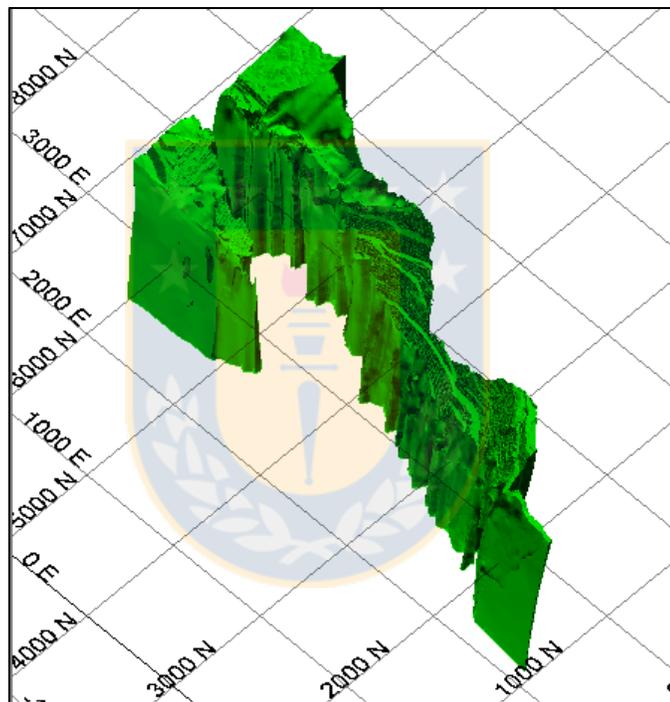


Figura 3.8. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Clorítico (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

En superficie el macizo rocoso se caracteriza por ser Resistente a Muy Resistente a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($Is_{50} = 4,39$ MPa con factor de conversión a UCS de 18). Mientras que el índice GSI lo clasifica como Fracturado en Bloques con una Buena a Regular Condición de las Discontinuidades, estimándose un macizo de Buena Calidad Geotécnica.

3.2.8. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Potásico (PEK)

La unidad Pórfido Este Potásico es el resultado de la superposición de la Unidad Geológica de Alteración Potásica a la Unidad Litológica Pórfido Este. Aparece como una franja alargada y discontinua con una disposición NE-SW, desde el centro hacia el Sur de la mina, en tanto que hacia el Norte se distribuye como porciones aisladas dentro de la unidad Pórfido Este Sericítico (Figuras 3.1-8 y 3.9).

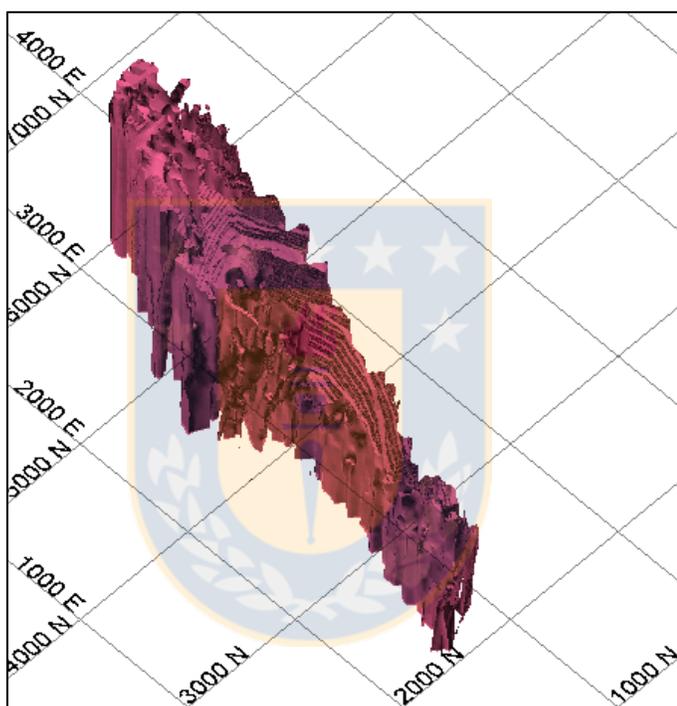


Figura 3.9. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Potásico (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

El macizo rocoso se caracteriza por ser Muy Resistente a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($I_{s50} = 4,59$ MPa con factor de conversión a UCS de 25), constituyéndose en una de las unidades más competentes de la Mina Chuquicamata. De acuerdo al índice GSI esta unidad se caracteriza por ser un macizo Fracturado en Bloques con una Buena Condición de las Discontinuidades siendo una roca de Buena Calidad Geotécnica.

3.2.9. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Sericítico (PES)

La unidad Pórfido Este Sericítico es el resultado de la superposición de la Unidad Geológica de Alteración Sericítica a la Unidad Litológica Pórfido Este. Se distribuye como una franja N-S en la parte centro y Sur de la mina, mientras que en el sector Norte aparece sin orientación preferencial y siendo la unidad predominante. Hacia el Oeste presenta contactos gradacionales con las unidades de Rocas Cuarzo Sericita y hacia el Este gradada a la unidad Pórfido Este Potásico, en el centro y Sur del yacimiento (Figuras 3.1-9 y 3.10).

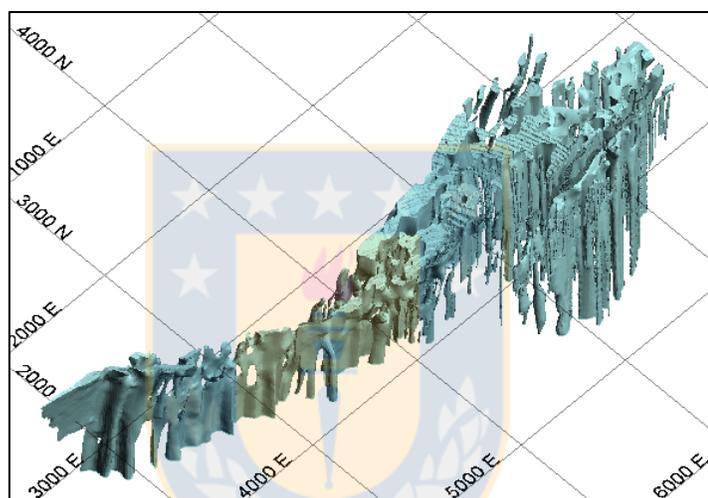


Figura 3.10. Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Sericítico (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

Ensayos de terreno (PLT) en sondajes, indican que es una unidad Resistente ($I_{s50} = 4,25$ MPa con factor de conversión a UCS de 23) El fracturamiento es intenso, en direcciones no ortogonales entre sí, con lo que genera un sistema de bloques irregular, de entre 15 a 35 cm de lado, los cuales se encuentran poco trabados. El macizo es Fuertemente Fracturado en Bloques con una Regular a Buena Condición de las Discontinuidades clasificándose, según el índice GSI, en un macizo de Regular a Buena Calidad Geotécnica.

3.2.10. Unidad Geotécnica Básica Roca Cuarzo Sericita (RQS)

La unidad Roca Cuarzo Sericita es el resultado de la sobreimposición de la alteración Cuarzo-Sericítica a la Unidad Litológica Pórfido Este y se define geológicamente como una roca fuertemente alterada, con cuarzo como mineral dominante el que se presenta en forma de ojos recristalizados y en vetilleos polidireccionales, esto en un agregado fino de sericita.

La unidad tiene una variabilidad importante en las calidades geotécnicas, asociadas al porcentaje de sericita y cuarzo, existiendo tres unidades distintivas: Cuarzo Igual Sericita ($Q = S$), Cuarzo Menor Sericita ($Q < S$) y Cuarzo Mayor Sericita ($Q > S$).

Estas unidades se distribuyen en una franja de orientación N-S adosada a la traza Este de la Falla Oeste (Figuras 3.1-10a, 10b y 10c) y 3.11)

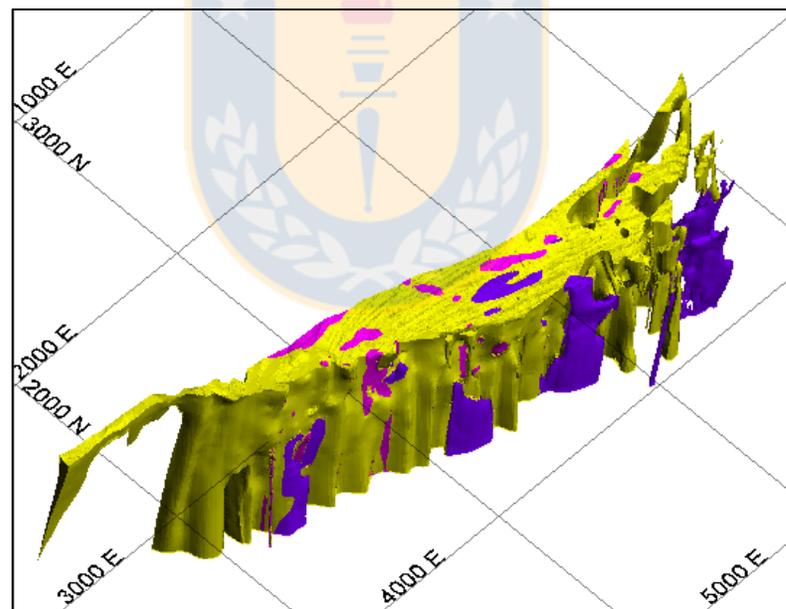


Figura 3.11. Unidad Geotécnica Básica Roca Cuarzo Sericita. En amarillo Cuarzo Igual Sericita, en magenta Cuarzo Menor Sericita y en violeta Cuarzo Mayor Sericita (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

3.2.11. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Igual Sericita (Q = S)

En términos generales esta unidad puede definirse como el *background* de las unidades Cuarzo Mayor Sericita y Cuarzo Menor Sericita. Corresponde a una roca alterada principalmente a cuarzo secundario y sericita, los cuales ocurren de forma penetrativa, obliterando la totalidad de la textura original. También se reconocen cristales de anhidrita y cantidades subordinadas de yeso. La característica principal es el contenido de cuarzo semejante a sericita, con un porcentaje de cuarzo entre 30% y 60% de la roca.

Está expuesta a lo largo de todo el cuerpo cuarzo sericítico, siendo la de mayor expresión areal de las tres unidades. Se reconoce como cuerpos elongados N-S y continuos hasta la coordenada 4500N, desde ese sector y hacia el Norte se presenta en forma de cuerpos aislados y colgados, desapareciendo en la coordenada 5000N. Esta unidad gradúa hacia el Este a la unidad Pórfido Este Sericítico (Figura 3.1-10a y 3.12).

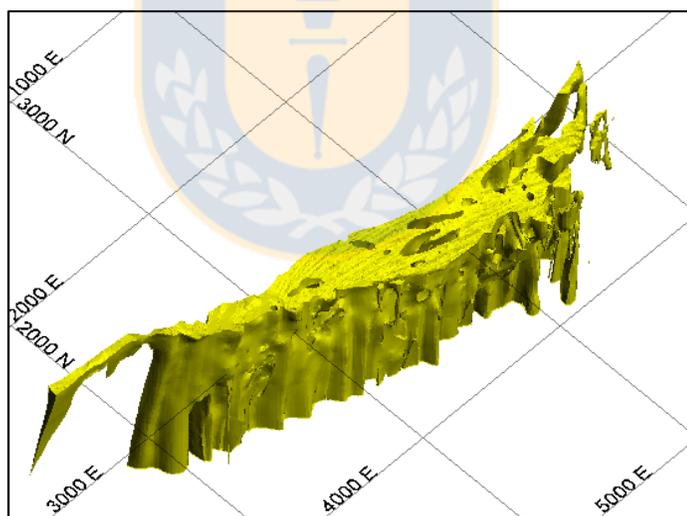


Figura 3.12. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Igual Sericita (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

El macizo rocoso se caracteriza por ser Moderadamente Resistente a Resistente a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($I_{s50} = 3,25$ con factor de conversión a UCS de 15).

3.2.12. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Menor Sericita (Q < S)

La unidad Cuarzo Menor Sericita corresponde a una roca de textura totalmente obliterada, producto de una intensa alteración cuarzo-sericítica, cuya característica mineralógica principal es el alto contenido de sericita y arcillas, con un porcentaje mayor al 70% de la roca. La alteración de esta unidad consiste principalmente en cuarzo secundario y sericita, los cuales ocurren de forma penetrativa, además de la existencia de anhidrita y trazas de cristales de yeso. Se encuentra asociada a la zona de daño Este de la Falla Oeste y a la zona de daño de Fallas VIF (*Very Important Fault*), con un eminente control estructural.

Esta unidad se expone como una franja discontinua N–S, principalmente en el flanco oriental de la Falla Oeste y como halo de estructuras mayores que cruzan la unidad Roca Cuarzo Sericita en general. En profundidad su forma es de un cuerpo elongado que tiende a desaparecer y presentarse en forma aislada y colgada hacia la coordenada 4500N (Figuras 3.1-10b y 3.13).

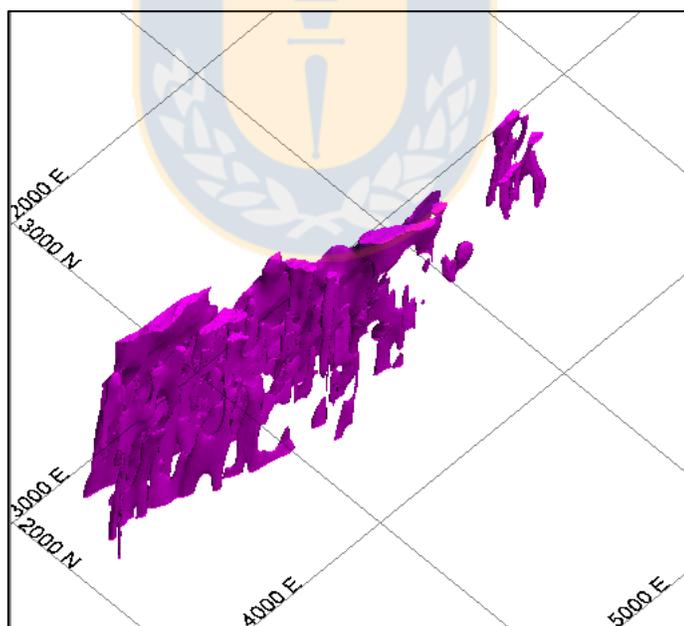


Figura 3.13. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Menor Sericita (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

El macizo rocoso se caracteriza por ser Débil a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($Is_{50} = 1,30$ MPa con factor de conversión de 13).

3.2.13. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Mayor Sericita (Q > S)

La unidad Cuarzo Mayor Sericita corresponde a una roca de textura totalmente obliterada, producto de una intensa alteración cuarzo-sericítica. Esta alteración está constituida principalmente de cuarzo secundario y sericita, el primero formando parte de vetas monominerales, con cantidades subordinadas de anhidrita y yeso, mientras que la sericita ocurre de forma penetrativa, con cuarzo secundario, además de alterar a cristales relictos de feldespato, asociado a calcita y minerales de arcilla. Cabe destacar la presencia de anhidrita, yeso, calcita, sericita, y minerales de arcilla, todos diseminados y/o como relleno de microfracturas. La característica principal de esta unidad es el contenido de cuarzo sobre sericita, con un porcentaje mayor al 70% de la roca.

Esta unidad se expone como una franja N-S principalmente en la parte central de la mina, ocupando la parte inferior del talud Oeste. Se reconoce continua en la porción centro-Sur del yacimiento y como cuerpos colgados y aislados que se extienden hacia el contacto de la Falla Oeste en el Norte (Figuras 3.1-10c y 3.14).

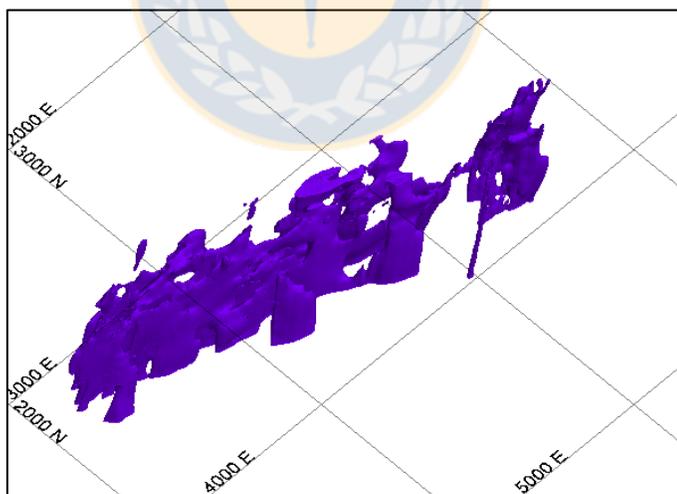


Figura 3.14. Unidad Geotécnica Básica Cuarzo Mayor Sericita (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

El macizo rocoso se caracteriza por ser Resistente a Muy Resistente a la compresión uniaxial, según mediciones de terreno en testigos de sondaje con equipo PLT ($I_{s50} = 3,59$ MPa con factor de conversión a UCS de 24).

3.2.14. Unidad Geotécnica Básica Lixiviado (LIX)

Se agrupan dentro de la unidad Lixiviado todas aquellas rocas afectadas por procesos de lixiviación parcial a perversiva, producto de sucesivos eventos de mineralización del yacimiento.

Debido al desarrollo de la Mina Chuquicamata, esta unidad posee solo afloramientos locales en áreas marginales del rajo, como los sectores Norte y Sur específicamente. En el Norte se ha reconocido su continuidad a través de sondajes, bajo la cobertura de gravas y botaderos, con un piso muy irregular, espesores máximos de hasta 200 m y un claro control estructural (Figuras 3.1-11 y 3.15).

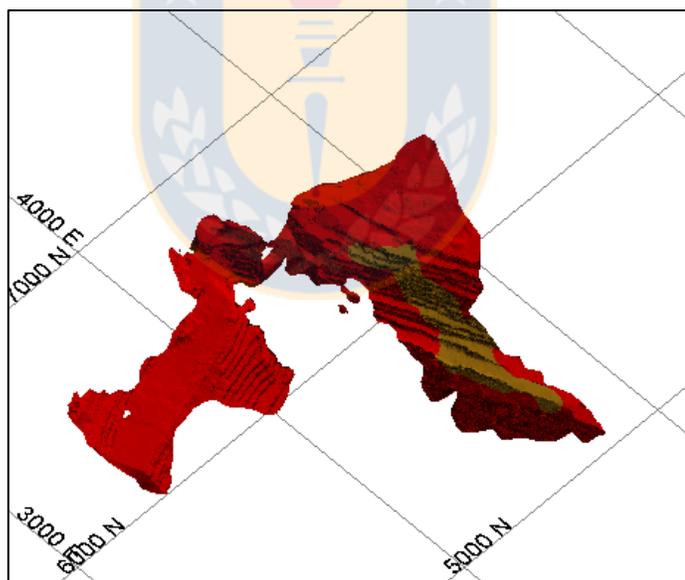


Figura 3.15. Unidad Geotécnica Básica Lixiviado. En rojo Lixiviado Homogéneo y en café Lixiviado Heterogéneo (sólido tomado de la actualización de las UGTB de 2014).

El macizo rocoso se caracteriza por ser Resistente a la compresión uniaxial estimada en terreno mediante el uso del martillo geológico (IRS), estando este concepto en la parte inferior de la tabla

de comparación. El fracturamiento es polidireccional, con superficies que se encuentran levemente abiertas, entre 1 a 2 mm y, por lo general, bastante alteradas.

Esta unidad se clasifica, de acuerdo al índice GSI, como Fuertemente Fracturado en Bloques con una Regular a Pobre Condición de las Discontinuidades, asignándosele una Regular Calidad Geotécnica.



4. CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

4.1. GENERALIDADES

El uso de sistemas de calificación y clasificación geotécnica de macizos rocosos permite evaluar el comportamiento geomecánico de estos y estimar parámetros geotécnicos de diseño y tipos de sostenimiento (Karzulovic, 2001).

Se entiende por Macizo Rocosos a un volumen importante de roca que se encuentra intersectada, total y/o parcialmente, por estructuras geológicas (discontinuidades); las cuales definen numerosos sub-volúmenes o bloques de roca que, en su conjunto, conforman el macizo rocoso. Así mismo, la geometría y distribución de tamaños de estos conjuntos de bloques (los más pequeños corresponden a la “roca intacta”), queda definida por las estructuras geológicas. (Figura 4.1).

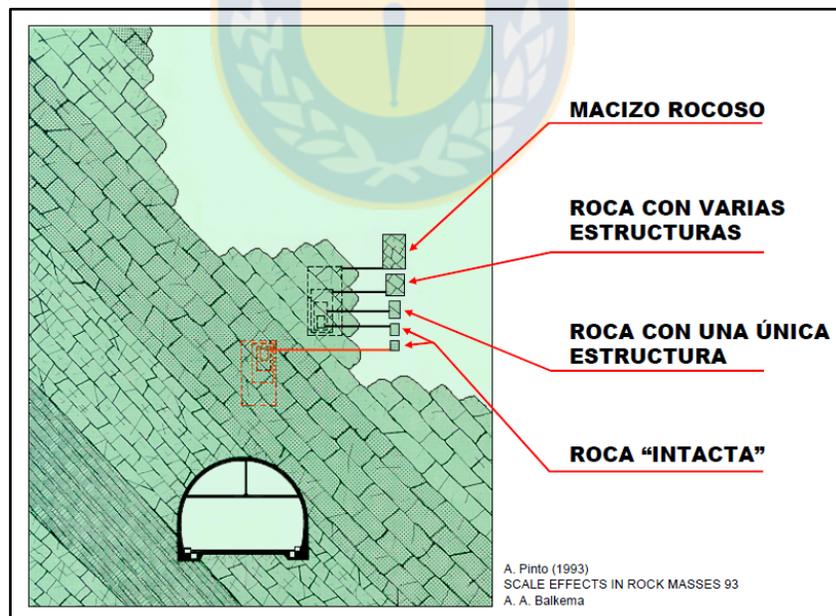


Figura 4.1. Esquema de definición de macizo rocoso y roca intacta. (Tomado de Karzulovic, 2001).

Los métodos han sido desarrollados suponiendo que el macizo rocoso se encuentra fracturado o intersectado por discontinuidades que definen bloques que, implícitamente, no conforman un conjunto masivo.

4.2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

4.2.1. Frecuencia de Fracturas (FF)

Para el mapeo de celdas en superficie, este concepto corresponde al parámetro que representa la frecuencia por metro de longitud, en una dirección dada, de todas aquellas discontinuidades abiertas y/o con rellenos débiles, que al unirse con otras discontinuidades definen, sobre la superficie de mapeo, polígonos cerrados. La magnitud de este parámetro depende de la dirección en que se mida.

Por otra parte, para el mapeo de sondajes, la frecuencia de fracturas corresponde a la cantidad de discontinuidades por unidad de largo que se mide en un testigo. Lo más común es representarla por soporte regularizado de 1,5 m o 3 m. En los testigos se pueden observar discontinuidades de diversos *sets* estructurales, cada uno de los cuales tienen una geometría, rumbo y manto diferente, por lo que la FF dependerá entonces de la dirección que tenga el sondaje.

De acuerdo al grado de fracturamiento que presente el macizo rocoso, este se puede calificar utilizando la siguiente tabla.

Tabla 4.1. Calificación del macizo rocoso según FF/m.

Calificación	FF (fracturas/m)
Muy Masivo	0 a 2
Masivo	3 a 7
Fracturado	8 a 14
Muy Fracturado	15 a 23
Extremadamente Fracturado	24 o más

4.2.2. Espaciamiento (S)

Corresponde a la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Este parámetro define el tamaño de bloques de macizo rocoso que forman los distintos *sets* o familias. Si los espaciamentos son pequeños, la resistencia del macizo rocoso disminuye. Es importante destacar que, a menos que la medición se haga en la dirección normal al *set* considerado se obtendrá un espaciamiento aparente, **d**, mayor que el espaciamiento real, **s** (Figura 4.2).

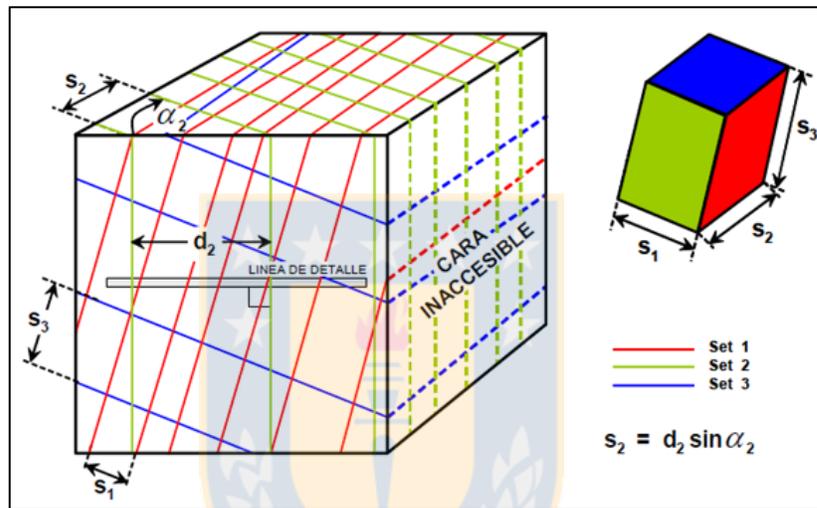


Figura 4.2. Esquema para la determinación del espaciamiento en base a observaciones en un afloramiento de roca que muestra 3 sets o familias de estructuras (Tomado de Karzulovic, 2001).

4.2.3. Condición de las Discontinuidades (JC: *Joint Condition*)

Corresponde a la condición de las estructuras, este parámetro considera la persistencia, abertura, rugosidad, relleno y alteración de las paredes de las discontinuidades:

- **Persistencia o Continuidad:** es el largo de la traza de las discontinuidades observadas en un afloramiento. Da cuenta del tamaño de la discontinuidad y puede medirse en la dirección del rumbo o en la dirección del mateo de ésta.

- **Abertura:** es la distancia perpendicular entre paredes de roca adyacentes de una discontinuidad cuando no existe relleno (el espacio intermedio está ocupado por aire o agua).
- **Rugosidad:** la rugosidad de una discontinuidad está caracterizada por su ondulación y aspereza. Las ondulaciones son rugosidades a gran escala (10 m), en tanto que la aspereza es una rugosidad a pequeña escala (10 cm). La ondulación afecta la dirección inicial de desplazamiento, mientras que la aspereza está relacionada con la resistencia al corte (cizalle) de la discontinuidad. Una mayor rugosidad aumenta la resistencia al cizalle de una discontinuidad.
- **Relleno:** se refiere al material que está entre las paredes de una discontinuidad, ya sea fragmentos de roca molida o minerales como arcilla, calcita, cuarzo, etc. La correcta identificación del relleno es fundamental para comprender la cohesión del macizo rocoso y la resistencia al cizalle. Las propiedades más importantes del relleno son su mineralización, granulometría, competencia (resistencia al corte y deformabilidad) y permeabilidad.
- **Alteración:** corresponde al grado de alteración o meteorización que presentan las paredes de las discontinuidades.

4.2.4. Condición de Agua (WC: *Water Condition*)

Corresponde al intento de medir la influencia del flujo de las aguas subterráneas sobre la estabilidad de excavaciones, en términos del caudal observado que penetra en la excavación y de la relación que existe entre la presión del agua en las fisuras y el esfuerzo general principal, o con alguna observación cualitativa general relacionada con el agua subterránea (Hoek y Brown, 1988).

Según Bieniawski (1989) para este parámetro se considera la condición de agua como: seco, húmedo, mojado, goteo o flujo.

4.2.5. Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS: *Uniaxial Compressive Strength*)

Es una propiedad de la roca intacta y corresponde a la resistencia a la compresión uniaxial de ésta. El UCS está fuertemente relacionado con la naturaleza y composición de la roca y debiera disminuir al aumentar la porosidad, la meteorización, la presencia de microfisuras y el contenido de agua. Es un parámetro que se incluye en la mayoría de los métodos de clasificación de macizo rocoso.

Se puede utilizar el martillo geológico para una estimación en terreno de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta según la Tabla 4.2. (Brown, 1981 en Karzulovic, 2001), lo que define el concepto de IRS (*Intact Rock Strength*).

Tabla 4.2. Estimación de Terreno para el UCS (Tomado de Karzulovic, 2001).

Clase	Descripción	Identificación de Terreno	UCS (MPa)
R0	Rocas extremadamente blandas	El material se puede marcar con la uña.	0.25 a 1.0
R1	Rocas muy blandas	El material se desmenuza al ser golpeado con la punta del martillo geológico. Con un cortaplumas es fácil tallar el material.	1.0 a 5.0
R2	Rocas Blandas	Al golpear con la punta del martillo geológico se producen pequeñas marcas en el material. Es difícil tallar el material con un cortaplumas.	5.0 a 25
R3	Rocas moderadamente duras	No se puede tallar el material con un cortaplumas. Se requiere un golpe fuerte de martillo geológico para fracturar el material.	25 a 50
R4	Rocas duras	Se requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturar el material.	50 a 100
R5	Rocas muy duras	Se requieren muchos golpes con el martillo geológico para fracturar el material.	100 a 250
R6	Rocas extremadamente duras	Al golpear el material con el martillo geológico este no se fractura y solo saltan esquirlas.	>250

4.2.6. RQD (Rock Quality Designation)

Herramienta para estimar cuantitativamente la calidad de la roca definida por Deere y otros en 1967. En sondajes, este parámetro se obtiene a partir del porcentaje de los trozos de testigos intactos mayores que 10 cm, recuperados del largo total perforado (Figura 4.3). No se consideran en este cálculo las fracturas que son paralelas al eje del testigo.

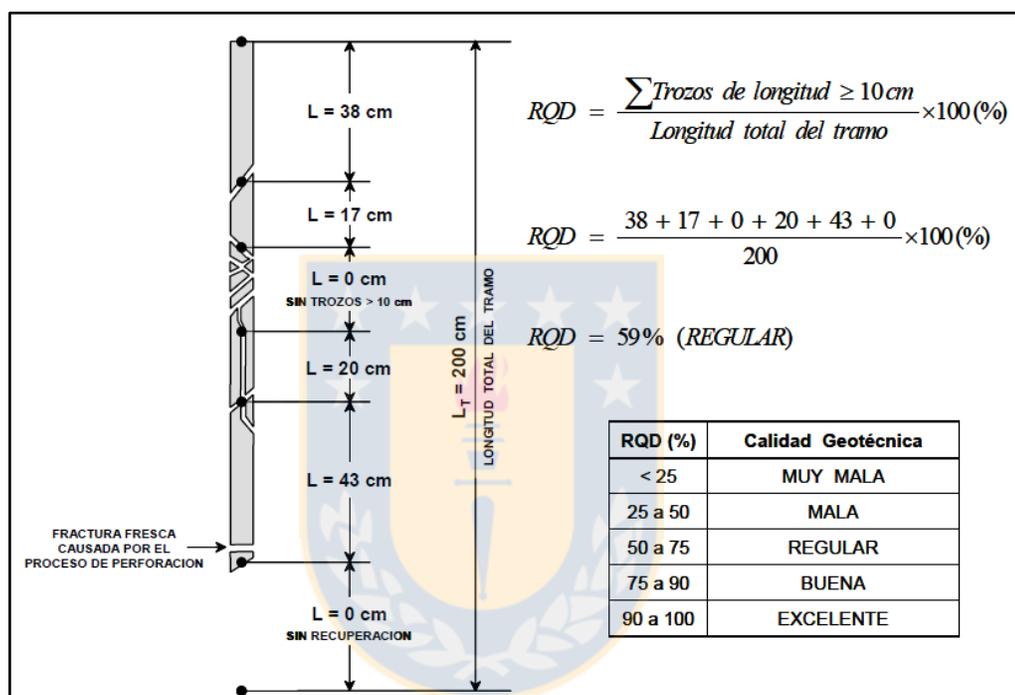


Figura 4.3. Esquema que ilustra la definición del índice RQD para designar la calidad del macizo rocoso en sondajes (Tomado de Karzulovic, 2001).

También es posible estimar el RQD a partir de la Frecuencia de Fracturas (FF), utilizando la siguiente relación (Priest y Hudson, 1976):

$$RQD = 100e^{-0.1FF} (0.1FF+1)$$

4.3. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA

De los sistemas de calificación y clasificación geotécnica de macizos rocosos usados en Mina Chuquicamata, solo el GSI será analizado en este trabajo.

4.3.1. Índice GSI (Geological Strength Index)

La resistencia de un macizo rocoso fracturado depende tanto de las propiedades de la roca intacta, como de los grados de libertad de deslizamiento y rotación entre las partes que la conforman. Estos grados de libertad están controlados por la forma geométrica de los trozos de roca intacta y de las condiciones en que se encuentran las superficies de las discontinuidades.

El índice GSI, desarrollado por Hoek desde 1994, es un sistema que permite estimar la reducción de la resistencia del macizo bajo distintas condiciones geológicas. Este índice de calidad geotécnica se determina, mediante observaciones en terreno, en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos:

- **RMS (*Rock Mass Strength*)** es la estructura del macizo rocoso, definida en términos de su blocosidad y grado de trabazón.
- **JC (*Joint Condition*)** es la condición de las estructuras (discontinuidades) presentes en el macizo rocoso.

La evaluación del GSI se hace por comparación de lo observado en terreno con una cartilla de condiciones típicas (Figura 4.4), lo usual es definir un rango y no un valor específico. Este índice varía de 0 a 100 y se reconocen 5 clases de macizos rocosos:

Macizos de calidad Muy Mala	Clase V	GSI de 0 a 20
Macizos de calidad Mala	Clase IV	GSI de 20 a 40
Macizos de calidad Regular	Clase III	GSI de 40 a 60
Macizos de calidad Buena	Clase II	GSI de 60 a 80
Macizos de calidad Muy Buena	Clase I	GSI de 80 a 100

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS (Marinos & Hoek (2000)) Estime el valor típico de <i>GSI</i> considerando el tipo de roca, la estructura del macizo rocoso, y la condición de las discontinuidades. NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar $33 \leq GSI \leq 37$ es más realista que considerar $GSI = 35$. Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural. Si hay estructuras desfavorablemente orientadas, ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso. En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse "desplazando hacia la derecha" el rango estimado para <i>GSI</i> . La presión del agua no se considera al evaluar el rango de <i>GSI</i> ; ya que la misma se incorpora posteriormente en los análisis geotécnicos, los que se desarrollan considerando esfuerzos efectivos.		CONDICION DE LAS ESTRUCTURAS				
ESTRUCTURA DEL MACIZO		MUY BUENA Muy rugosas, cajas frescas o no intemperizadas	BUENA Rugosas, cajas ligeramente intemperizadas y algo oxidadas.	REGULAR Lisas, cajas moderadamente intemperizadas y algo alteradas	MALA Pulidas, cajas meteorizadas, con pátinas o con rellenos y/o fragmentos angulosos	MUY MALA Pulidas, cajas muy meteorizadas, con pátinas o con rellenos de arcilla blanca
		DISMINUYE LA CALIDAD →				
INTACTA o MASIVA Probetas de roca intacta. Macizos masivos o con pocas y muy espaciadas estructuras.	90				N/A	N/A
BLOCOSA Macizos con 3 sets de estructuras, que definen bloques cúbicos, bien trabados entre sí.	80				50	40
MUY BLOCOSA Macizos con 4 sets de estructuras, o más, que definen bloques angulosos y trabados, pero que están parcialmente perturbados.	70					30
BLOCOSA VETEADA Macizos plegados y con bloques angulosos formados por la intersección de muchas estructuras. Los planos de estratificación y/o esquistosidad son persistentes.	60					20
DESINTEGRADA Macizo fuertemente fracturado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados, pobremente trabados.						10
LAMINADA / CIZALLADA Macizo con planos débiles (cizalle y/o esquistosidad), muy poco espaciados entre sí y que no definen bloques.		N/A	N/A			

Figura 4.4. Cartilla para evaluar el Índice de Resistencia Geológica (GSI) en macizos rocosos fracturados (Tomada de Karzulovic, 2001).

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

5.1. GENERALIDADES

Como se mencionó anteriormente, se trabaja con dos bases de datos, una de mapeo geotécnico de celdas, que consta de mapeo de superficie (talud) en el rajo de la Mina Chuquicamata, y otra de mapeo geotécnico de sondajes, llevados a cabo dentro de los límites del rajo de la Mina Chuquicamata. No se considera ninguna información que este fuera de estos límites para no generar interferencia en los gráficos de variabilidad espacial.

También es importante recordar que ningún sondaje fue descartado de la base de datos por no tener asignada una Unidad Geotécnica Básica (UGTB), y que la información faltante fue completada con la herramienta *flag* en *software* Vulcan. No estaba dentro del alcance de esa primera etapa de trabajo cuestionar la ubicación de los sondajes, salvo que estos se encontraran fuera de los límites del rajo; y, como se verá más adelante, es mediante el análisis estadístico que se manifiestan importantes anomalías (valores altos o bajos erráticos) que generan algunos de estos sondajes en las gráficas. Por este motivo, se debe tener precaución con esta información y, de ser posible, corroborar su veracidad.

Los parámetros estudiados son el IRS y el GSI, el primero determina la resistencia de un bloque de roca intacta y cómo esta característica gobierna parcialmente la resistencia del macizo rocoso. Su definición es estimativa y se efectúa proporcionando golpes a la roca con un martillo geológico, y, según la respuesta de la roca, se le asigna una resistencia en MegaPascales (MPa); mientras que el GSI, corresponde a la estimación de la calidad del macizo rocoso y se determina, mediante observaciones en terreno, en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos como son la blocosidad y la condición de las discontinuidades. Es importante mencionar que por definición la estimación del GSI es siempre un rango de valores.

La importancia de la Falla Oeste como el rasgo estructural de mayor relevancia en la Mina Chuquicamata, presente a lo largo de todo el rajo y responsable de que se encuentren en contacto rocas estériles (Bloque Oeste) y rocas mineralizadas (Bloque Este), permite realizar el estudio enfocándose en cada bloque por separado, puesto que su comportamiento siempre será diferente.

Previo al análisis, se definen algunos conceptos básicos de estadística que llevan a comprender mejor el trabajo realizado.

5.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA

Se comienza con un análisis de la distribución estadística de los valores:

- **Histogramas:** representan gráficamente las frecuencias de ocurrencia en función del valor. La visualización del histograma de los datos también es un primer medio de verificar su homogeneidad y corresponde a una herramienta útil para detectar valores atípicos.
- **Estadísticas elementales:** son complementarias al histograma y corresponden a:
 - **Medidas de posición:**
 - Media: promedio aritmético de los valores
 - Mínimo y máximo: establecen el rango en el cual se distribuyen los valores.
 - **Medias de dispersión:**
 - Varianza: promedio aritmético de la desviación cuadrática entre cada valor de la media. Esta medida cuantifica la dispersión del histograma y se expresa en el cuadrado de la unidad de la variable en estudio.
 - Desviación estándar: raíz cuadrada de la varianza; se expresa en la misma unidad que la variable en estudio.
 - Rango intercuartil. Ancho del intervalo entre el primer y el tercer cuartil, que contiene la mitad de los datos.
- **Diagrama de caja:** también se puede acompañar el histograma con un diagrama de caja (*box plot*) que presenta un solo eje en el cual se representan cinco cuantiles: los cuantiles a 2,5% y

97,5%, el primer y el tercer cuartil y la mediana. El diagrama de caja permite resumir algunas características de la distribución, tal como su simetría y su dispersión.

Luego se realiza el análisis multivariable mediante:

- **Gráfico de deriva espacial:** gráfico en función de las coordenadas, permite identificar tendencias (*trends*) del parámetro en estudio considerando la ubicación espacial de los datos, los cuales se agrupan en bandas, ya sea en direcciones Este-Oeste, Norte-Sur o en profundidad (Cota), en donde cada banda corresponde a un rango de coordenadas, siendo el punto medio la coordenada que identifica a la banda, la cual además, no se traslapa con las bandas adyacentes.

5.3. BLOQUE OESTE

5.3.1. UGTB Granodiorita Fortuna

En la Granodiorita Fortuna el parámetro geotécnico IRS presenta medias de 95 MPa en celdas y 98 MPa en sondajes (Anexo A), ambos valores son más bajos que la media definida para esta unidad ($IRS_x = 120$ MPa, Anexo E). Por su parte, el parámetro geotécnico GSI tiene medias de 43 en celdas y 45 en sondajes (Anexo B), estos valores también son más bajos que la media definida para la unidad ($GSI_x = 57$, Anexo E), e incluso están casi 10 puntos por debajo de la mínima establecida ($GSI_{mín} = 53$, Anexo E).

Al analizar la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en la Granodiorita Fortuna mediante gráficos de deriva se obtiene lo siguiente:

En dirección Oeste-Este, la gráfica del IRS en sondajes muestra una leve disminución de la resistencia de la roca en las coordenadas más orientales (Figura 5.1). Esto tiene relación con la zona de deformación que generó el desplazamiento de la Falla Oeste, la cual disminuye en intensidad de Este a Oeste, definiendo las unidades Zona de Cizalle Intenso y Zona de Cizalle Moderado según el grado de intensidad de deformación que afectó a la roca.

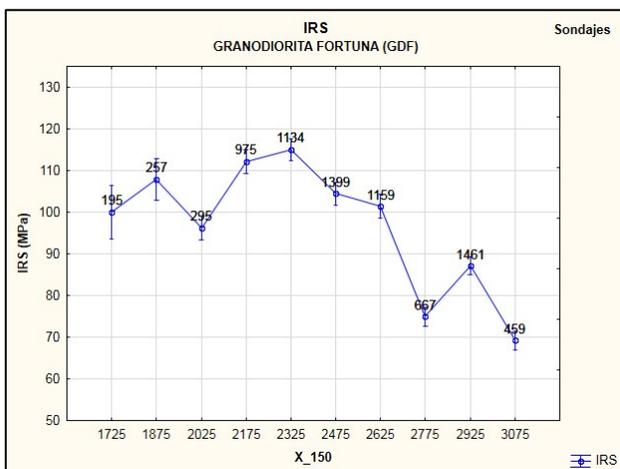


Figura 5.1. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (X), y el ancho de la banda en metros (150 m).

Si bien la Granodiorita Fortuna corresponde, por definición, a la unidad que no muestra signos de esta deformación, los límites entre estas unidades geotécnicas no son netos, sino más bien graduales, y por lo tanto, hacia los límites entre la Granodiorita Fortuna y las Zonas de Cizalle Moderado e Intenso se podría registrar una disminución gradual de la resistencia.

Sin embargo, esta situación no se ve reflejada en las gráficas del GSI, con ninguna de las bases de datos analizadas (Anexo D), indicando que esta deformación no afectó la calidad de geotécnica del macizo en términos de su blocosidad.

En cuanto a la variabilidad en dirección Norte-Sur, en la gráfica del IRS en sondajes se observa una leve disminución de la resistencia hacia el Norte (Figura 5.2), esto se debe a la cercanía de esos registros a la Zona de Falla Oeste y a la posibilidad de que la Granodiorita Fortuna se encuentre levemente afectada por la deformación, debido a la actividad de esta mega falla en ese sector. Esto basado en que las Zonas de Cizalle Moderado e Intenso no tienen extensión más allá de la coordenada 5700N, lo que significa que es posible encontrar en contacto a la Granodiorita Fortuna con la Brecha Entre Falla en el sector Norte del rajo. Al igual que en caso anterior, esta afirmación no se ve reflejada en las gráficas del GSI, puesto que ninguna de las bases de datos analizadas muestran la misma tendencia (Anexo D).

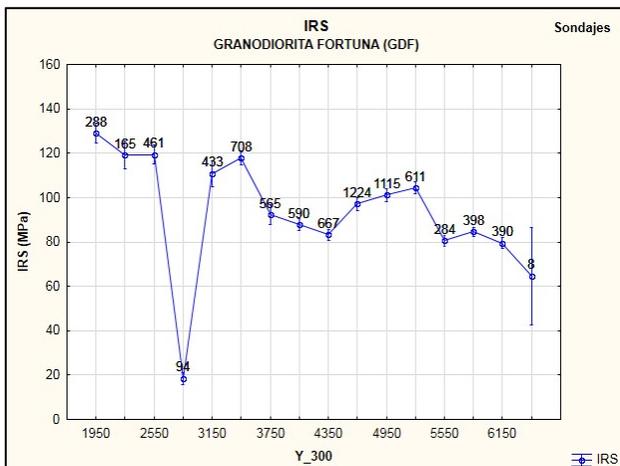


Figura 5.2. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).

A pesar de esto último, la anomalía observada en la coordenada 2850N de la gráfica de sondajes para el IRS, donde la resistencia no supera los 20 MPa, es visible también en la gráfica de sondajes para el GSI (Figura 5.3). Esta situación se debe a numerosos registros en el sondaje DD6806 que, como litología pertenecen a la Unidad Litológica Granodiorita Fortuna, pero por su ubicación espacial y características geotécnicas, corresponden a la Unidad Geotécnica Básica Zona de Cizalle Intenso, lo que explicaría la baja resistencia y calidad geotécnica asignada a estos soportes (Anexo F). La Fotografía 5.1 muestra algunos tramos donde es posible observar una roca de mala calidad y baja resistencia.

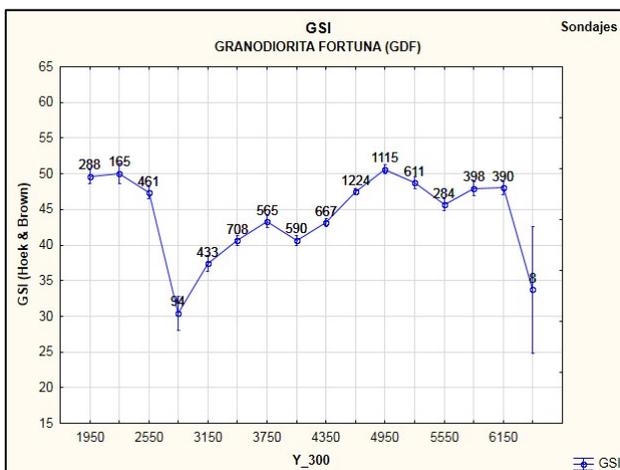
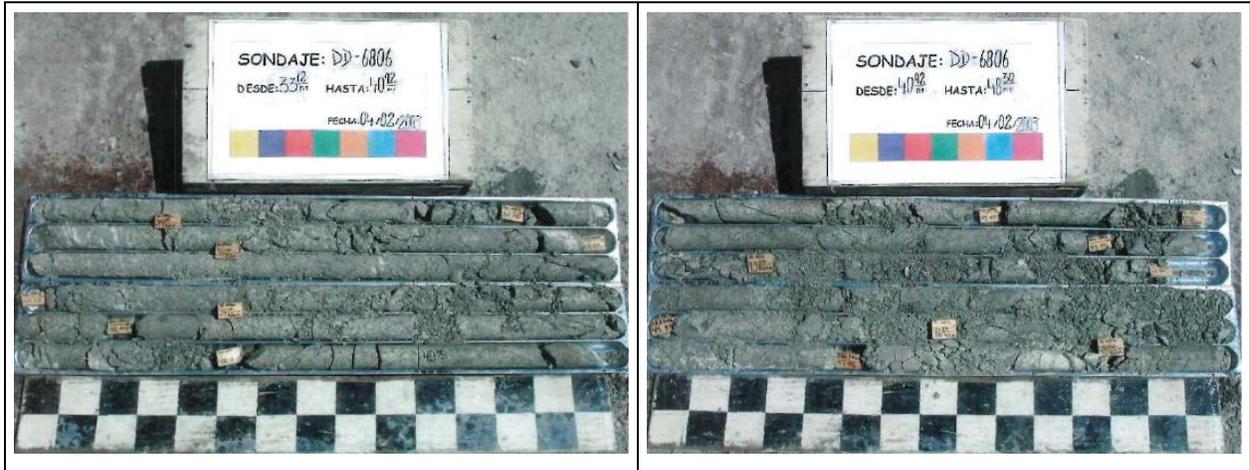


Figura 5.3. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico GSI en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).



Fotografía 5.1. Tramo del sondaje DD6806, desde los 33,12 m a los 42,30 m, caracterizado como una roca de muy mala calidad geotécnica y baja resistencia, la cual pertenece a la UGTB Zona de Cizalle Intenso.

La Figura 5.4 muestra la variabilidad del parámetro IRS en profundidad con ambas bases de datos, es posible observar una disminución de la resistencia desde la cota 2600Z aproximadamente. Así mismo, de las gráficas para el parámetro GSI también puede interpretarse una disminución de la calidad en profundidad, aunque muy leve.

Una menor resistencia y calidad geotécnica de la Granodiorita Fortuna en zonas más profundas del rajo, conforme se acerca a las zonas con mayor grado de deformación, puede deberse a que estas zonas en específico corresponden a franjas paralelas a la Falla Oeste, con manteos hacia el Oeste y que disminuyen su potencia en profundidad.

La anomalía registrada en la coordenada 1575Z de las gráficas de sondajes, corresponde a datos obtenidos del sondaje CHDD7233 (Anexo F), aunque estos valores de IRS se muestran como atípicos dentro del análisis de variabilidad, la definición de la Granodiorita Fortuna reconoce valores máximos de IRS de 199 MPa (Anexo E), por lo que estaría dentro del rango establecido. Por su parte, el valor del GSI está por encima del valor máximo determinado para la unidad ($GSI_{\text{máx}} = 62$, Anexo E), pero se encuentra dentro del rango que determina una buena calidad geotécnica (ver capítulo 4) y por lo tanto no constituye mayor cuestionamiento. Ambos parámetros coinciden en su caracterización de este tramo de sondaje, el cual no supera los 30 m y

puede corresponder a un núcleo intacto. La Fotografía 5.2 muestra el tramo del sondaje CHDD7233 caracterizado como un macizo de buena calidad geotécnica y una alta resistencia.

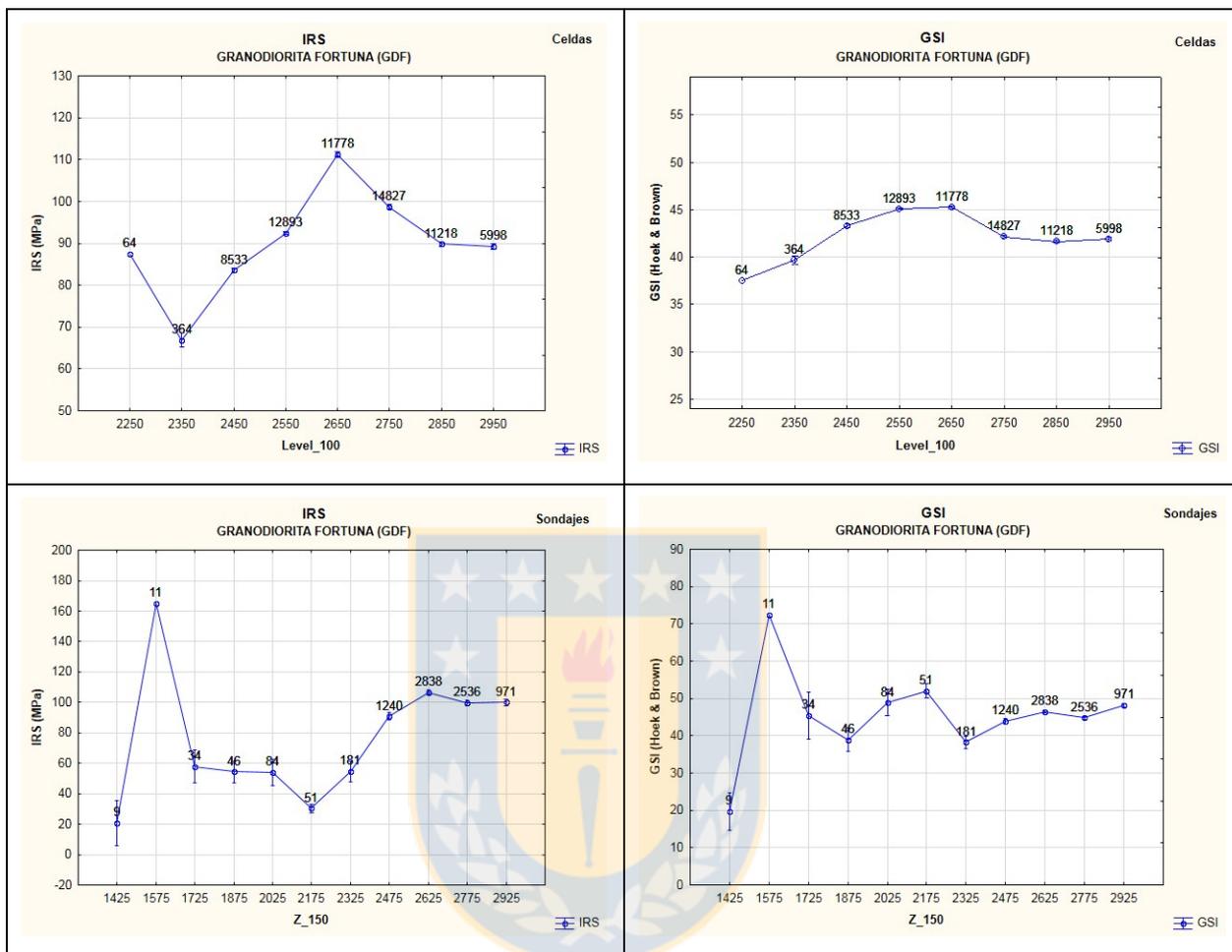
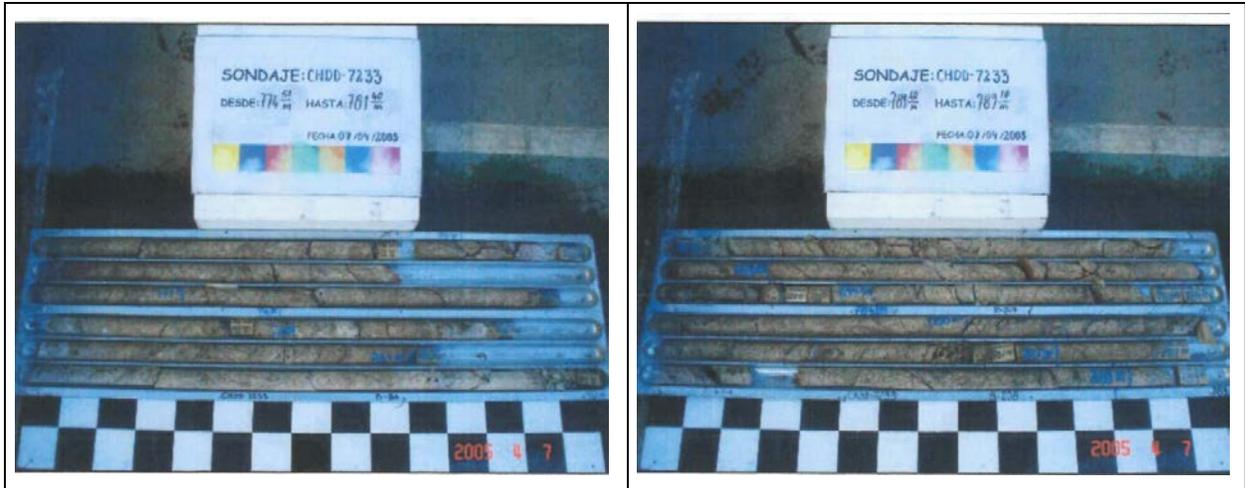


Figura 5.4. Gáficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Granodiorita Fortuna con datos de celdas (arriba) y sondajes (abajo). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Level, Z) y el ancho de la banda en metros (100 m y 150 m respectivamente).



Fotografía 5.2. Tramo del sondaje CHDD7233, desde los 774,81 m hasta los 789,10 m, caracterizado con una alta resistencia y una buena calidad geotécnica en la UGTB Granodiorita Fortuna.

5.3.2. UGTB Brecha Entre Falla

En la Brecha Entre Falla el parámetro geotécnico IRS tiene medias de 49 MPa en celdas y 50 MPa en sondajes (Anexo A), los valores son un poco más altos que la media definida para esta unidad ($IRS_x = 36$ MPa, Anexo E). A su vez, en el parámetro geotécnico GSI se observan medias de 30 en celdas y 36 en sondajes (Anexo B) estos valores se encuentran cercanos a la media definida para la unidad ($GSI_x = 35$, Anexo E).

Se analiza la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en la Brecha Entre Falla mediante los gráficos de deriva constatando que:

Las dos graficas del parámetro IRS arrojan que existe una disminución leve de la resistencia hacia el Oeste (Figura 5.5), si bien es a lo largo de la traza Este de la Falla Oeste donde se produce el movimiento principal, poniendo en contacto dos ambientes litológicos diferentes, como son la Granodiorita Fortuna y el Pórfido Chuquicamata, es hacia el Oeste donde se genera la Zona de Cizalle asociada a este desplazamiento y por lo tanto, la mayor deformación que afectó a la roca se observa adosada a lo largo de la traza Oeste, esta afirmación se ve corroborada por las gráficas del parámetro GSI, que muestran disminución de la calidad del macizo en ese sector (Figura 5.5).

Existe un valor muy alto de IRS en la coordenada 3075E de la gráfica de celdas, el cual también puede observarse en la gráfica de GSI como un valor anómalo a la tendencia, este dato está representado por una sola celda de mapeo (Anexo F), y a pesar de que existen sectores donde la Brecha Entre Falla tiene Resistencia Moderada, dada principalmente por el contenido de feldespato potásico, calcita y cuarzo secundario, los datos de IRS y GSI registrados son muy altos y podrían corresponder a una sobreestimación de la resistencia y la calidad geotécnica en esa celda de mapeo, más que a una anomalía dada por una condición geológica. Diferente es la situación de los datos registrados en la banda más occidental de las gráficas de sondajes (2725E), la cual se encuentra fuera de los límites de la unidad.

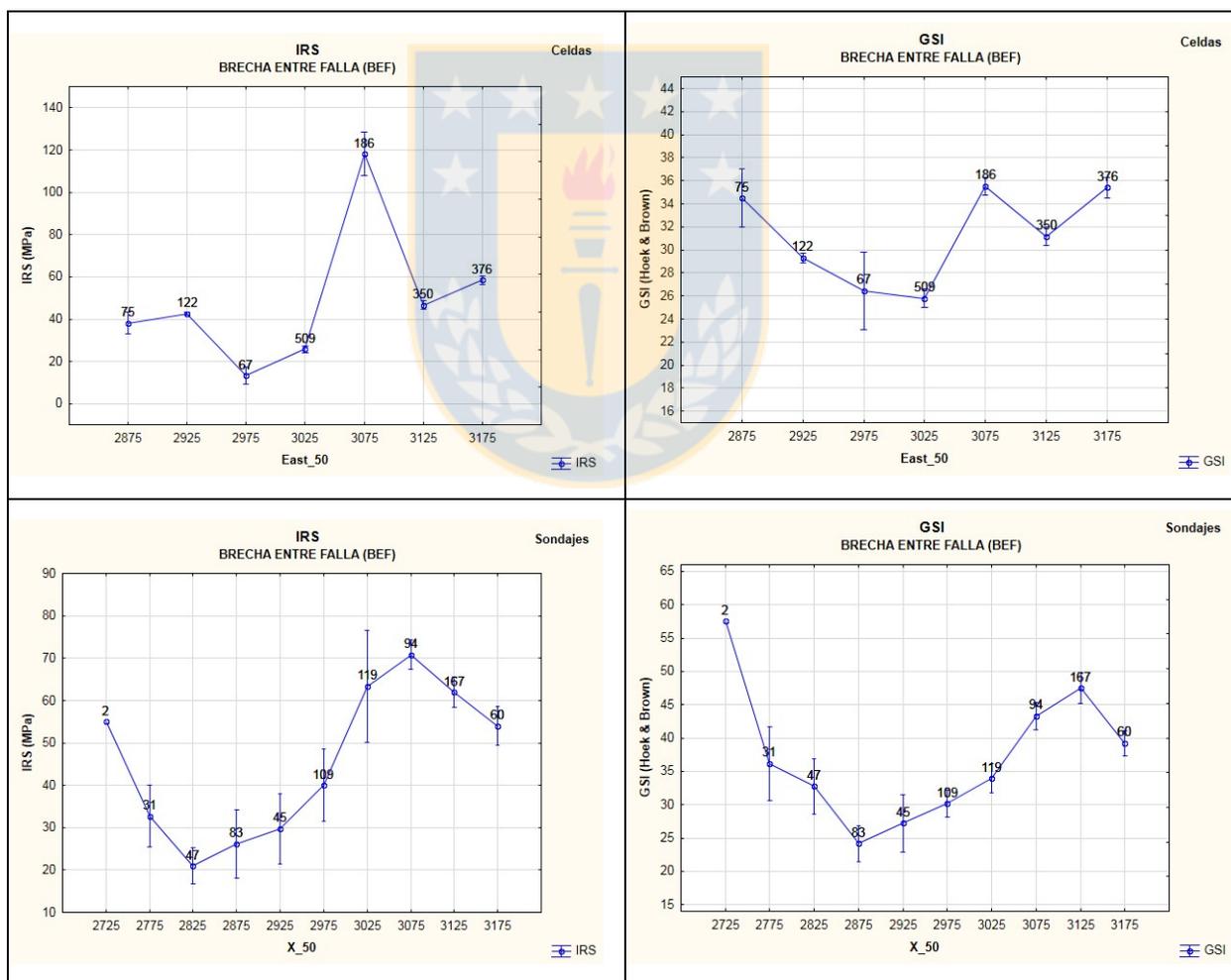


Figura 5.5. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de celdas (arriba) y sondajes (abajo). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos : Este (East, X) y el ancho de la banda en metros (50 m).

En dirección Norte-Sur, la gráfica del IRS en sondajes muestra una leve disminución de la resistencia hacia el Sur (Figura 5.6), sector donde la Brecha Entre Falla desaparece y las dos trazas de la Falla Oeste se unen para formar una sola falla con relleno de salbanda color negro de muy baja resistencia. En esta misma dirección, el parámetro GSI posee mayor oscilación entre sus datos, esto se observa principalmente en la gráfica de sondajes, aunque de igual manera es posible interpretar una leve disminución del GSI hacia el Sur, siendo coherente con la disminución de la resistencia (Figura 5.6).

La anomalía en la coordenada más septentrional (6450N), en donde se observa una disminución abrupta de la resistencia y la calidad del macizo, es reflejo del mapeo de una de las trazas de la Falla Oeste en el sondaje CH6735, considerándola como un macizo rocoso Perturbado, con una Condición de las Discontinuidades Completa y una Resistencia Muy Débil (Fotografía 5.3; Anexo F).

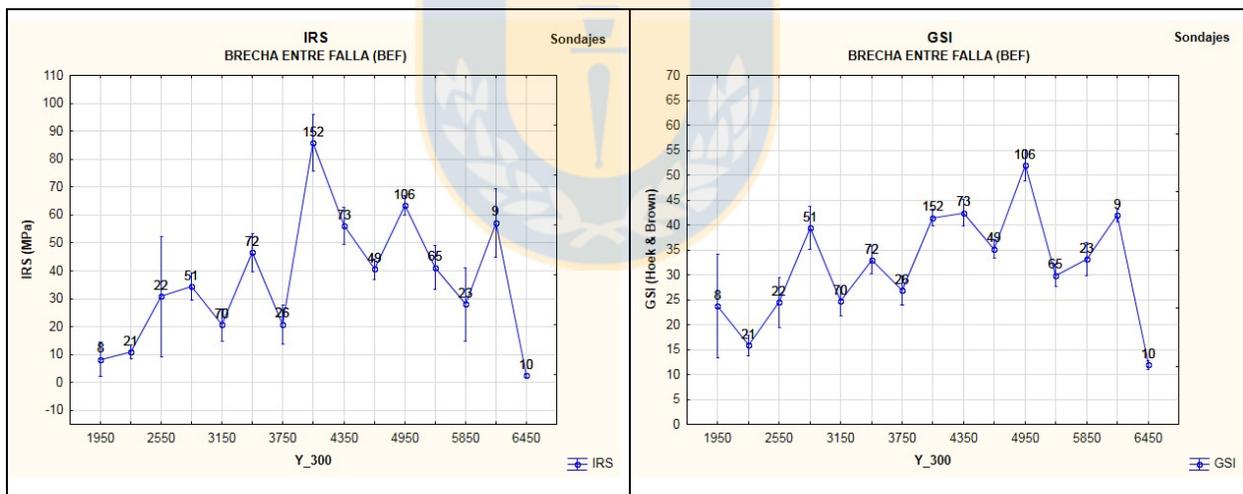
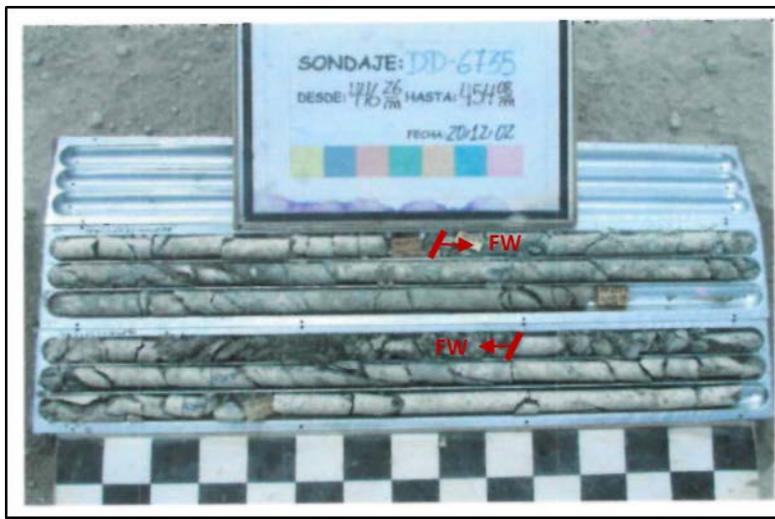


Figura 5.6. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).



Fotografía 5.3. Identificación de una de las trazas de la Falla Oeste en el sondaje CHDD6735.

En relación a la variabilidad en profundidad, en el gráfico de celdas del IRS la resistencia de esta unidad tiende a aumentar desde la superficie y hasta los 2250Z aproximadamente, algo similar puede interpretarse de la gráfica de sondajes del IRS, aunque esta tiene registros a mayor profundidad que evidencian que, luego de ese leve aumento, la resistencia comienza a disminuir conforme se desciende en cota (Figura 5.7), con excepción del registro en la banda 1725Z, donde el sondaje DD6605 genera la anomalía interpretada como una sobreestimación del parámetro (Fotografía 5.4; Anexo F).

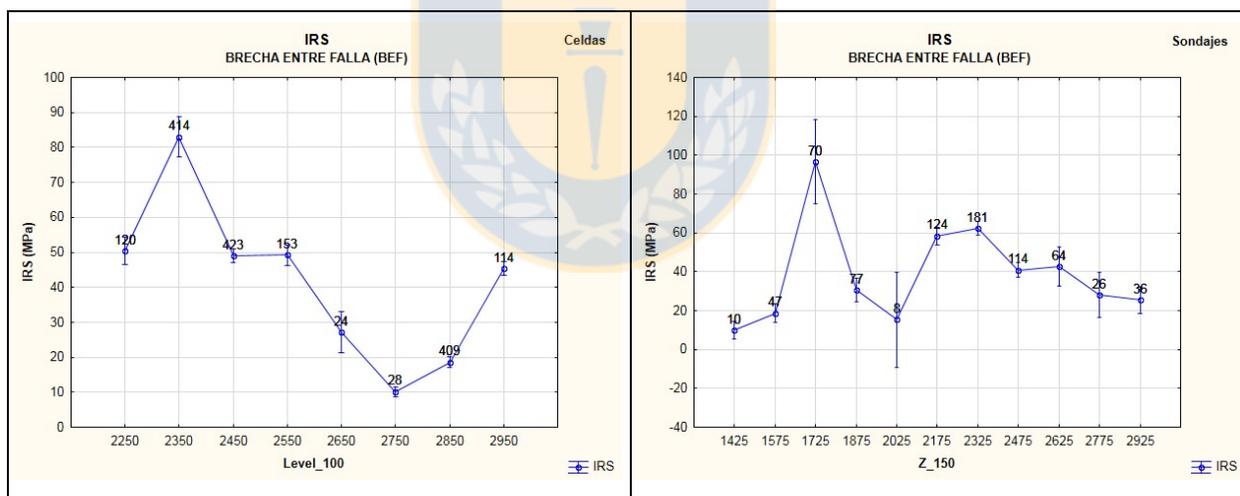


Figura 5.7. Gráficos de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de celdas (izquierda) y sondajes (derecha). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Level, Z) y el ancho de la banda en metros (100 m y 150 m respectivamente).



Fotografía 5.4. Tramos del sondeaje DD6605, desde los 611,65 m hasta los 619,80 m y desde los 623,90 m hasta los 632,16 m, caracterizado con una muy alta resistencia en la UGTB Brecha Enre Falla. Esta variabilidad tiene relación con el hecho de que a esas profundidades (2200Z – 2400Z) es donde se ha reconocido el máximo desarrollo de la Brecha Entre Falla, que, como macizo rocoso, corresponde al resultado del primer evento de deformación de la Falla Oeste, el cual sufrió varios episodios de fracturamiento y sellado durante el proceso de fallamiento, y que se evidencian en la intersección de la gran cantidad de microfracturas rellenas de cuarzo presentes en esta brecha tectónica, lo que puede inducir mayor resistencia y mayor calidad geotécnica, esto último se observa en las gráficas del GSI, con un leve aumento de esta variable entre las coordenadas 2350Z – 2550Z (Figura 5.8).

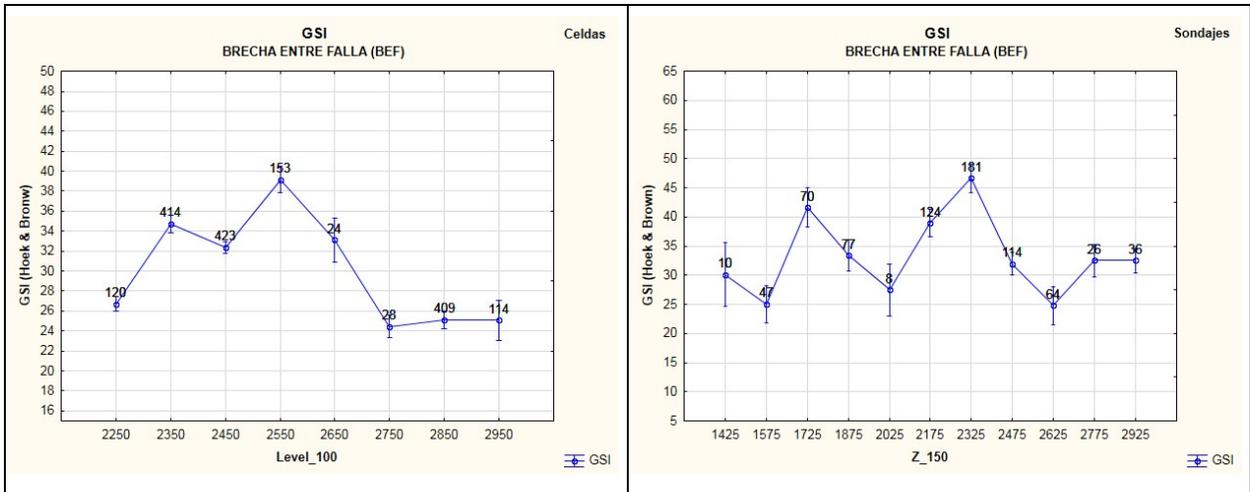


Figura 5.8. Gráficos de deriva espacial para el parámetro geotécnico GSI en la UGTB Brecha Entre Falla con datos de celdas (izquierda) y sondajes (derecha). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Level, Z) y el ancho de la banda en metros (100 m y 150 m respectivamente).

5.3.3. UGTB Zona de Cizalle Intenso

En la Zona de Cizalle Intenso el parámetro geotécnico IRS tiene medias de 44 MPa en celdas y 49 MPa en sondajes (Anexo A), valores mucho más altos que la media definida para esta unidad ($IRS_x = 22$ MPa, Anexo E), las gráficas muestran además, gran cantidad de valores anómalos. A diferencia de lo anterior, el parámetro geotécnico GSI presenta medias de 30 en celdas y 33 en sondajes (Anexo B), valores que corresponden a la media establecida para la unidad ($GSI_x = 32$, Anexo E).

Al analizar la variabilidad del parámetro IRS en la Zona de Cizalle Intenso mediante los gráficos de deriva se observa que las gráficas no reflejan *trends* característicos en ninguna orientación dentro de la unidad (Anexo C) y que la mayoría de los datos son más altos que el límite máximo definido en estudios anteriores ($IRS_{máx} = 40$ MPa, Anexo E). Sin embargo, en algunas de las gráficas es posible observar valores de IRS extremadamente altos, los cuales se manifiestan de forma aleatoria. En la Figura 5.9 destacan registros identificados en las bandas 3025E, 3450N y 5250N de las gráficas de celdas, los cuales corresponden a 6 celdas de mapeo, ubicadas en el centro y Norte del rajo (Anexo F)

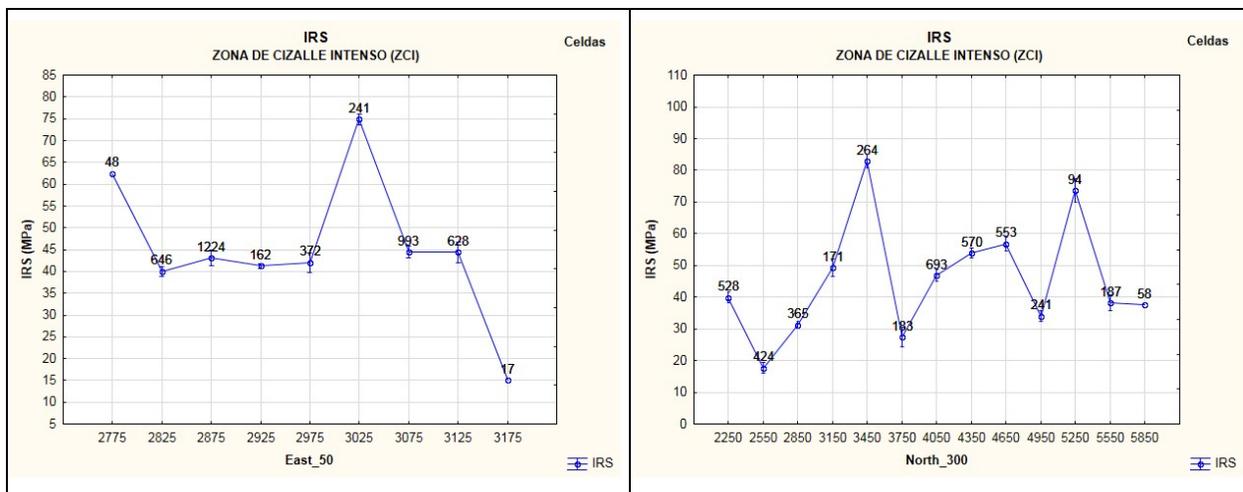
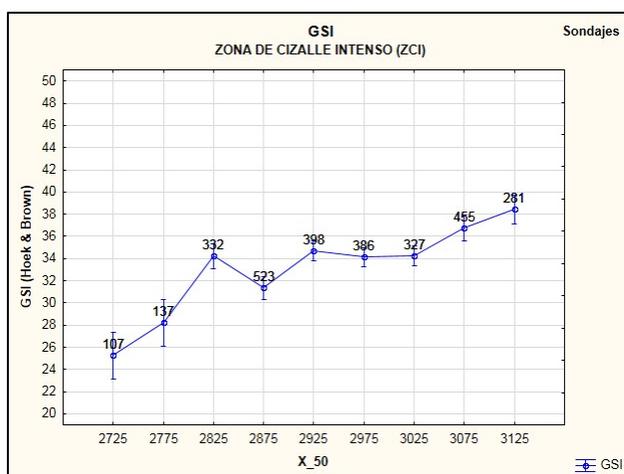


Figura 5.9. Gráficos de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Zona de Cizalle Intenso con datos de celdas. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (East) y Norte (North) y el ancho de la banda en metros (50 m y 300 m respectivamente).

Mediante análisis espacial en *software* Vulcan se pudo apreciar que existe una persistencia del valor de IRS en la vertical, identificando valores elevados en más de 3 bancos, para cada uno de estos sectores. La condición puede explicarse según lo propuesto por Niemeyer y otros (1999), quienes realizan un estudio de la Falla Oeste y su Zona de Cizalle asociada postulando que algunos núcleos de roca con cizalle moderado, y diámetros que van desde 50 a 400 m, se observan al interior de la Zona de Cizalle Intenso, ya que han quedado incluidos como relictos.

Por otra parte, al analizar la variabilidad del parámetro GSI en la Zona de Cizalle Intenso mediante los gráficos de deriva se obtuvo que, los datos de sondajes muestran una leve tendencia al aumento hacia el Este (Figura 5.10), situación contraria a como se manifiesta la deformación producida por la Falla Oeste en esta unidad. Aunque el rango de variabilidad es muy acotado, se estudian los valores altos cercanos a la Zona de Falla Oeste (coordenadas 3075E y 3125E), determinando que pertenecen al sondaje CH5456, al cual se le asignó UGTB mediante la herramienta *flag* en *software* Vulcan, lamentablemente no existe registro fotográfico de este



sondaje, por lo tanto su información no es totalmente confiable (Anexo F).

Figura 5.10. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico GSI en la UGTB Zona de Cizalle Intenso con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la

dirección en la que se agruparon los datos: Este (X) y el ancho de la banda en metros (50 m).

También en un rango muy acotado, las gráficas de dirección Norte-Sur muestran una leve disminución del GSI hacia el Sur (Figura 5.11), sector del rajo donde se evidencia de mejor manera la deformación constante y progresiva que afecta a la unidad (Fotografía 5.5).

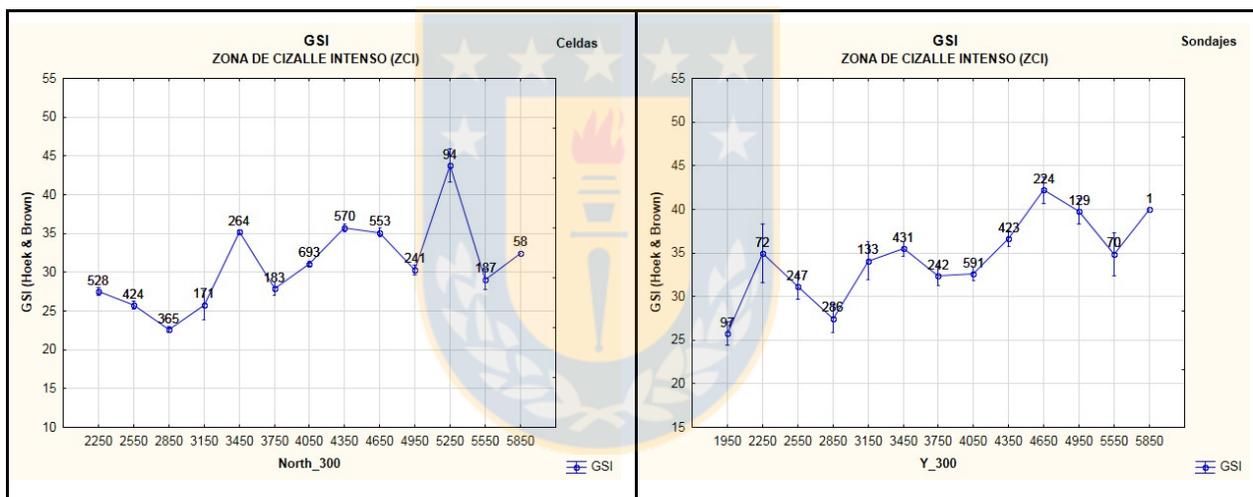
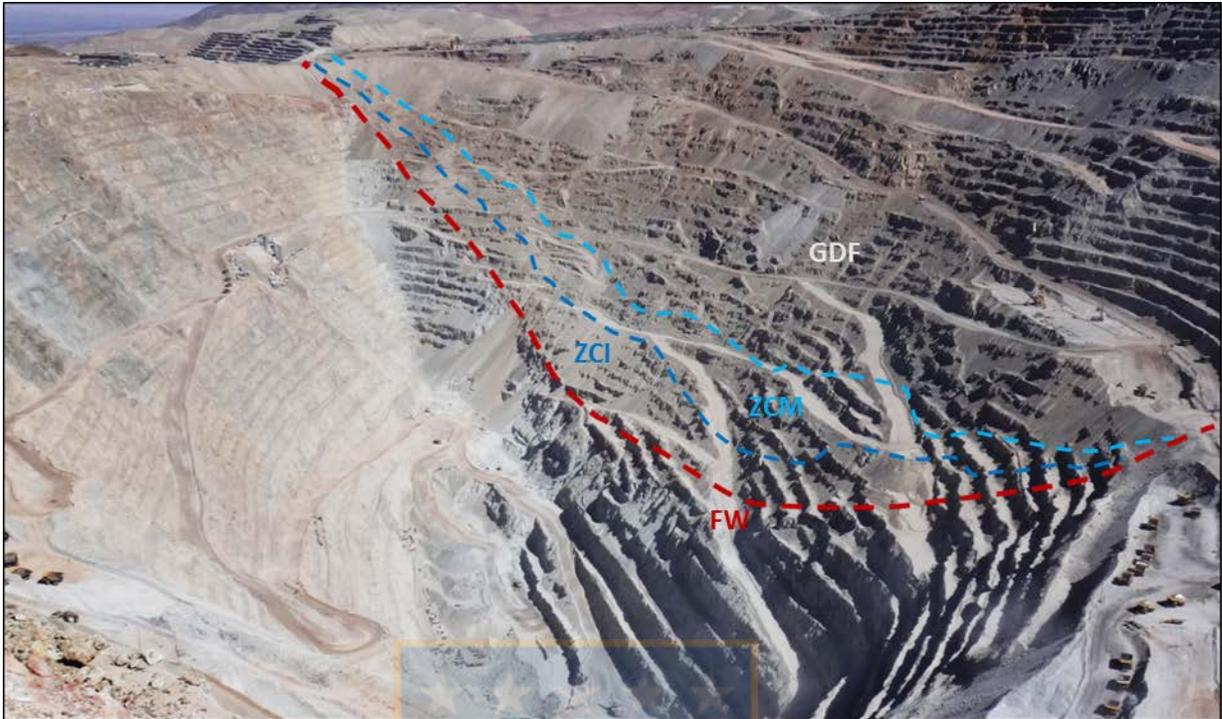


Figura 5.11. Gráficos de deriva espacial para el parámetro geotécnico GSI en la UGTB Zona de Cizalle Intenso con datos de celdas (izquierda) y sondajes (derecha). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (North, Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).



Fotografía 5.5. Muestra el rajo de Chuquicamata (vista al Sur). Se observa gran deformación del Bloque Oeste del rajo, por sobre la Falla Oeste (destacada en línea punteada roja), mientras que los bancos del talud Este se mantienen estables y sin deformación.

5.3.4. UGTB Zona de Cizalle Moderado

En la Zona de Cizalle Moderado el parámetro geotécnico IRS muestra medias de 66 MPa en celdas y 74 MPa en sondajes (Anexo A), valores que se encuentran cercanos a la media definida para esta unidad ($IRS_x = 69$ MPa, Anexo E). Se puede observar que los datos de la gráfica de celdas no son homogéneos, cerca de la mitad de los registros están en el rango de 60 a 70 MPa, lo que condiciona el valor de la media obtenida, aunque la dispersión del resto de los registros podría interpretarse como la existencia de más de una moda en la unidad. Lo mismo ocurre en la gráfica de sondajes, donde los valores sobre 120 MPa podrían ser una segunda moda, o incluso no pertenecer a la unidad, esto debido a que el valor máximo definido para la Zona de Cizalle Moderado es $IRS_{m\acute{a}x} = 119$ MPa (Anexo E). En el parámetro geotécnico GSI en cambio, se observan medias de 39 en celdas y 42 en sondajes (Anexo B), valores levemente más bajos que la media definida para la unidad ($GSI_x = 46$, Anexo E), aunque dentro del rango establecido ($GSI_{m\acute{i}n} = 38$ y $GSI_{m\acute{a}x} = 54$, Anexo E). Se debe destacar además que en este parámetro, la gráfica de sondajes presenta una segunda moda de GSI menor a 20.

Se analiza la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en la Zona de Cizalle Moderado mediante los gráficos de deriva observando lo siguiente:

La gráfica de IRS en sondajes muestra una leve disminución de la resistencia en dirección Oeste-Este (Figura 5.12), esto tiene relación con la ocurrencia de esta unidad como un halo externo a la Zona de Cizalle Intenso, la cual tiene el mayor grado de deformación experimentado por la roca debido al desplazamiento de la Falla Oeste y cuyo contacto con la Zona de Cizalle Moderado es gradual. Esta afirmación no se ve reflejada en las gráficas de GSI, cuyos análisis muestran oscilación de los datos en esta dirección, aunque en rangos muy acotados, manifestando un macizo homogéneo de Regular a Mala Calidad Geotécnica (Anexo D).

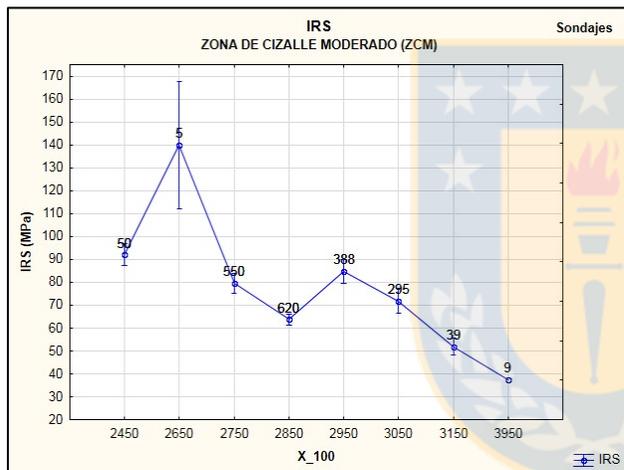


Figura 5.12. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Zona de Cizalle Moderado con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (X) y el ancho de la banda en metros (100 m).

En la Figura 5.12, los valores altos de IRS en la banda 2650E, se obtienen de mapeos del sondaje CH4359, al cual se le asignó UGTB mediante la herramienta *flag* en *software* Vulcan, lamentablemente no hay registro fotográfico de este sondaje, por lo tanto su información no es totalmente confiable (Anexo F).

En profundidad, solo la gráfica de sondajes del parámetro IRS muestra una disminución de la resistencia de 120 a 40 MPa (Figura 5.13), indicando que en el Bloque Oeste del rajo las zonas más profundas poseen menor resistencia, lo que se asocia a un mayor grado de deformación dentro de la misma unidad, aunque no necesariamente una menor calidad del macizo rocoso, ya que las gráficas del parámetro GSI no muestran tendencias en esta dirección (Anexo D).

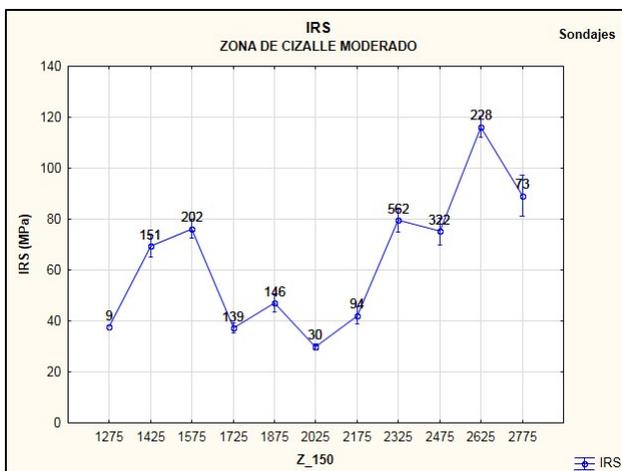


Figura 5.13. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Zona de Cizalle Moderado con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Z) y el ancho de la banda en metros (150 m).

5.4. BLOQUE ESTE

5.4.1. UGTB Granodiorita Elena Sur

En la Granodiorita Elena Sur el parámetro geotécnico IRS tiene medias de 102 MPa en celdas y 104 MPa en sondajes (Anexo A), valores más bajos que la media establecida para la unidad ($IRS_x = 143$ MPa, Anexo E). Así mismo, el parámetro geotécnico GSI presenta medias de 46 en celdas y 48 en sondajes (Anexo B), valores levemente más bajos que la media definida para la unidad ($GSI_x = 51$ MPa, Anexo E).

Al analizar la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en la Granodiorita Elena Sur mediante gráficos de deriva se obtiene lo siguiente:

En dirección Este-Oeste el parámetro IRS muestra, tanto en la gráfica de celdas como en la de sondajes, un *peak* de resistencia alto alrededor de la coordenada 3825E (Figura 5.14), esto puede interpretarse como un núcleo dentro la unidad, que por definición litológica corresponde a una granodiorita a monzodiorita cuarcífera. Este *peak* representa una mayor cantidad de sílice, lo que le imprime una mayor resistencia al macizo. Esta afirmación se basa en el parámetro alteración de los mapeos geotécnicos, tanto de celdas como de sondajes, en los que se reconoce

silicificación de la roca, así como también la presencia de cuarzo como relleno de algunas familias de diaclasas. El parámetro GSI sin embargo, no manifiesta variabilidad en las gráficas debido a esta condición de alteración.

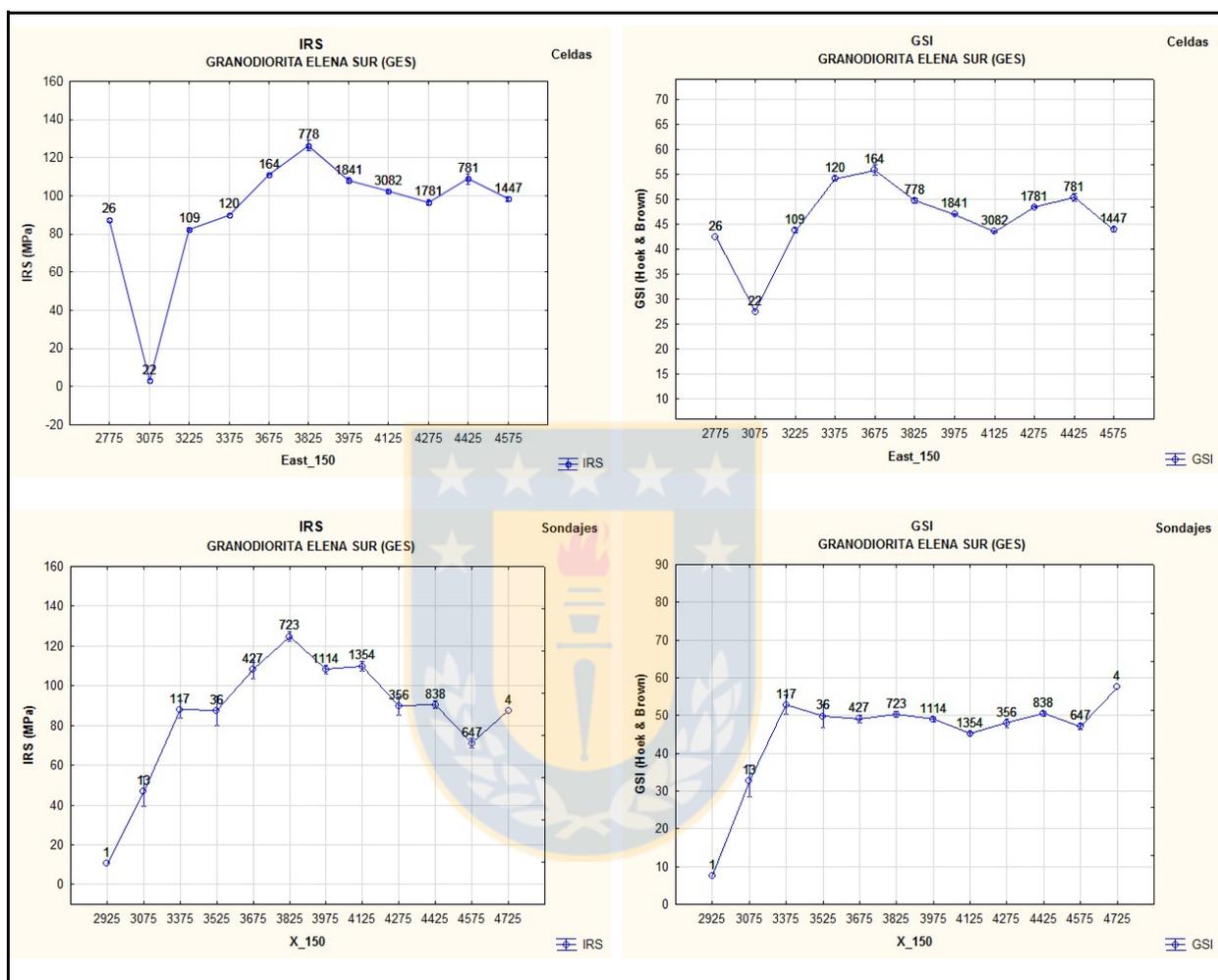


Figura 5.14. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Granodiorita Elena Sur con datos de celdas (arriba) y sondajes (abajo). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (East, X) y el ancho de la banda en metros (150 m).

La posterior disminución de la resistencia en las coordenadas más occidentales está relacionada a la Zona de Deformación Este y a la influencia asociada a este sistema de importancia distrital, reconociéndose zonas de Muy Mala Calidad Geotécnica y baja resistencia en el contacto con los Metasedimentos, esto es posible observarlo también en las gráficas de GSI, en donde se reconocen disminuciones abruptas hacia el límite Oeste de la unidad. Mapeos de celdas y

sondajes corroboran esta afirmación (Anexo F), aunque solo existe registro fotográfico del sondeaje CH5717 (Fotografía 5.6).



Fotografía 5.6. Tramo del sondeaje CH5717, desde los 70,50 m hasta los 73,50 m, caracterizado con una muy baja resistencia en el contacto entre las unidades Granodiorita Elena Sur y Metasedimentos.

5.4.2. UGTB Metasedimentos

En los Metasedimentos el parámetro geotécnico IRS muestra medias de 67 MPa en celdas y 81 en sondajes MPa (Anexo A), el valor obtenido mediante la base de datos de celdas coincide con la media definida para esta unidad ($IRS_x = 68$ MPa, Anexo E), mientras que la media obtenida mediante el mapeo de sondajes es un poco más elevada, aunque por debajo del máximo establecido para los Metasedimentos en oportunidades anteriores ($IRS_{máx} = 99$ MPa, Anexo E). Por su parte, el parámetro geotécnico GSI muestra medias de 39 en celdas y 46 en sondajes (Anexo B), valores más bajos que la media definida para la unidad ($GSI_x = 51$ MPa, Anexo E), sobre todo en el caso de la base de datos de celdas.

El análisis de la variabilidad del parámetro IRS en los Metasedimentos mediante gráficos de deriva da cuenta de la heterogeneidad litológica de esta unidad, la cual agrupa rocas de origen sedimentario, volcánico e ígneo, que pueden estar metamorfozadas, milonitizadas y/o silicificadas. Bajo este contexto, no es posible interpretar *trends* de comportamiento en ninguna de las direcciones definidas para este análisis, obteniendo una oscilación del parámetro IRS tanto en los mapeos de celdas como en los de sondajes (Anexo C).

A diferencia de lo anterior, el análisis de la variabilidad del parámetro GSI en los Metasedimentos mediante gráficos de deriva entrega información importante respecto de la calidad del macizo rocoso, manteniendo un rango casi constante entre los 35 a 40 en el caso de la base de datos de celdas y de 40 a 50 en el caso de sondajes, determinando con seguridad que corresponde a una unidad de Regular a Mala Calidad Geotécnica en su totalidad (Anexo D).

5.4.3. UGTB Pórfido Este Clorítico

En el Pórfido Este Clorítico el parámetro geotécnico IRS presenta medias de 89 MPa en celdas y 110 en sondajes MPa (Anexo A), valores que se encuentran por sobre la media definida para esta unidad ($IRS_x = 79$ MPa, Anexo E). A pesar de que la media obtenida mediante el mapeo de sondajes es bastante más elevada, este valor se encuentra por debajo del máximo establecido para el Pórfido Este Clorítico en oportunidades anteriores ($IRS_{m\acute{a}x} = 122$ MPa, Anexo E). En el caso del parámetro geotécnico GSI, este muestra medias de 48 en celdas y 53 en sondajes (Anexo B), valores más bajo que la media establecida para la unidad ($GSI_x = 61$ MPa, Anexo E).

Del análisis de variabilidad de los parámetros IRS y GSI en el Pórfido Este Clorítico mediante gráficos de deriva se tiene que:

En dirección Este-Oeste, la variabilidad espacial de los parámetros se grafica de mejor manera con los datos de mapeos de sondajes (Figura 5.15). En ambos casos, la primera mitad de la curva se interpreta como un aumento de la resistencia y la calidad geotécnica hacia el Oeste, esto desde el contacto con la Zona de Deformación Este, cuya zona de influencia le atribuye mayor blocosidad y menor resistencia a la unidad, y hasta el contacto con el Pórfido Este Potásico, cuya alteración potásica (de fondo o intensa) le imprimen una mayor resistencia y menor blocosidad, considerando siempre un contacto y/o transición gradual entre ambas unidades y/o alteraciones que las caracterizan.

Hacia el extremo occidental, las gráficas muestran una abrupta disminución de ambos parámetros. Según el estudio de ubicación espacial realizado en *software* Vulcan, estos registros corresponden a su vez a los ubicados en los extremos Norte y Sur del rajo. En sectores donde

predominan condiciones tectónicas importantes, el análisis de este comportamiento será abordado considerando la variabilidad espacial en dirección Norte-Sur.

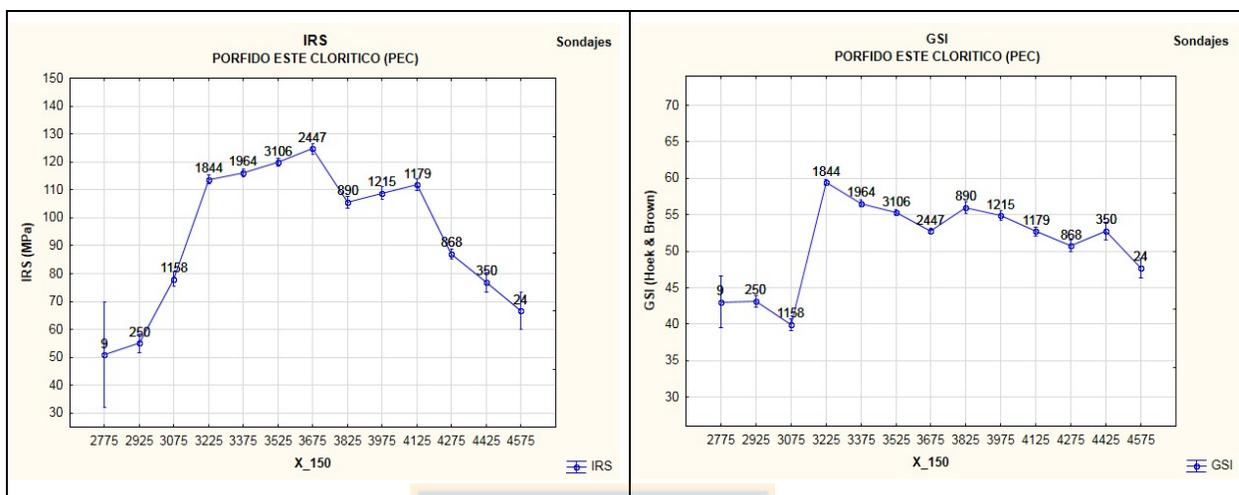


Figura 5.15. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Clorítico con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (X) y el ancho de la banda en metros (150 m).

En la dirección Norte-Sur el análisis se inicia considerando el comportamiento de la unidad en el extremo austral (Figura 5.16). Para el parámetro IRS, ambas bases de datos concuerdan en que la resistencia muestra un leve aumento de Sur a Norte. Los registros más australes de esta unidad se ven influenciados por la Zona de Deformación Este y en específico, por la Falla Portezuelo, falla de carácter distrital que limita y acuña el Pórfido Chuquicamata por el Sur. La influencia de esta falla distrital en la calidad del macizo rocoso solo puede apreciarse en la gráfica de sondajes, que muestra un leve aumento del parámetro GSI en la misma dirección.

En el extremo Norte en cambio, es posible observar disminución de la resistencia y calidad geotécnica del macizo hacia sectores septentrionales, tanto en las gráficas de celdas como en las de sondajes (Figura 5.16), este comportamiento está dado por dos situaciones, primero, por el aporte de alteración sericítica, proveniente del contacto transicional con el Pórfido Este Sericítico, y segundo, como se mencionó anteriormente, por una condición tectónica, en la que la Falla Oeste y el Sistema de Falla Zaragoza juegan un rol predominante. Entre ambos sistemas de fallas ocurre una zona caracterizada por un intenso tectonismo, con baja mineralización de cobre

y una fuerte alteración clorítica, razón por la cual estos registros han sido asignados a la unidad Pórfido Este Clorítico.

Con posterioridad a ese evento, la roca sufrió una alteración cuarzo sericítica supérgena de tipo pervasiva, que oblitera la textura original, generando incluso dificultad para determinar la litología, situación que ha llevado a barajar algunas hipótesis acerca de esta misma. Diversos autores, desde Renzetti (1957) hasta la actualidad, han manifestado que podría corresponder a la unidad Granodiorita Elena (macizo rocoso expuesto en la parte Sur-oriental del rajo y que corresponde a la roca caja en la intrusión del Pórfido Chuquicamata).

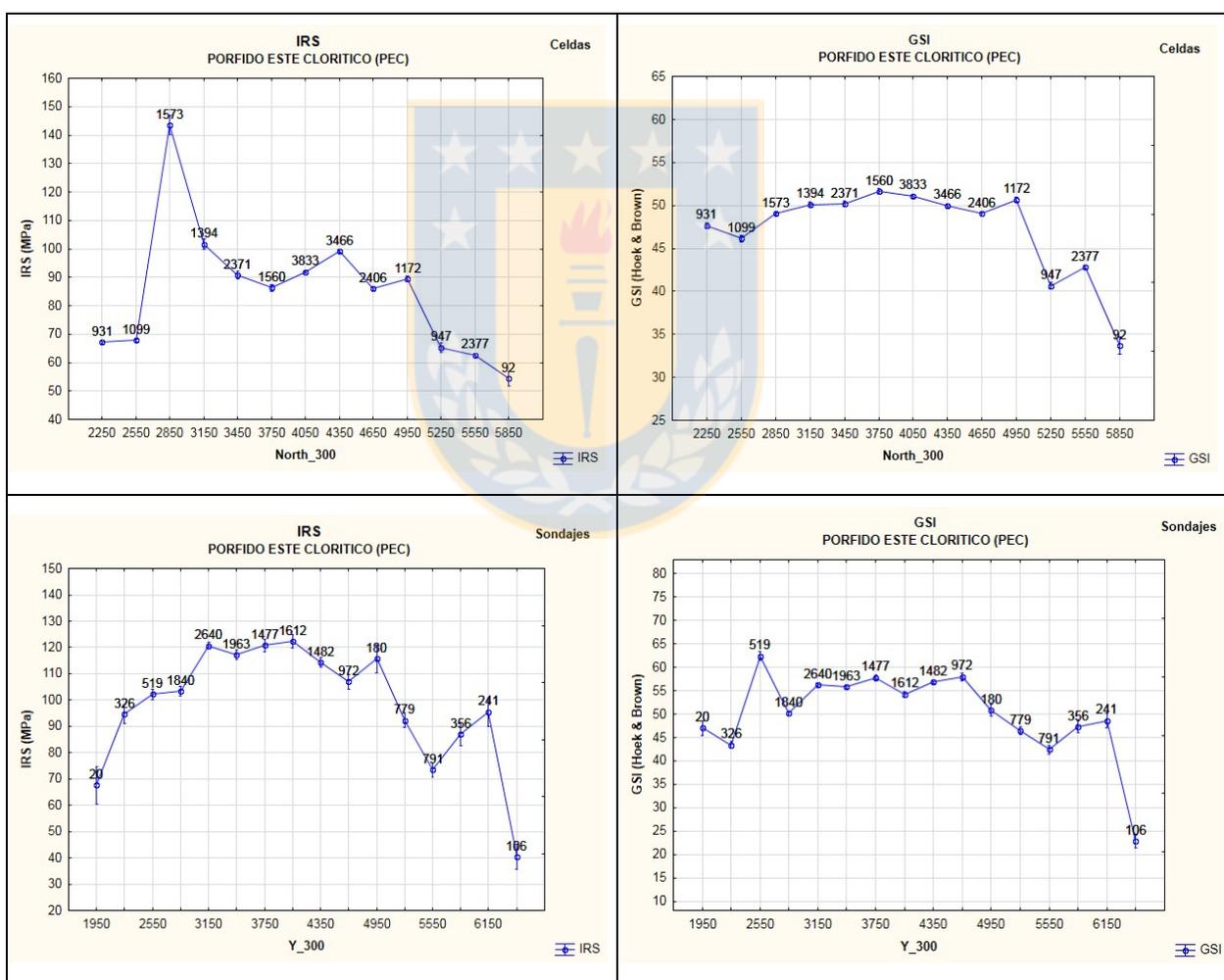
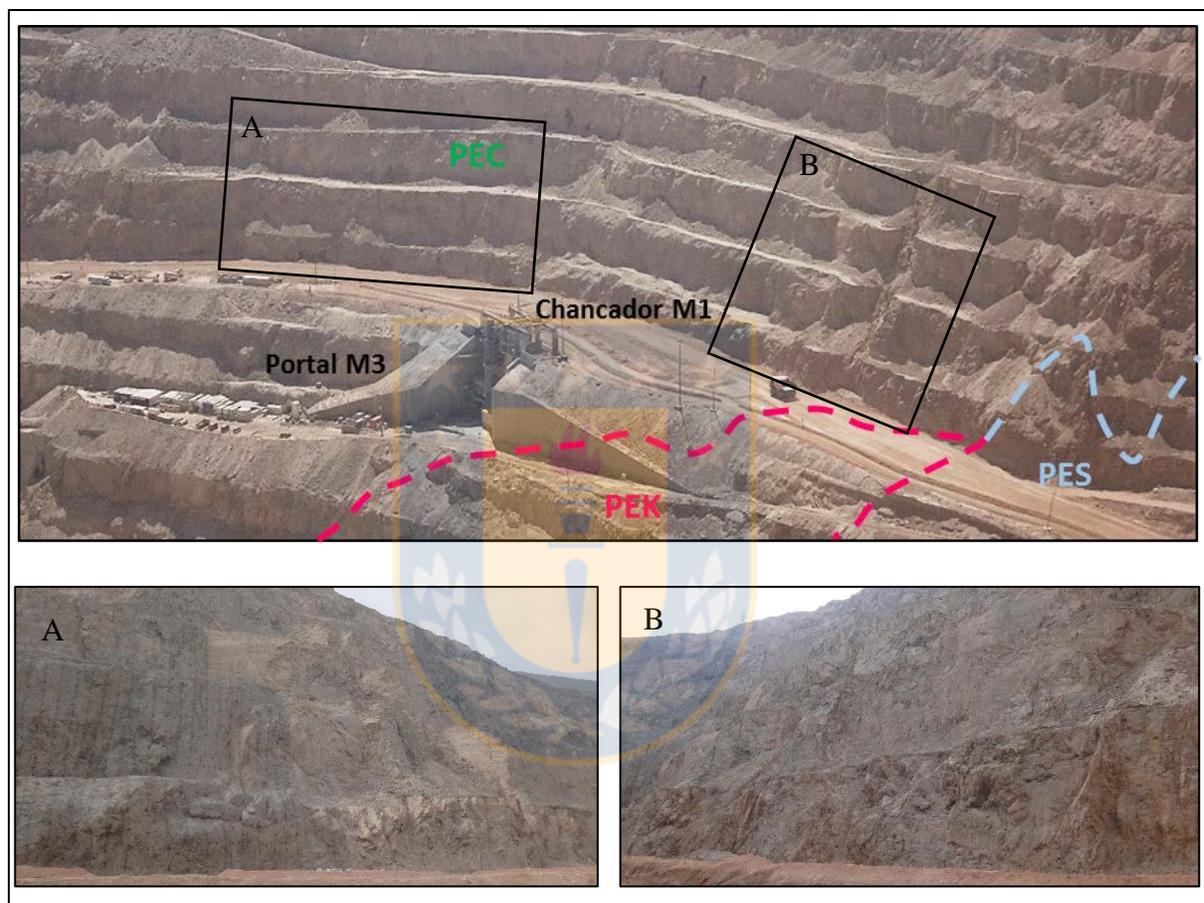


Figura 5.16. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Clorítico con datos de celdas (arriba) y sondajes (abajo). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (North, Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).

El *peak* alto de IRS a los 2850N en la gráfica de celdas se debe a mapeos que registran resistencias de 225 MPa (Anexo F), valores muy elevados para esta unidad según lo definido en trabajos anteriores (Anexo E). Como antecedente, estos registros se ubican en un sector específico del rajo, en donde se construyó el Chancador M1 y el Portal M3 para el ingreso a la subterránea (Fotografía 5.7).



Fotografía 5.7. Sector del rajo de Chuquicamata ubicado en el talud Este, cerca del codo Sur, en la cota 2445, frente al Chancador M1. En las fotografías A y B se observa un macizo rocoso de muy buena calidad y con una alta resistencia.

Por último, en la vertical todas las gráficas muestran aumento de los parámetros en profundidad, lo que puede ser atribuible a un menor grado de alteración de la roca en zonas más profundas (Figura 5.17).

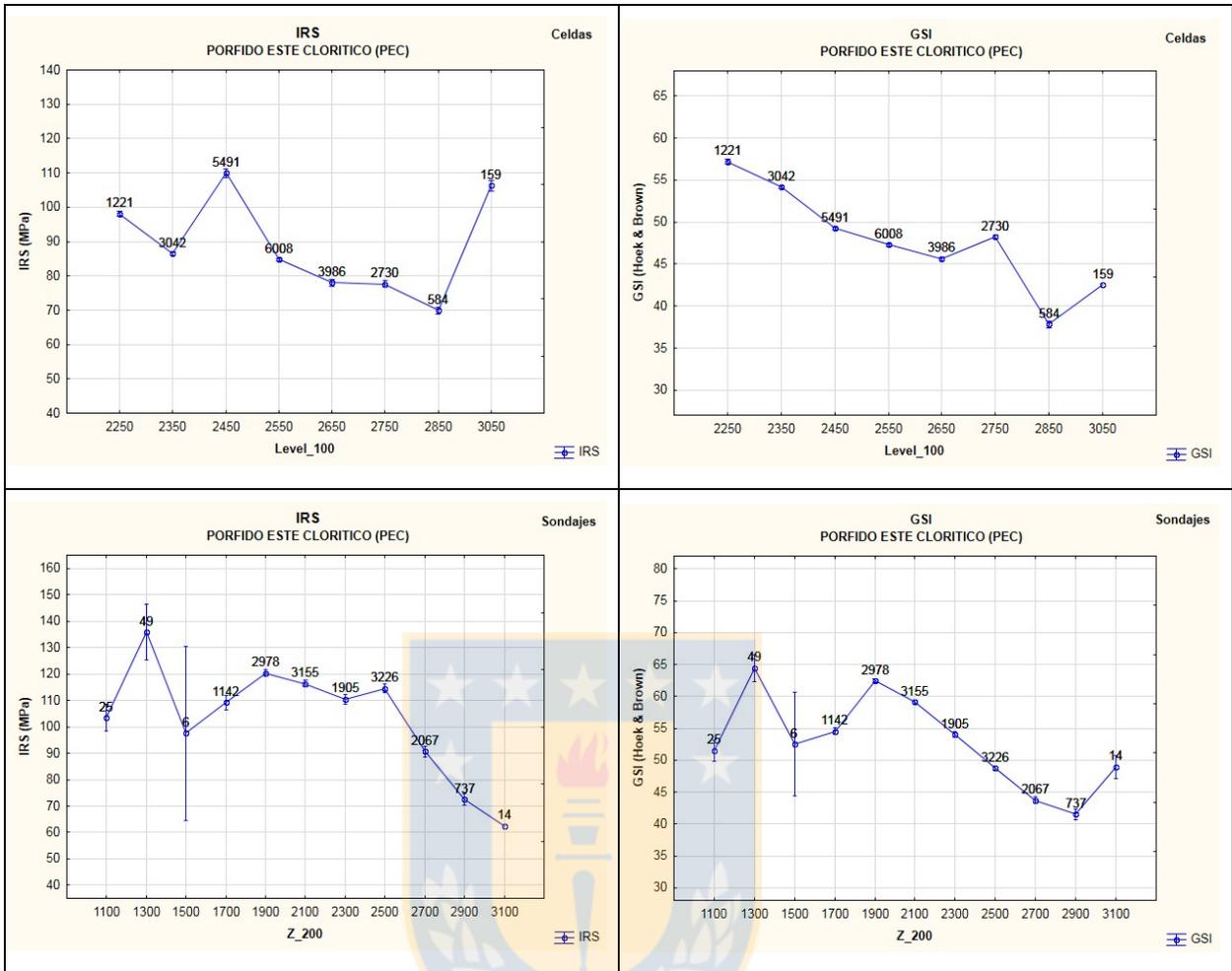


Figura 5.17. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Clorítico con datos de celdas (arriba) y sondajes (abajo). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Level, Z) y el ancho de la banda en metros (100 m y 200 m respectivamente).

5.4.4. UGTB Pórfido Este Potásico

En el Pórfido Este Potásico el parámetro geotécnico IRS presenta medias de 111 MPa en celdas y 118 MPa en sondajes (Anexo A), valores muy cercanos a la media definida para esta unidad ($IRS_x = 115$ MPa, Anexo E). Se debe mencionar que esta unidad corresponde a una de las más competentes de la Mina Chuquicamata. Por su parte, el parámetro geotécnico GSI tiene medias de 54 en celdas y 57 en sondajes (Anexo B), valores muy cercanos a la media establecida para la unidad ($GSI_x = 59$ MPa, Anexo E).

Se analiza la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en el Pórfido Este Potásico mediante gráficos de deriva constatando que:

En la gráfica de sondajes del parámetro IRS se observa una disminución gradual de la resistencia hacia el Este, hacia el contacto con el Pórfido Este Clorítico. Este comportamiento también podría interpretarse de la gráfica de sondajes del parámetro GSI, aunque en un rango muy acotado (Figura 5.18).

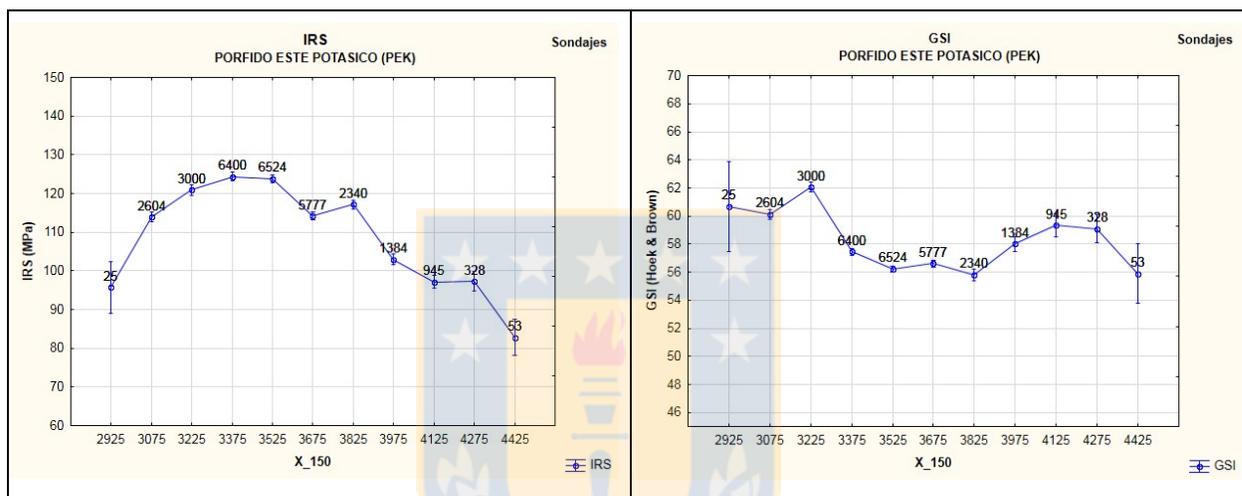


Figura 5.18. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Potásico con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (X) y el ancho de la banda en metros (150 m).

La variabilidad que muestran los registros en esta dirección pueden ser explicados considerando los eventos de alteración que afectaron a la unidad y su comportamiento tanto en el Norte como en el Sur del rajo.

En el sector Norte, la unidad Pórfido Este Potásico, caracterizada por un dominio de alteración potásica intensa y potásica de fondo, grada hacia el borde Este a una alteración clorítica subordinada, la cual es responsable de la disminución de la resistencia del macizo rocoso. En este lugar, el denominado Pórfido Oeste, cuerpo intrusivo porfídico cuya disposición espacial es N-S a NNE-SSW y de manto subvertical, generó un límite natural entre la alteración cuarzo-sericítica por el Oeste, con las alteración potásicas de fondo e intensa por el Este y, por lo tanto, la disminución de la resistencia hacia el Oeste es menor.

Por su parte, en los sectores más australes del rajo, la alteración de la roca, desde el borde Este de la Falla Americana y hacia el Este, es una alteración potásica intensa (afectada por la zona de influencia de esta falla de carácter distrital), que va gradando a una alteración potásica de fondo, aumentando con esto su resistencia y mejorando su blocosidad, para luego pasar gradualmente a una alteración clorítica, que determina el contacto con el Pórfido Este Clorítico.

Los análisis de variabilidad del parámetro IRS en dirección Norte-Sur dan cuenta de lo mencionado anteriormente, se observa una disminución de la resistencia y calidad geotécnica de la roca hacia el Sur, donde la Falla Americana y su zona de influencia juegan un rol importante, afectando la alteración potásica del macizo (Figura 5.19).

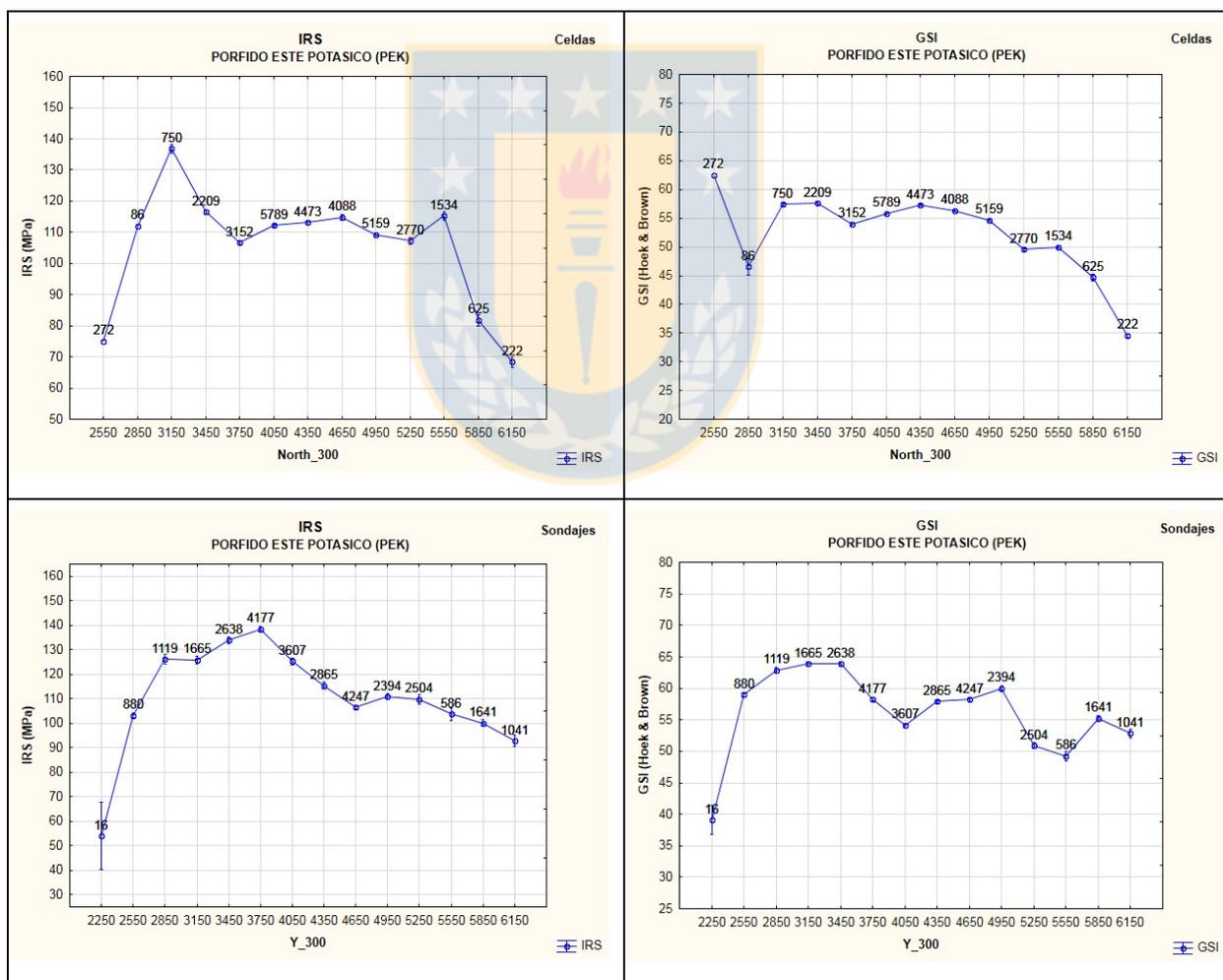


Figura 5.19. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Potásico con datos de celdas (arriba) y sondajes (abajo). El eje de las abscisas

indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (North, Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).

La misma tendencia no es posible observarla en el grafica de celdas del GSI, donde existe un registro elevado en la banda más austral (Anexo F), un análisis de ubicación espacial en *software* Vulcan revela que este dato se encuentra en el contacto entre las unidades Pórfido Este Potásico y Pórfido Este Clorítico y por lo tanto no en el contacto con la Falla Americana.

Si bien esta unidad está en contacto con el Pórfido Este Sericítico a lo largo de todo el rajo, en la zona central es posible determinar un contacto continuo de orientación N-S, mientras que en las zonas más septentrionales, casi fuera de los límites del desarrollo de taludes, la unidad potásica se encuentra como porciones aisladas dentro de la unidad sericítica, en las cuales se ha observado un contenido de sericita mayor, que afecta la resistencia de la roca y la alteración de paredes de las diaclasas, condición que es posible observar en las gráficas de celdas de los parámetros IRS y GSI (Figura 5.19).

Los registros más septentrionales son, a su vez, los de cotas más elevadas, en este caso también se puede observar la disminución de la resistencia y la calidad geotécnica de la roca en esos sectores (Figura 5.20), que corresponden a los más afectados por la alteración sericítica. En profundidad, hacia lo que hoy es el fondo mina (Nivel 2039), las gráficas de celdas para ambos parámetros muestran una disminución, que puede estar asociada a una disminución en la alteración en la roca.

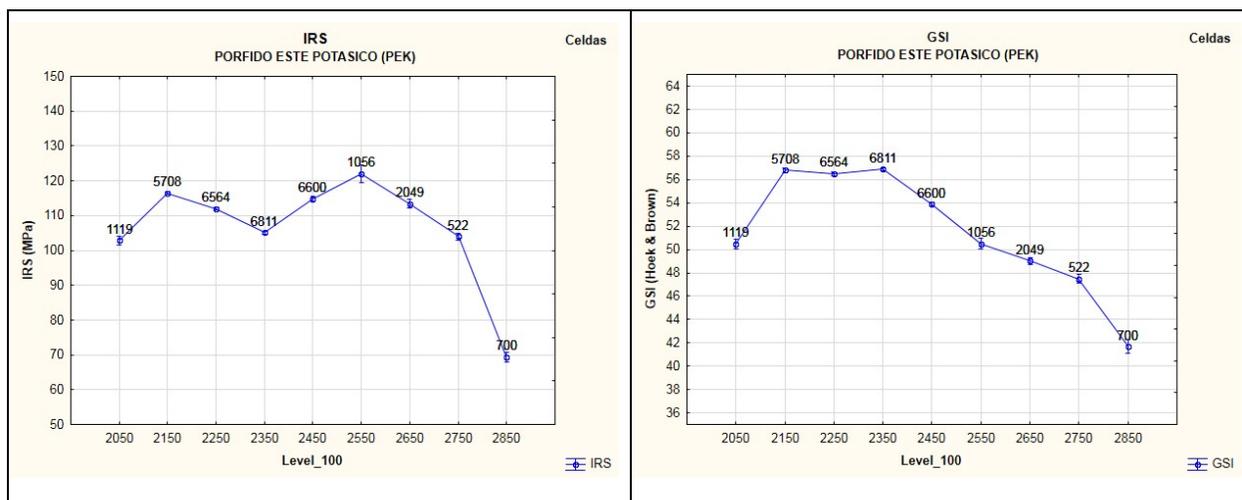


Figura 5.20. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Potásico con datos de celdas. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Level) y el ancho de la banda en metros (100 m).

5.4.5. UGTB Pórfido Este Sericítico

En el Pórfido Este Sericítico el parámetro geotécnico IRS tiene medias de 77 MPa en celdas y 88 MPa en sondajes (Anexo A), valores que se encuentran bajo la media definida para esta unidad ($IRS_x = 98$ MPa, Anexo F). Así mismo, el parámetro geotécnico GSI presenta medias de 45 en celdas y 51 en sondajes (Anexo B), valores que también son más bajos que la media definida para la unidad ($GSI_x = 58$ MPa, Anexo F).

Del análisis de variabilidad de los parámetros IRS y GSI en el Pórfido Este Sericítico mediante gráficos de deriva se obtiene lo siguiente:

En dirección Este-Oeste, tanto las gráficas del IRS como del GSI poseen una notable disminución de la resistencia hacia el Oeste (Figura 5.21), en este caso son diferentes variables las que influyen en dicha disminución y que, además, tienen directa relación con la variabilidad de la unidad en dirección Norte-Sur (Figura 5.22).

Los registros más australes y occidentales del rajo poseen baja resistencia y calidad del macizo debido a la alteración cuarzo-sericítica pervasiva que afecta y oblitera la textura original de la roca, identificándose para esto unidades geotécnicas distintas, que corresponden a las Rocas Cuarzo Sericita (Cuarzo Igual Sericita, Cuarzo Menor Sericita y Cuarzo Mayor Sericita), así mismo, el Pórfido Este Sericítico se ve afectado por la influencia de la Falla Americana, estructura que aflora como una zona de cizalle intenso pone en contacto a esta unidad con el Pórfido Este Potásico hacia el Este, actuando como una barrera de la alteración potásica.

A su vez, los registros más septentrionales y occidentales del rajo tienen baja resistencia y calidad geotécnica, debido a que en ese sector existe mayor cantidad de sericita y arcillas, producto de la actividad de la Falla Oeste, la que en su calidad de estructura a nivel regional, provoca una alteración de tipo tectónico en la roca adyacente. Como se mencionó anteriormente, la

deformación se manifiesta hacia el Oeste de la falla, afectando a la Granodiorita Fortuna, sin embargo, los últimos registros obtenidos durante el mapeo de bancos indican que, en la parte Norte del rajo, la zona de cizalle estaría más desarrollada hacia el Este de la falla, afectando al Pórfido Este, y fueron situados dentro de la Unidad Geotécnica Básica Pórfido Este Sericítico, determinando además, un cuerpo homogéneo denominado “Zona de Mala Calidad Geotécnica”, puesto que sus características geomecánicas están por debajo de las definidas para la unidad a la que son asignados (Fotografía 5.8).

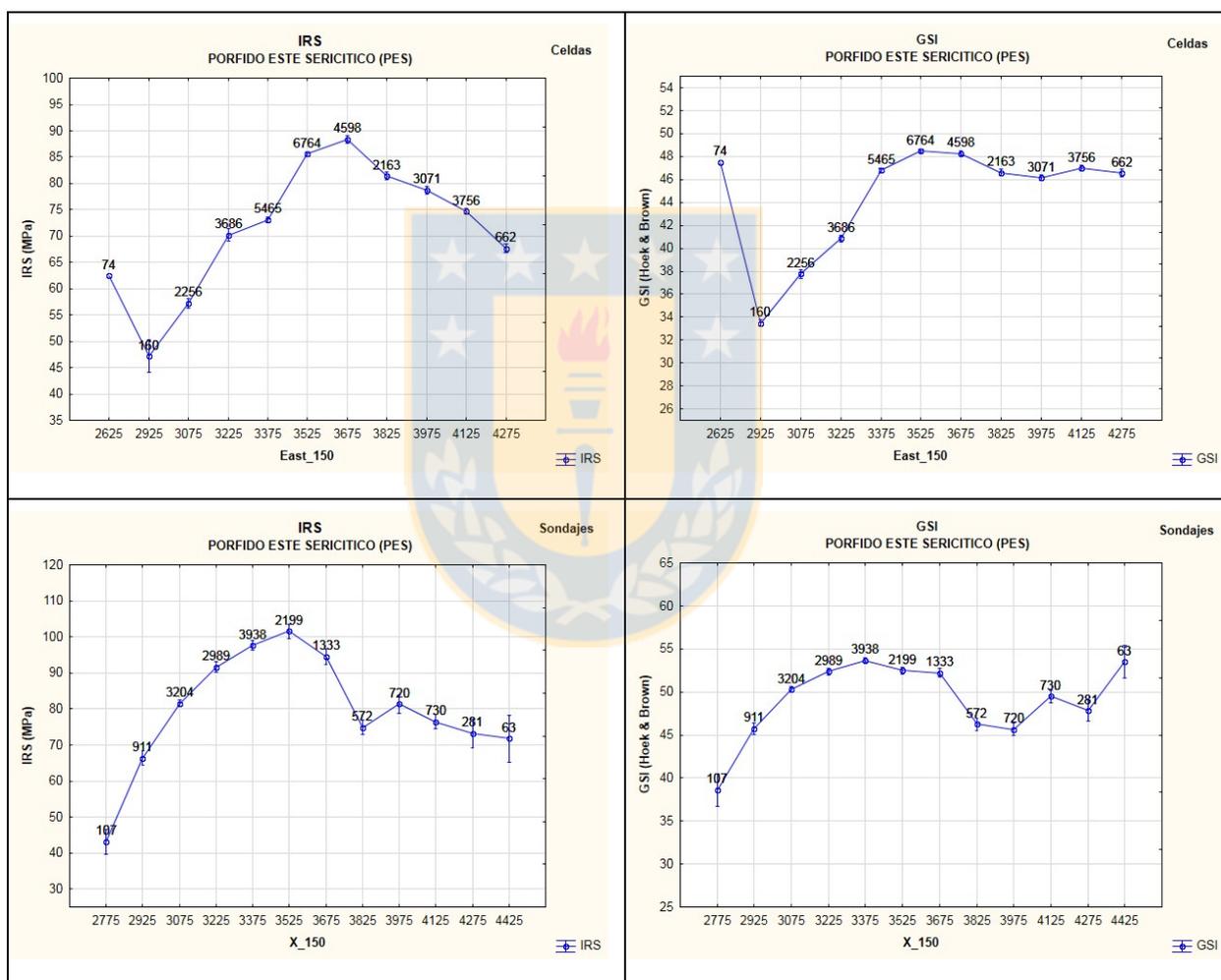


Figura 5.21. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Sericítico con datos de celdas (arriba) y sondajes (abajo). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (East, X) y el ancho de la banda en metros (150 m).

El *peak* de resistencia y calidad del macizo que se observa alrededor de la coordenada 3500E, se debe a que, en la parte central del rajo, el Pórfido Este Sericítico está en contacto con el Pórfido

Este Potásico, tanto por el Este como por el Norte, condición que le imprime mayor resistencia a la roca debido al aporte de alteración potásica. Esta situación se ve relegada también en dirección Norte-Sur (Figura 5.22) entre las coordenadas 3500 – 4500N.

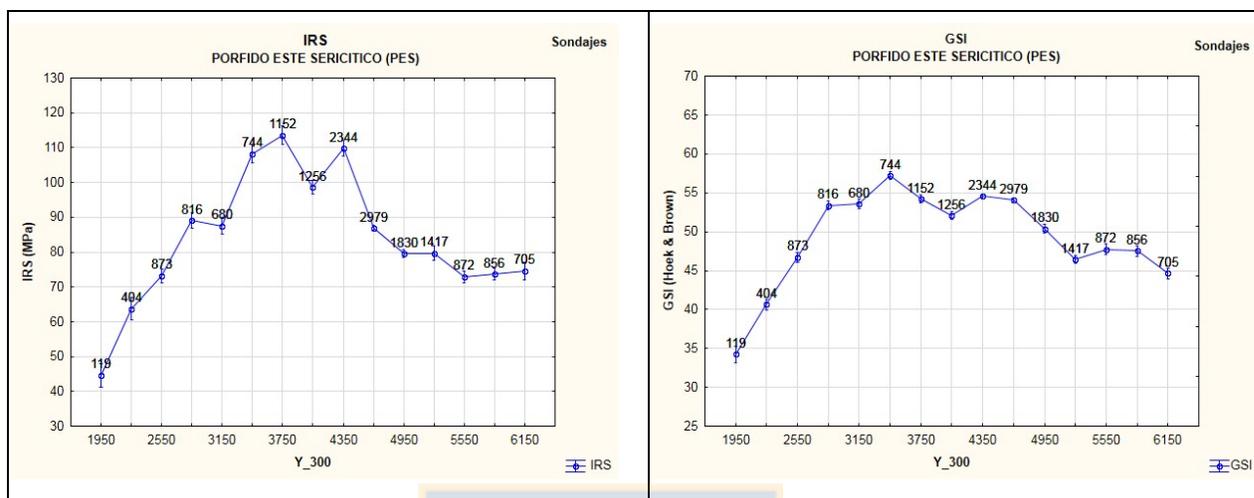


Figura 5.22. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Sericítico con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).

Por otra parte, la disminución de la resistencia y calidad del macizo que muestran los registros más orientales tiene relación con la influencia de la unidad Lixiviado, con aportes de arcillas y limonitas de ambientes supérgenos, en el contacto Noreste de la unidad.

Por último, el valor alto registrado en la coordenada 2625E de la gráfica de celdas en el GSI se encuentra fuera de los límites de la unidad y por lo tanto no debe ser considerado.



Fotografía 5.8. Zona de Mala Calidad Geotécnica ubicada en el sector Norte del rajo, adosada a la traza Este de la Falla Oeste, caracterizada como Pórfido Este Sericítico. En profundidad, solo las gráficas de sondajes son coherentes con lo anteriormente expuesto, confirmando que las zonas más elevadas, que a su vez son las más septentrionales, presentan disminución de la resistencia y la calidad geotécnica de la roca, mientras que hacia el centro del rajo, en zonas más profundas, la resistencia aumenta por su interacción con la alteración potásica. Una nueva disminución, por debajo del fondo actual del rajo, puede indicar un mayor grado de alteración sericítica en la roca (Figura 5.23).

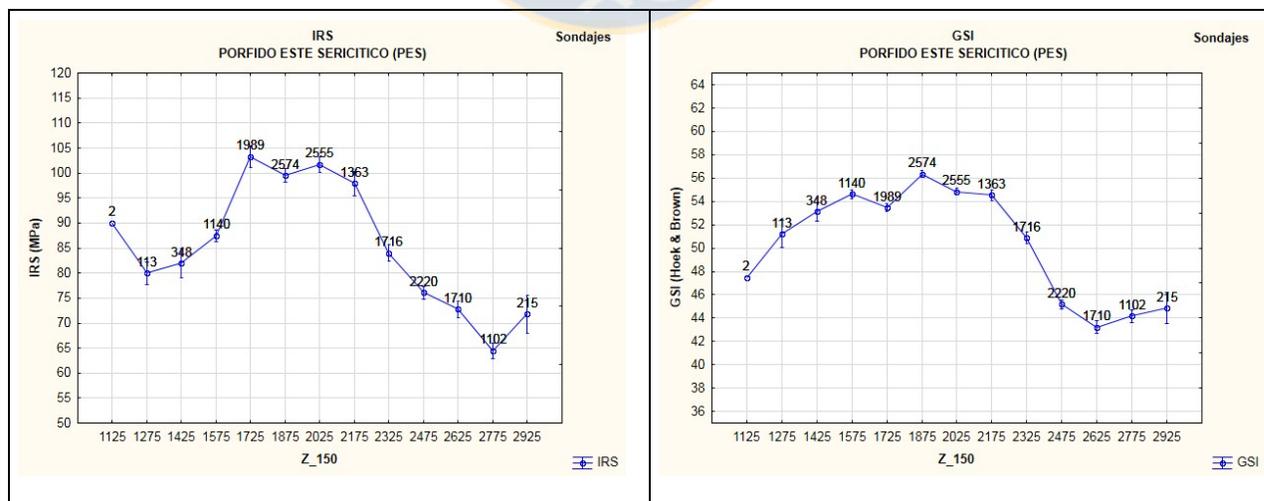


Figura 5.23. Gráficos de deriva espacial para los parámetros geotécnicos IRS (izquierda) y GSI (derecha) en la UGTB Pórfido Este Sericítico con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Z) y el ancho de la banda en metros (150 m).

5.4.6. UGTB Cuarzo Igual Sericita

En el Cuarzo Igual Sericita el parámetro geotécnico IRS tiene una media de 80 MPa, tanto en celdas como en sondajes (Anexo A), este valor es bastante más alto que la media definida para esta unidad ($IRS_x = 49$ MPa, Anexo E). Mientras que, el parámetro geotécnico GSI tiene una media de 51, tanto en celdas como en sondajes (Anexo B), y este valor corresponde a la media definida para la unidad ($GSI_x = 52$, Anexo E).

Es importante mencionar que esta unidad está definida dentro de un área determinada, ubicada en el sector centro y Sur del rajo, limitada por la traza Este de la Falla Oeste y por la unidad Pórfido Este Sericítico y la Falla Americana por el Este, debido a esto, los registros ubicados tanto al Este de la coordenada 3400E y al Norte de la coordenada 4600N no corresponden a las Rocas Cuarzo Sericita.

Además, esta unidad se define como el *background* de las unidades Cuarzo Mayor Sericita y Cuarzo Menor Sericita, las que se encuentran inmersas de manera discontinua, dentro del cuerpo elongado de Cuarzo Igual Sericita, que es el de mayor volumen.

A continuación se analiza la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en el Cuarzo Igual Sericita mediante los gráficos de deriva.

El análisis de deriva espacial en dirección Este-Oeste revela que la resistencia del macizo rocoso en esta unidad disminuye hacia el Oeste (Figura 5.24), consecuentemente con la cercanía a la Zona de Falla Oeste y específicamente a su zona de daño Este, la cual se presenta menos desarrollada que hacia el Oeste (Zonas de Cizalle Intenso y Moderado), sobre todo en la parte central y Sur del rajo, pero que de igual forma afecta las propiedades geomecánicas de la roca.

Cabe mencionar que esta unidad no se extiende más allá de la coordenada 3650E, por lo que los registros observados al Este de esta coordenada en la gráfica de sondajes corresponden a las unidades Pórfido Este Sericítico y Pórfido Este Potásico.

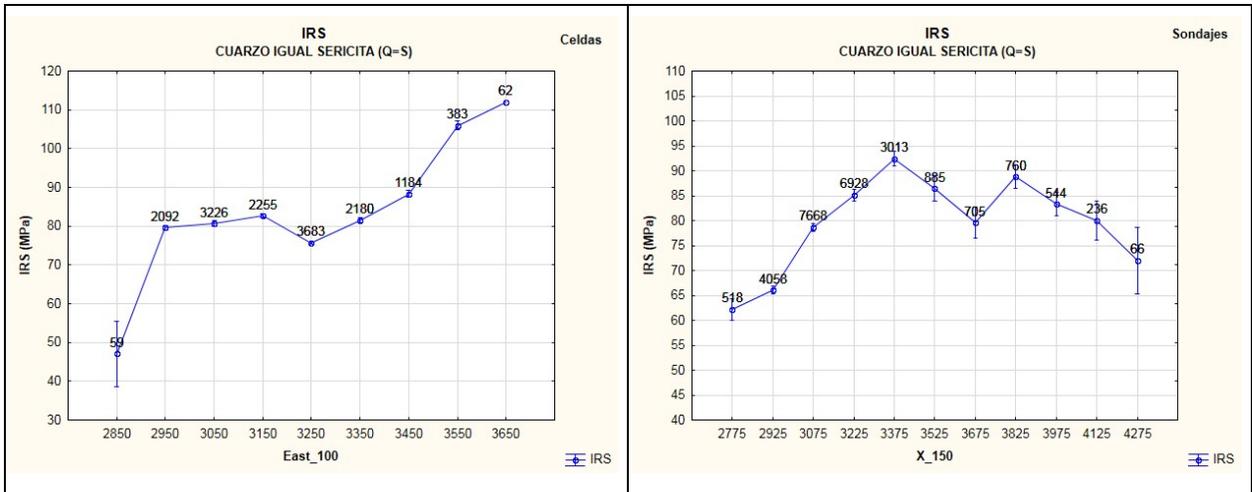


Figura 5.24. Gráficos de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas (izquierda) y sondajes (derecha). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (East, X) y el ancho de la banda en metros (100 m y 150 m respectivamente). Por su parte, la influencia de la zona de daño de la Falla Oeste se ve manifestada con una disminución muy leve del GSI hacia el Oeste en la gráfica de celdas (Figura 5.25).

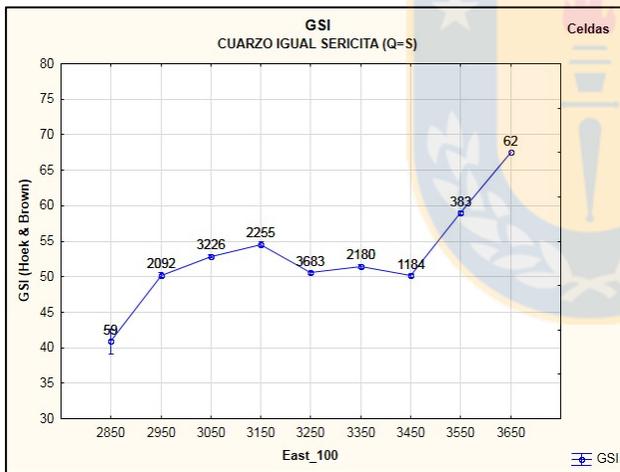


Figura 5.25. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico GSI en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Este (East) y el ancho de la banda en metros (100 m).

Para la dirección Norte-Sur, de la gráfica de celdas del IRS puede interpretarse una tendencia a la disminución de la resistencia de la roca hacia el Sur (Figura 5.26), hacia el sector afectado por las zonas de influencia de las fallas Oeste y Americana, donde se ha observado que hay un predominio de las áreas en que la cantidad de sericita es mayor al cuarzo. Aunque esta tendencia no es observada en las gráficas del GSI.

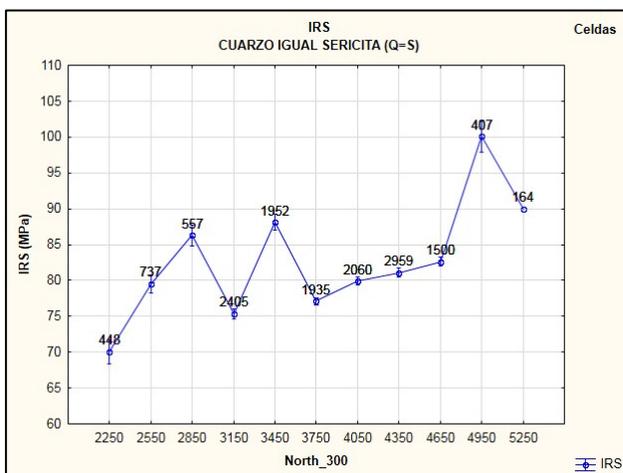


Figura 5.26. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (North) y el ancho de la banda en metros (300 m).

En profundidad, solo en las gráficas para el GSI se puede observar una leve tendencia al aumento de la calidad del macizo rocoso, conforme se desciende en cota (Figura 5.27), lo que puede interpretarse como una disminución de la intensidad de la alteración cuarzo-sericítica.

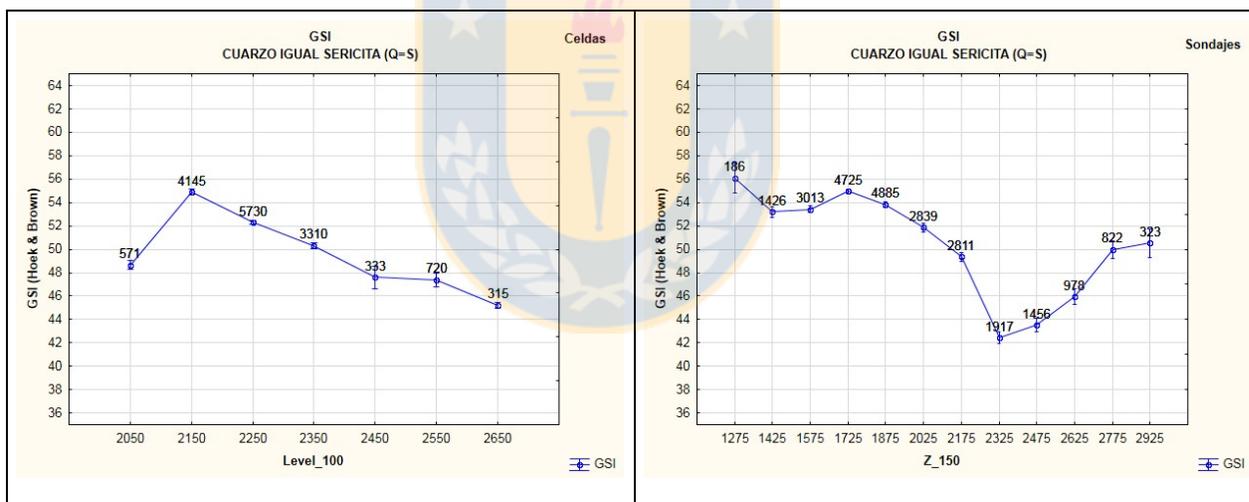


Figura 5.27. Gráficos de deriva espacial para el parámetro geotécnico GSI en la UGTB Cuarzo Igual Sericita con datos de celdas (izquierda) y sondajes (derecha). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Level, Z) y el ancho de la banda en metros (100 m y 150 m respectivamente).

5.4.7. UGTB Cuarzo Menor Sericita

Para el Cuarzo Menor Sericita el parámetro geotécnico IRS posee medias de 52 MPa en celdas y 54 MPa en sondajes (Anexo A), valores más altos que la media definida para esta unidad ($IRS_x =$

27 MPa, Anexo E). Se debe mencionar que la gráfica de celdas presenta dos modas de 35 y 60 MPa aproximadamente, siendo esta última un valor muy alto para la unidad, la que por definición no supera los 38 MPa (Anexo E). Por su parte, el parámetro geotécnico GSI presenta medias de 39 en celdas y 43 en sondajes (Anexo B), valores cercanos a la media definida para esta unidad ($GSI_x = 40$, Anexo E).

Uno de los rasgos que definen esta unidad es que, si bien su contenido de sericita debe ser mayor a un 70% en la roca y su textura debe estar completamente obliterada, la mayoría de las veces esta situación se asocia a zonas de influencia de fallas principales, subsidiarias de la Falla Oeste, u otras de carácter distrital, por lo tanto existe un gran control estructural en su desarrollo.

Como se mencionó anteriormente, se debe tener en consideración que esta unidad se encuentra inmersa dentro del Cuarzo Igual Sericita, y por tanto, está limitada a la extensión de este. Por esta razón, no todas las zonas de influencia de fallas importantes a nivel distrital con altos contenidos de sericita corresponderán a esta unidad.

A continuación se analiza la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en la UGTB Cuarzo Menor Sericita mediante gráficos de deriva.

Para el IRS, solamente en profundidad se puede interpretar un *trend* dentro de la unidad, la gráfica de celdas presenta un aumento del IRS en cotas inferiores a 2350Z. Este aumento se ve mejor representado en la gráfica de sondajes, sin embargo, se deben descartar los valores por sobre la cota 2600Z ya que éstos se encuentran fuera de los límites del Cuarzo Menor Sericita (Figura 5.28).

El aumento de la resistencia en profundidad responde a un menor grado de alteración en cotas inferiores, según registros de sondajes, tanto la Falla Oeste y la unidad Cuarzo Menor Sericita, disminuyen su potencia e influencia en profundidad.

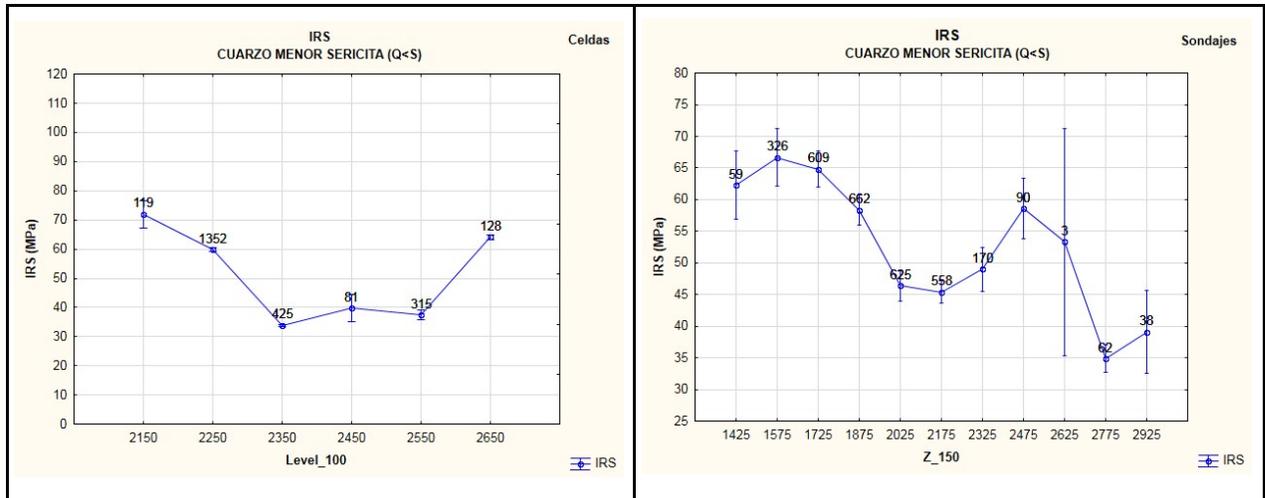


Figura 5.28. Gráficos de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Cuarzo Menor Sericita con datos de celdas (izquierda) y sondajes (derecha). El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Cota (Level, Z) y el ancho de la banda en metros (100 m y 150 m respectivamente).

Al analizar la variabilidad del parámetro GSI en el Cuarzo Menor Sericita mediante los gráficos de deriva éstos no reflejan *trends* característicos en ninguna dirección dentro de la unidad (Anexo D).

5.4.8. UGTB Cuarzo Mayor Sericita

Para el Cuarzo Mayor Sericita el parámetro geotécnico IRS muestra medias de 96 MPa en celas y 101 MPa en sondajes (Anexo A), valores más altos que la media establecida para la unidad ($IRS_x = 86$ MPa, Anexo E). Por su parte, el parámetro geotécnico GSI presenta medias de 57 en celdas y 55 en sondajes (Anexo B), valores muy cercanos a la media establecida para la unidad ($GSI_x = 58$, Anexo E).

Se debe tener presente que un macizo rocoso caracterizado como Cuarzo Mayor Sericita debe tener un contenido de cuarzo mayor o igual a un 70 %, lo que implica una alta resistencia de la roca debido al gran contenido de sílice, sin embargo, en relación a consideraciones geomecánica, las vetas de cuarzo son en general duras, pero también extremadamente frágiles (similar a un cristal o vidrio), entonces con poco esfuerzo se fracturan y brechizan rápidamente. Debido a esta propiedad mecánica de las vetas es que usualmente se encuentran cortadas por otras vetillas,

rellenas con diversos tipos de minerales, que aprovechan esta debilidad mecánica-estructural para su desplazamiento.

Al igual que en el caso anterior, la extensión de esta unidad está dada por los límites del Cuarzo Igual Sericita.

A continuación se analiza la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en el Cuarzo Mayor Sericita mediante los gráficos de deriva.

Para el IRS, de la gráfica de sondajes en dirección Norte-Sur, se puede interpretar una tendencia a la disminución de la resistencia hacia el Sur (Figura 5.29), dada principalmente por el aumento del contenido de sericita hacia el contacto con el Cuarzo Menor Sericita que es predominante en el sector Sur del rajo.

En esta gráfica se considera solo hasta la coordenada 5100N, que corresponde al límite Norte de la unidad, registros al Norte de esta coordenada pertenecen al Pórfido Este Sericítico.

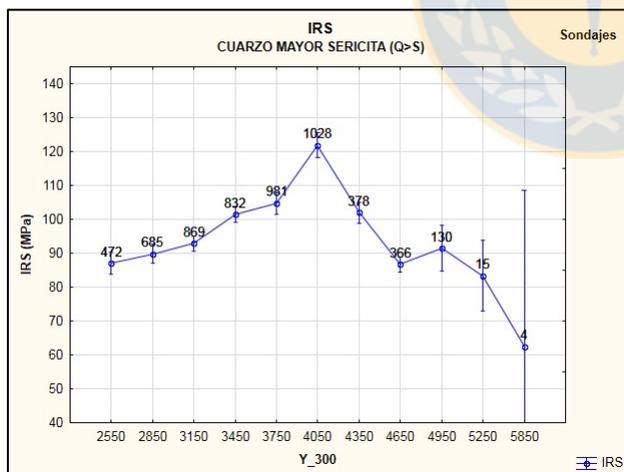


Figura 5.29. Gráfico de deriva espacial para el parámetro geotécnico IRS en la UGTB Cuarzo Mayor Sericita con datos de sondajes. El eje de las abscisas indica la dirección en la que se agruparon los datos: Norte (Y) y el ancho de la banda en metros (300 m).

Al analizar la variabilidad del parámetro GSI en el Cuarzo Mayor Sericita mediante los gráficos de deriva estos no reflejan *trends* característicos en ninguna dirección dentro de la unidad (Anexo D).

5.4.9. UGTB Lixiviado (Homogéneo y Heterogéneo)

Para el Lixiviado Homogéneo el parámetro geotécnico IRS muestra medias de 73 MPa en celas y 71 MPa en sondajes (Anexo A), mientras que en el Lixiviado Heterogéneo la media es de 67 MPa en sondajes (Anexo A). Todos estos valores son muy cercanos, aunque levemente más bajos, que la media definida para la unidad Lixiviado ($IRS_x = 75$ MPa, Anexo E).

Por su parte, para el Lixiviado Homogéneo, el parámetro geotécnico GSI presenta una media de 41, tanto en celdas como en sondajes (Anexo B), mientras que en el Lixiviado Heterogéneo la media es de 38 en sondajes (Anexo B), valores muy cercanos a la media establecida para la unidad ($GSI_x = 44$, Anexo E).

Respecto del análisis de la variabilidad de los parámetros IRS y GSI en los Lixiviados Homogéneo y Heterogéneo mediante los gráficos de deriva se debe manifestar que, debido a las características de la unidad, que corresponden a rocas que se encuentran afectadas por proceso de lixiviación parcial a pervasiva, producto de sucesivos eventos de mineralización del yacimiento y que además se presentan solo en afloramientos locales en sectores marginales del rajo, no es posible interpretar *trends* característicos de comportamiento dentro de las unidades.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Respecto del estudio realizado que puede manifestar que:

- No fue el objetivo de este trabajo cuestionar los límites de las Unidades Geotécnicas Básicas, sino solo basarse en ellos como referencia espacial para estudiar la variabilidad de los parámetros geotécnicos seleccionados dentro de cada unidad. A raíz de esto resulta necesario expresar que existe información muy diferente y, a veces, incongruente, que alteran considerablemente esta variabilidad. La situación lleva a recomendar la utilización del parámetro de resistencia IRS al momento de realizar el modelamiento de las UGTB, lo que podría evitar considerar áreas donde este parámetro presenta valores completamente fuera de rango para la unidad. Pudiendo evaluar el remapeo de dichos sectores o dejar fuera la información, al no ser confiable.
- Se reconoce que el uso de la herramienta *flag* no fue una opción acertada, puesto que muchos sondeos *flageados* presentan valores anómalos dentro de los análisis.

Respecto de los análisis para cada Unidad Geotécnica Básica:

- La UGTB Granodiorita Fortuna corresponde, por definición, a la unidad que no presenta signos de deformación y, en general, los límites entre las unidades no son netos, sino que graduales, por lo tanto, hacia los límites entre la Granodiorita Fortuna y las Zonas de Cizalle Moderado e Intenso se registra una disminución gradual de la resistencia. Conforme lo anterior, el análisis de ambos parámetros geotécnicos (IRS y GSI) refleja la escasa influencia de la Falla Oeste en esta unidad, dando sustento a la definición de la misma.
- Es importante mencionar que los valores de GSI obtenidos en este estudio para la UGTB Granodiorita Fortuna, están muy por debajo de los establecidos para dicha unidad en trabajos anteriores.

- La UGTB Brecha Entre Falla puede tener un comportamiento bastante resistente en algunos sectores, con una baja blocosidad, parámetro fundamental en el GSI. Esto puede deberse a que el paso de los fluidos por las zonas de falla provoca una disminución en su presión y temperatura, lo que acelera su reactividad con la roca, generando la precipitación de especies minerales que estaban disueltas en ellos, particularmente cuarzo, el cual rellena las fracturas, reduce la permeabilidad y con ello la eficacia del transporte.
- Acerca de la UGTB Zona de Cizalle Intenso y respecto del parámetro geotécnico IRS, se debe mencionar que, a pesar de que el histograma de sondajes se muestra más homogéneo, en comparación con el de celdas que presenta mucha dispersión en los datos, también es el que posee los valores más altos de IRS, llegando incluso a los 200 MPa. Existe la posibilidad de tener más de una moda en una misma unidad, sin embargo, es importante enfatizar que valores tan altos de IRS están muy por sobre la definición de la Zona de Cizalle Intenso, en la cual el efecto de la deformación es tal, que prácticamente se encuentra destruida la textura original de la roca y muchas veces su comportamiento geomecánico es casi como un material tipo suelo. Por lo tanto estos valores no corresponden a la unidad o están muy sobreestimados.
- Las gráficas de los parámetros geotécnicos IRS y GSI en la UGTB Zona de Cizalle Moderado reflejan la condición de la unidad, que ocurre como un halo externo a la Zona de Cizalle Intenso, la cual a su vez muestra el mayor grado de deformación que experimentó la roca por efectos del desplazamiento de la Falla Oeste y cuyo contacto con la Zona de Cizalle Moderado es gradual, observándose esto de manera clara en los análisis.
- La UGTB Metasedimentos, relacionada a la Zona de Deformación Este, tiene un efecto de disminución del parámetro geotécnico IRS en las unidades adyacentes, como son la Granodiorita Elena Sur y el Pórfido Este Clorítico.
- En la UGTB Pórfido Este Clorítico, el intenso tectonismo que afecta un sector en particular, disminuye la blocosidad de la roca, mientras que, la alteración cuarzo-sericítica supérgena de tipo pervasiva proveniente del Pórfido Este Sericítico, afecta en la alteración de paredes que

presenten las diaclasas, dando como resultado una disminución considerable del GSI en los sectores más septentrionales.

- En todas las unidades que diferencian al Pórfido Este, como son Pórfido Este Clorítico, Pórfido Este Potásico y Pórfido Este Sericítico, se puede manifestar que, diferentes tipos de mineralización y alteración afectan de distinta forma las propiedades geomecánicas de un mismo tipo litológico. Existe una gráfica que muestra el efecto de los distintos tipos de alteración (clorítica, potásica y sericítica) sobre la resistencia en compresión uniaxial de probetas del Pórfido Este (Figura 6.1).
- Así mismo, para una misma litología, mineralización y alteración, las propiedades geomecánicas suelen depender del grado de alteración que presenta la roca, lo que puede observarse en las diferentes unidades de Rocas Cuarzo Sericita que existen en el rajo, definidas como Cuarzo Igual Sericita, Cuarzo Menor Sericita y Cuarzo Mayor Sericita (Figura 6.1).

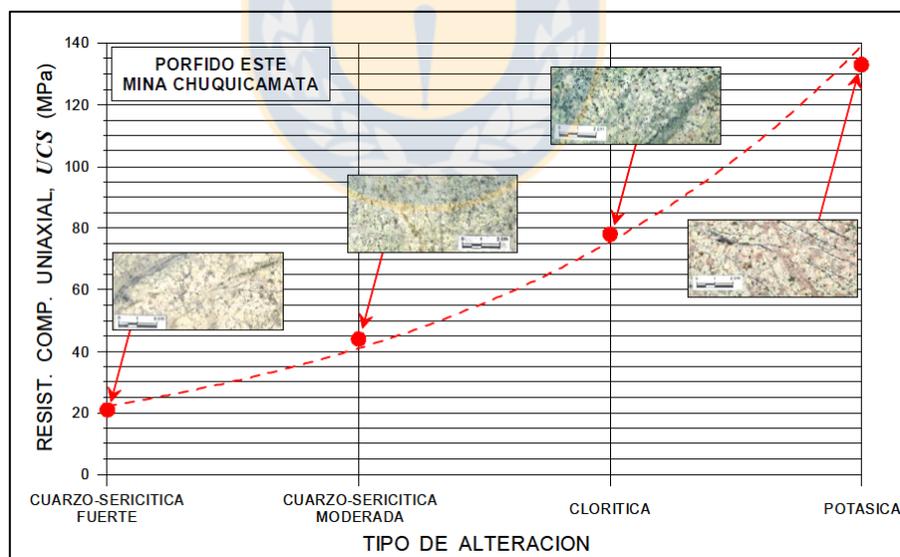


Figura 6.1. Gráfico de la resistencia a la compresión uniaxial en relación a: el tipo de alteración en una misma litología y la intensidad de un mismo tipo de alteración en una misma litología (obtenido Codelco Norte 2005).

- En la UGTB Cuarzo Igual Sericita, la gran diferencia que existe entre la media de IRS obtenida en este trabajo y la media determinada en oportunidades anteriores debe ser objeto de

estudio para futuros trabajos enfocados en el comportamiento de la unidad en sectores considerados para la minería subterránea de la Mina Chuquicamata.

- De igual manera, en la UGTB Cuarzo Menor Sericita, la gráfica de celdas para el IRS presenta dos modas, de 35 y 60 MPa aproximadamente, siendo esta última un valor muy alto para la unidad, la que por definición no supera los 38 MPa (Anexo E). Situación que debe ser analizada en trabajos posteriores.
- Los parámetros geotécnicos definidos para la UGTB Lixiviado en trabajos anteriores no hacen diferencia entre el Lixiviado Homogéneo y el Lixiviado Heterogéneo, por lo tanto, los resultados estadísticos de ambas unidades fueron comparadas con lo establecido para la unidad en general, obtenido valores muy cercanos.



7. REFERENCIAS

BALLARD, J.; PALIN, J. M.; WILLIAMS, I.; CAMPBELL, I. y FAUNES, A. 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*. Vol. **29**, **5**: 383-386.

BIENIAWSKI, ZT. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: a Complete Manual*. John Wiley and Sons: 251 pp. New York.

CAMUS, F. 2003. *Geología de los sistemas porfídicos en los Andes de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería: 267 pp. Santiago.

CASTELLI, J.C. 2002. *Geología del Distrito Chuquicamata, Fase I*. Gerencia Corporativa de Exploraciones, Codelco Chile: 70 pp. Inédito.

CODELCO NORTE. 2005. *Caracterización Geotécnica Estructural y Geomecánica de Mina Chuquicamata, Anexo N°1 Proyecto Aumento Ángulo de Talud Mina Chuquicamata*. Informe Interno, Área de Caracterización Geotécnica Estructural, Superintendencia de Geotecnia de Desarrollo, Dirección de Geotecnia, División Codelco Norte, Codelco Chile. Chuquicamata.

CODELCO NORTE, 2009. *Caracterización Geotécnica Estructural, Proyecto Mina Subterránea Chuquicamata, Delineamiento para Ingeniería Básica*. Informe Interno, Área de Caracterización Geotécnica Estructural, Superintendencia de Geotecnia Línea Sulfuros, Dirección de Geotecnia, División Codelco Norte, Codelco Chile: 180 pp. Chuquicamata.

CÓRDOVA, S.; DEMANÉ, E.; FORTT, L.; ÓRDENES, T. y RAMÍREZ, F. 2010. *Alteración y Mineralización Hipógena del yacimiento de Chuquicamata*. I Jornada de Geociencias. División Codelco Norte, Codelco Chile: 11–22. Calama.

DEERE, D. U.; HENDRON, A. J.; PATTON, F. D. y CORDING, E. J. 1967. Design of Surface and Near-Surface Construction in Rock, in Failure and Breakage of Rock. C. Fairhurst, Ed. *Society of Mining Engineers of AIME*: 237-302. New York.

FAUNES, A.; HINTZE, F.; SIÑA, A., VÉLIZ, H.; VIVANCO, M. y STAFF GEÓLOGOS. 2003. Chuquicamata, Núcleo de una “Anomalía Planetaria” de Cu y Mo: Modelo Geológico. Superintendencia Geología de Producción, División Codelco Norte, Codelco Chile (Inédito): 46 pp. Chuquicamata.

HOEK, E. y BROWN, E. T. 1988. The Hoek-Brown failure criterion. A 1988 update. Rock engineering for underground excavations, Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. Curran Ed. University of Toronto.

KARZULOVIC, A. 2001. Geomecánica Aplicada en Minería. Apuntes de clases. Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago de Chile: 511 pp. Santiago.

NIEMEYER, H.; TORRES, R.; SUÁREZ, C.; RODRÍGUEZ, J.; ASTENGO, M. y CUITIÑO, L. 1999. Caracterización de la Falla Oeste y su Zona de Cizalle en la Mina Chuquicamata. Informe Interno. Superintendencia de Geotecnia, División Codelco Norte, Codelco Chile.

OSSANDÓN, G., FRÉRAUT, R., GUSTAFSON, L., LINDSAY, D. y ZENTILLI, M. 2001. Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report. *Economic Geology*, Vol. **96**: 249-270.

PRIEST, S. D. y HUDDSON, J. A. 1976. Discontinuity spacing in rock. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science, and Geomechanics Abstracts*, Vol. **13**:135– 148.

RENZETTI, B. L. 1957. Geology and Petrogenesis at Chuquicamata, Chile. Inédito. Tesis de Doctorado. University of Indiana: 92 pp. Mapa escala 1:10.000. USA

RIVERA, S.; ALCOTA, H.; PROFFETT, J.M.; DÍAZ, J.; LEIVA, G. y VERGARA, M. 2012. Update of the Geologic Setting and Porphyry Cu-Mo Deposits of the Chuquicamata District, Northern Chile. *Society of Economic Geologists. Special Publication*. Vol. **16**: 36 pp. Londres.

SIÑA, A.; MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F. y VIVANCO, M. 2005. Chuquicamata Subterráneo, raíces hipógenas de un pórfido gigante de Cu-Mo generado por sucesivos eventos hidrotermales sobreimpuestos: evidencias geológicas y geocronológicas. División Codelco Norte, Codelco Chile (Inédito): 170 pp. Chuquicamata.

TOMLINSON, A.J. y BLANCO, N. 2008. Geología de la franja El Abra – Chuquicamata, II Región (21°45'–22°30'S). Servicio Nacional de Geología y Minería. *Informe Registrado IR–08–35*: 196 pp. 5 mapas escala 1:50.000. Santiago.

VÉLIZ, H. 2009. Actualización Modelo Estructural Mayor, Yacimiento Chuquicamata (Inédito). Informe Interno de Vavel Earth, Inc. Proyecto Chuquicamata Subterráneo, División Codelco Norte, Codelco Chile: 73 pp. Chuquicamata.

