



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



**CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS DE  
REDES DE FRACTURAS DISCRETAS (DFN) PARA EL  
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS EN FASE 5 DS,  
RAJO DON LUIS. CODELCO - DIVISIÓN ANDINA,  
REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE**



**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Yael Valeria Hernández Toledo**

**Profesor Patrocinante:** Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra  
**Profesional Guía:** Sr. Fernando Luis Ortiz Maya  
**Profesores Comisión:** Msc. Abraham Elías González Martínez  
Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

**Concepción, 2020**

*No entres dócilmente en esa buena noche,  
que al final del día debería la vejez arder y delirar;  
enfurécete, enfurécete ante la muerte de la luz.*

*-Dylan Thomas-*



*A mis abuelos Bella e Ignacio,  
mis tíos Laura y Jorge,  
y especialmente a mi madre Pamela.*

# ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. División Andina</b> .....	1
1.1.1. Ubicación y vías de acceso.....	1
1.1.2. Historia de División Andina .....	1
1.1.3. Métodos de extracción.....	4
<b>1.2. Clima</b> .....	6
<b>1.3. Descripción del problema</b> .....	7
<b>1.4. Objetivos</b> .....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	8
<b>1.5. Trabajos anteriores</b> .....	8
<b>1.6. Terminología y acrónimos</b> .....	12
<b>1.7. Agradecimientos</b> .....	13
<b>2. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	14
<b>2.1. Generalidades</b> .....	14
<b>2.2. Geología Regional</b> .....	15
<b>2.2.1. Evolución geotectónica</b> .....	15
2.2.1.1. Eoceno medio .....	16
2.2.1.2. Eoceno superior - Oligoceno superior.....	16
2.2.1.3. Mioceno inferior temprano.....	16
2.2.1.4. Mioceno inferior tardío - Mio. ceno medio.....	17
2.2.1.5. Mioceno superior - Holoceno.....	18
<b>2.2.2. Segmentación morfoestructural andina</b> .....	19
<b>2.2.3. Geología estructural</b> .....	20
<b>2.2.4. Rocas estratificadas</b> .....	21
2.2.4.1. Jurásico .....	21
2.2.4.2. Cretácico.....	23
2.2.4.3. Paleógeno - Neógeno.....	28
2.2.4.4. Cuaternario .....	29
<b>2.2.5. Rocas intrusivas</b> .....	31
2.2.5.1. Cretácico Inferior .....	31
2.2.5.2. Cretácico Superior.....	31
2.2.5.3. Eoceno superior - Mioceno inferior .....	32
2.2.5.4. Mioceno.....	32
2.2.5.5. Mioceno superior - Plioceno .....	33
<b>2.3. Geología del yacimiento Río Blanco</b> .....	33
<b>2.3.1. Franja metalogénica</b> .....	33

2.3.2. Unidades litológicas.....	33
2.3.3. Alteración y mineralización.....	43
2.3.3.1. Alteración de fondo.....	43
2.3.3.2. Alteraciones tardimagmáticas.....	45
2.3.3.3. Alteración hidrotermal temprana.....	45
2.3.3.4. Alteración hidrotermal tardía.....	45
2.3.3.5. Alteración sericítica - argílica tardía.....	45
2.3.4. Geología estructural.....	46
2.3.5. Ambientes geotécnicos.....	47
<b>3. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1. Generalidades.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2. Factores influyentes en la estabilidad de taludes.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.1. Factores condicionantes.....</b>	<b>51</b>
3.2.1.1. Estratigrafía y litología.....	51
3.2.1.2. Estructura geológica y discontinuidades.....	51
3.2.1.3. Condiciones hidrogeológicas.....	52
3.2.1.4. Propiedades geomecánicas.....	52
3.2.1.5. Tensiones naturales.....	53
<b>3.2.2. Factores desencadenantes.....</b>	<b>53</b>
3.2.2.1. Sobrecargas estáticas y dinámicas.....	53
3.2.2.2. Precipitaciones y régimen climático.....	53
3.2.2.3. Procesos de meteorización.....	54
<b>3.3. Mecanismos de falla.....</b>	<b>54</b>
3.3.1. Rotura plana.....	54
3.3.2. Rotura en cuña.....	55
3.3.3. Rotura por volcamiento.....	56
3.3.4. Rotura por pandeo.....	57
3.3.5. Rotura circular.....	57
<b>3.4. Modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFN).....</b>	<b>57</b>
3.4.1. Concepto de DFN.....	57
3.4.2. Sectorización del área de estudio.....	59
3.4.3. Levantamiento tridimensional.....	62
3.4.4. Parámetros para el modelamiento.....	64
3.4.4.1. Posicionamiento de las discontinuidades.....	64
3.4.4.2. Orientación de las discontinuidades.....	65
3.4.4.3. Longitud de las discontinuidades.....	66
3.4.4.4. Forma de las discontinuidades.....	70
3.4.4.5. Intensidad de las discontinuidades.....	70
3.4.5. Análisis de cuñas de roca.....	72
<b>3.5. Métodos de muestreo.....</b>	<b>73</b>
3.5.1. Línea de detalle.....	74
3.5.2. Celda o ventana de mapeo.....	74
3.5.3. Línea de mapeo circular.....	75
3.5.4. Secciones transversales.....	75



3.6. Sesgos asociados a la captura de datos .....	76
3.6.1. Sesgo por orientación .....	76
3.6.2. Sesgo por truncamiento .....	76
3.6.3. Sesgo por censura .....	77
3.6.4. Sesgo por tamaño .....	78
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1. Generalidades .....</b>	<b>79</b>
<b>4.2. Captura de información en terreno .....</b>	<b>81</b>
4.2.1. Sectores elegidos .....	81
4.2.2. Levantamiento tridimensional .....	83
4.2.3. Identificación esquemática de fallas .....	83
<b>4.3. Adquisición de datos .....</b>	<b>84</b>
4.3.1. Procesamiento de la imagen escaneada .....	84
4.3.2. Mapeo de discontinuidades.....	85
4.3.3. Obtención de las intensidades de fracturamiento lineal .....	89
<b>4.4. Construcción de modelos DFN .....</b>	<b>92</b>
4.4.1. Creación del espacio de trabajo .....	93
4.4.2. Construcción de los modelos DFN no calibrados .....	93
4.4.2.1. Posicionamiento de las discontinuidades .....	93
4.4.2.2. Orientación de las discontinuidades .....	94
4.4.2.3. Longitud de las discontinuidades .....	95
4.4.2.4. Forma de las discontinuidades .....	98
4.4.2.5. Intensidad de las discontinuidades .....	98
4.4.3. Construcción de modelos DFN calibrados .....	99
4.4.4. Evaluación de los parámetros simulados .....	104
4.4.4.1. Orientación de las discontinuidades .....	104
4.4.4.2. Intensidad de las discontinuidades .....	105
4.4.4.3. Longitud de las discontinuidades .....	109
<b>4.5. Análisis de modelos de estabilidad cinemática .....</b>	<b>110</b>
4.5.1. Análisis de cuña .....	110
4.5.2. Modelos híbridos .....	112
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>115</b>
<b>5.1. Orientación de las discontinuidades .....</b>	<b>115</b>
<b>5.2. Longitud de las discontinuidades .....</b>	<b>123</b>
<b>5.3. Intensidad de las discontinuidades.....</b>	<b>126</b>
<b>5.4. Modelos de estabilidad cinemática.....</b>	<b>130</b>
<b>6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>145</b>
<b>6.1. Orientaciones .....</b>	<b>145</b>
<b>6.2. Longitudes.....</b>	<b>146</b>

<b>6.3. Intensidades</b> .....	146
<b>6.4. Modelos DFN</b> .....	146
<b>6.5. Modelos de estabilidad cinemática</b> .....	147
<b>6.6. Limitaciones</b> .....	148
<b>6.7. Recomendaciones</b> .....	149
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	152
<b>ANEXOS</b> .....	159

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Ubicación y accesos al área de estudio .....	2
1. 2. Yacimiento Río Blanco - Los Bronces .....	4
1. 3. Método de explotación de <i>Panel Caving</i> .....	5
2. 1. Mapa esquemático de los cuatro segmentos volcánicamente activos de los Andes .....	14
2. 2. Perfil paleogeográfico para el Eoceno medio entre los 33° y 34°S .....	16
2. 3. Perfil paleogeográfico para el Eoceno superior - Oligoceno superior entre los 33° y 34°S .....	17
2. 4. Perfil paleogeográfico para el Mioceno inferior temprano entre los 33° y 34°S .....	17
2. 5. Perfil paleogeográfico para el Mioceno inferior tardío - Mioceno medio entre los 33° y 34°S .....	18
2. 6. Perfil paleogeográfico para el Mioceno superior - Holoceno entre los 33° y 34°S .....	18
2. 7. Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35°S .....	19
2. 8. Mapa geológico simplificado mostrando las principales fallas reconocidas regionalmente y los cuatro dominios estructurales .....	20
2. 9. Mapa de la geología regional .....	34
2. 10. Modelo implícito tridimensional de las unidades litológicas del yacimiento Río Blanco .....	44
2. 11. Cuadro resumen de la evolución geológica del yacimiento Río Blanco .....	49
3. 1. Diagrama de transición desde roca intacta hasta macizo rocoso.....	51
3. 2. Esquemas de roturas planas .....	55
3. 3. Esquemas de roturas en cuña .....	56
3. 4. Esquemas de fallas por volcamiento .....	56
3. 5. Esquemas de fallas por pandeo .....	57
3. 6. Esquemas de roturas circulares .....	58
3. 7. Modelo de Redes de Fracturas Discretas .....	58

3.	8.	Ubicación de F5 DS en mina rajo Don Luis .....	59
3.	9.	Distribución de los Grupos Litológicos en F5 DS .....	61
3.	10.	Demostración de una Distribución <i>Bootstrap</i> .....	66
3.	11.	Distribución de probabilidad Chi Cuadrado .....	68
3.	12.	Medidas de intensidad de fracturamiento .....	72
3.	13.	Análisis de cuñas de roca en <i>FracMan</i> .....	74
3.	14.	Métodos de muestreo .....	75
3.	15.	Método de muestreo de secciones transversales .....	76
3.	16.	Esquema de sesgo por orientación .....	77
3.	17.	Esquema de sesgo por truncamiento .....	77
3.	18.	Esquema de sesgo por censura .....	78
3.	19.	Esquema de sesgo por tamaño .....	78
4.	1.	Diagrama de flujo del trabajo .....	80
4.	2.	Sectorización del área de trabajo .....	81
4.	3.	Representación esquemática de las fallas del sector I .....	84
4.	4.	Nube de puntos del sector I .....	85
4.	5.	Triangulación de la nube de puntos del sector I .....	85
4.	6.	Ventana de mapeo del sector I .....	86
4.	7.	Pasos para la creación de un plano de discontinuidad .....	87
4.	8.	Discontinuidades mapeadas para el sector I .....	88
4.	9.	Ángulo de incidencia entre un plano de discontinuidad y un eje coordinado .....	89
4.	10.	Esquema de definición de ejes para las estructuras mapeadas .....	90
4.	11.	Líneas de detalle para el cálculo de $P_{10}$ de los ejes X' y Z .....	91
4.	12.	Pasos para el cálculo de $P_{10}$ del eje Y' utilizando el método de secciones transversales .....	92
4.	13.	Creación del espacio de trabajo en <i>FracMan</i> .....	94
4.	14.	Modelos DFN no calibrados, sector I .....	100
4.	15.	Ejemplo de medición de frecuencia de fractura en modelos DFN .....	101
4.	16.	Modelos DFN calibrados para cada eje coordinado, sector I .....	103
4.	17.	Modelo DFN calibrado para el sector I .....	104
4.	18.	Validación del método de <i>bootstrapping</i> del sector I .....	105
4.	19.	Metodología para el cálculo de $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) .....	108
4.	20.	Trazas creadas por las intersecciones de los discos estructurales del sector I con las superficies, cálculo de $P_{21}$ MAPEADO ( $m/m^2$ ) .....	108
4.	21.	Trazas creadas por las intersecciones de los conjuntos de fractura simulados del sector I con las superficies, cálculo de $P_{21}$ SIMULADO ( $m/m^2$ ) .....	108
4.	22.	Parámetros para definir la geometría de un talud minero .....	111
4.	23.	Pasos previos al Análisis de cuña, sector I .....	112
4.	24.	Análisis de cuña del sector I .....	112
4.	25.	Fallas explícitas mapeadas para el sector I .....	113
4.	26.	Modelo híbrido del sector I .....	114
5.	1.	Análisis de orientaciones del sector I .....	115
5.	2.	Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector I .....	116
5.	3.	Análisis de orientaciones del sector II .....	117
5.	4.	Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector II .....	118

5.	5.	Análisis de orientaciones del sector III .....	118
5.	6.	Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector III .....	119
5.	7.	Análisis de orientaciones del sector IV .....	120
5.	8.	Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector IV .....	121
5.	9.	Análisis de orientaciones del sector V .....	121
5.	10.	Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector V .....	122
5.	11.	Análisis de orientaciones del sector VI .....	123
5.	12.	Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector V .....	124
5.	13.	Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector II .....	130
5.	14.	Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector III .....	131
5.	15.	Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector IV .....	133
5.	16.	Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector V .....	134
5.	17.	Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector VI .....	136
5.	18.	Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector I .....	138
5.	19.	Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector II .....	139
5.	20.	Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector III .....	140
5.	21.	Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector IV .....	141
5.	22.	Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector V .....	142
5.	23.	Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector VI .....	143

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

<b>Fotografía</b>	<b>Página</b>
3. 1. Vista panorámica de F5 DS .....	60
3. 2. Láser I - Site 8.800 .....	62
4. 1. Sectores en estudio .....	82

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico</b>	<b>Página</b>
4. 1. Función de densidad de la distribución Chi Cuadrado, sector I .....	96
4. 2. Función de densidad de probabilidad para la función <i>Pareto</i> , sector I .....	97
4. 3. Ajustes de los largos estructurales del sector I a la función <i>Power Law</i> .....	98
4. 4. Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ para el eje X' del sector I .....	102
4. 5. Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ para el eje Y' del sector I .....	102
4. 6. Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ para el eje Z del sector I .....	103

4.	7.	Valores $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) para establecer el área mínima de la superficie de trabajo .....	107
4.	8.	Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector I a la función <i>Power Law</i> .....	110
5.	1.	Ajustes de los largos estructurales del sector II a la función <i>Power Law</i> .....	124
5.	2.	Ajustes de los largos estructurales del sector III a la función <i>Power Law</i> .....	125
5.	3.	Ajustes de los largos estructurales del sector IV a la función <i>Power Law</i> .....	125
5.	4.	Ajustes de los largos estructurales del sector V a la función <i>Power Law</i> .....	125
5.	5.	Ajustes de los largos estructurales del sector VI a la función <i>Power Law</i> .....	126
5.	6.	Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector II a la función <i>Power Law</i> .....	126
5.	7.	Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector III a la función <i>Power Law</i> .....	127
5.	8.	Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector IV a la función <i>Power Law</i> .....	127
5.	9.	Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector V a la función <i>Power Law</i> .....	128
5.	10.	Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector VI a la función <i>Power Law</i> .....	128
5.	11.	Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ del sector II .....	129
5.	12.	Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ del sector III.....	131
5.	13.	Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ del sector IV.....	132
5.	14.	Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ del sector V.....	134
5.	15.	Relación lineal entre los parámetros de intensidad $P_{32}$ y $P_{10}$ del sector VI .....	135

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>		
3.	1.	Sistema de medición de discontinuidades .....	71
4.	1.	Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado para los datos estructurales del sector I .....	96
4.	2.	Prueba de bondad de ajuste <i>Kolmogórov Smirnov</i> para los datos estructurales del sector I .....	97
4.	3.	Cálculo de la frecuencia de fractura, sector I .....	101
4.	4.	Valores $P_{32}$ y $P_{10}$ de cada modelo DFN no calibrado del sector I .....	101

4.	5.	Resultados de $P_{32}$ CALIBRADOS por eje, sector I .....	103
4.	6.	Errores del parámetro $P_{10}$ (1/m) para el sector I .....	106
4.	7.	Demostración del efecto escala con valores de $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) .....	107
4.	8.	Error del parámetro $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) para el sector I .....	109
4.	9.	Parámetros de diseño de Fase 5 DS .....	111
4.	10.	Estadística del Análisis de cuña del sector I .....	112
4.	11.	Estadística del Modelo híbrido del sector I .....	114
5.	1.	Sistemas estructurales definidos para el sector I .....	116
5.	2.	Sistemas estructurales definidos para el sector II .....	117
5.	3.	Sistemas estructurales definidos para el sector III .....	119
5.	4.	Sistemas estructurales definidos para el sector IV .....	120
5.	5.	Sistemas estructurales definidos para el sector V .....	122
5.	6.	Sistemas estructurales definidos para el sector VI .....	123
5.	7.	Datos de las discontinuidades de todos los sectores separadas por eje	129
5.	8.	Errores del parámetro $P_{10}$ (1/m) para el sector I .....	136
5.	9.	Errores del parámetro $P_{10}$ (1/m) para el sector II .....	136
5.	10.	Errores del parámetro $P_{10}$ (1/m) para el sector III .....	137
5.	11.	Errores del parámetro $P_{10}$ (1/m) para el sector IV .....	137
5.	12.	Errores del parámetro $P_{10}$ (1/m) para el sector V .....	137
5.	13.	Errores del parámetro $P_{10}$ (1/m) para el sector VI .....	137
5.	14.	Errores del parámetro $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) de todos los sectores en estudio .....	138
5.	15.	Estadísticas de modelos de Análisis de estabilidad cinemática del sector I .....	139
5.	16.	Estadísticas de modelos de Análisis de estabilidad cinemática del sector II .....	140
5.	17.	Estadísticas de modelos de Análisis de estabilidad cinemática del sector III .....	141
5.	18.	Estadísticas de modelos de Análisis de estabilidad cinemática del sector IV .....	142
5.	19.	Estadísticas de modelos de Análisis de estabilidad cinemática del sector V .....	143
5.	20.	Estadísticas de modelos de Análisis de estabilidad cinemática del sector VI .....	144

## RESUMEN

Mediante procesos de perforación y tronadura, la minería a cielo abierto desarrolla cortes en el macizo rocoso que permiten el afloramiento de discontinuidades en las paredes, formando bloques potencialmente inestables de acuerdo con los arreglos estructurales presentes y los diseños de las fases. Desde el punto de vista geotécnico, para este tipo de minería el objetivo primordial es garantizar la estabilidad de los taludes a nivel banco, talud global e interrampa, evitando accidentes y asegurando la continuidad operacional. CODELCO, División Andina ha incorporado el modelamiento de Redes de Fractura Discretas (DFN), las que permiten simular mediante la generación de estructuras estocásticas la arquitectura interna de los macizos rocosos.

En el presente estudio se construyeron modelos DFN para Fase 5 DS, del rajo Don Luis. El área de trabajo se dividió en seis sectores, considerando su estructura geológica y el diseño de la fase. Para cada sección se tomaron levantamientos tridimensionales, y se identificaron las continuidades y asociaciones de fallas en el área. Los escaneos se procesaron en *PointStudio*, donde se dibujaron las ventanas de mapeo y dentro de ellas se reconocieron todas las discontinuidades de longitud  $\geq 5$  m (Schulz, 2019), requiriendo el método mapear un mínimo de 150 fracturas. Del mapeo se obtuvieron las orientaciones, longitudes e intensidades del fracturamiento, este último parámetro corresponde a la frecuencia de fracturas (por eje coordenado)  $P_{10 \text{ MAPEADO}}$  (1/m), y al largo de las fracturas por unidad de área  $P_{21 \text{ MAPEADO}}$  (m/m<sup>2</sup>). Estas medidas son los datos de entrada a *FracMan*, el *software* de modelamiento.

Para la simulación del posicionamiento de las estructuras se utilizó el algoritmo de *Enhanced Baecher*, la distribución *bootstrapping* remuestreó las orientaciones y la función *Power Law* se ajustó a la distribución de los largos estructurales. Para simular la intensidad de fracturamiento se optimizó la metodología existente, usando la intensidad de fracturamiento volumétrica  $P_{32}$  (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) que posee la ventaja de ser independiente de la orientación y de la distribución del tamaño de las fracturas, obteniéndose mediante su relación lineal con  $P_{10}$ . Se construyeron modelos DFN no calibrados con valores de  $P_{32 \text{ ARBITRARIOS}}$  y se midieron los valores de  $P_{10}$  de los conjuntos generados. Con los pares de datos tomados se lograron las ecuaciones de las rectas de cada eje y de cada sector. Posteriormente, con los valores de  $P_{10 \text{ MAPEADOS}}$  se calcularon los  $P_{32 \text{ CALIBRADOS}}$ . Para corroborar que los ajustes fueran correctos, se midieron los valores de  $P_{10 \text{ MODELADO}}$  y  $P_{21 \text{ MODELADO}}$ , y se calcularon los errores comparando con las mediciones mapeadas. Para todos los casos, los errores resultaron inferiores al 5%, por tanto, todos los modelos DFN se consideraron calibrados. Para los análisis de estabilidad se aplicaron dos modelos, los Análisis de Cuña y los Modelos Híbridos. Ambos simularon la estabilidad cinemática de los bloques calculando el factor de seguridad, los primeros se formaron por la intersección de los modelos DFN calibrados con los diseños de los taludes, por su naturaleza probabilística este tipo de análisis no predijo la ubicación de las cuñas, pero sí originó bloques consistentes con las geometrías observadas en terreno. Para optimizar la predicción de la ubicación de los bloques inestables se incorporaron las fallas explícitas mapeadas, formando Modelos Híbridos. Al comparar las inestabilidades producidas en estas simulaciones con los moldes de cuñas vistos en terreno se encontró gran concordancia en sus ubicaciones, mejorando la simulación de los volúmenes y geometrías de las cuñas. Con esta comparación se validaron todos modelos de estabilidad de F5 DS, concluyendo que las inestabilidades se forman por la acción conjunta de fallas y sistemas de discontinuidades.



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. División Andina

División Andina es una de las siete divisiones de CODELCO Chile, que opera en la comuna de Los Andes el sector este del yacimiento Río Blanco - Los Bronces. Andina produce cobre y molibdeno fino contenido en concentrados, para ello, se procesan actualmente del orden de 88 toneladas por día de mineral, con una ley media de 0,73% de cobre y 0,02% de molibdeno, produciendo en promedio 210.000 toneladas por año de cobre fino en concentrado, situación que se proyecta hasta el 2026. Actualmente, existen dos sectores de extracción: el Tercer Panel de la mina subterránea Río Blanco y la mina a cielo abierto Don Luis (GRMD, 2019).

### 1.1.1. Ubicación y vías de acceso

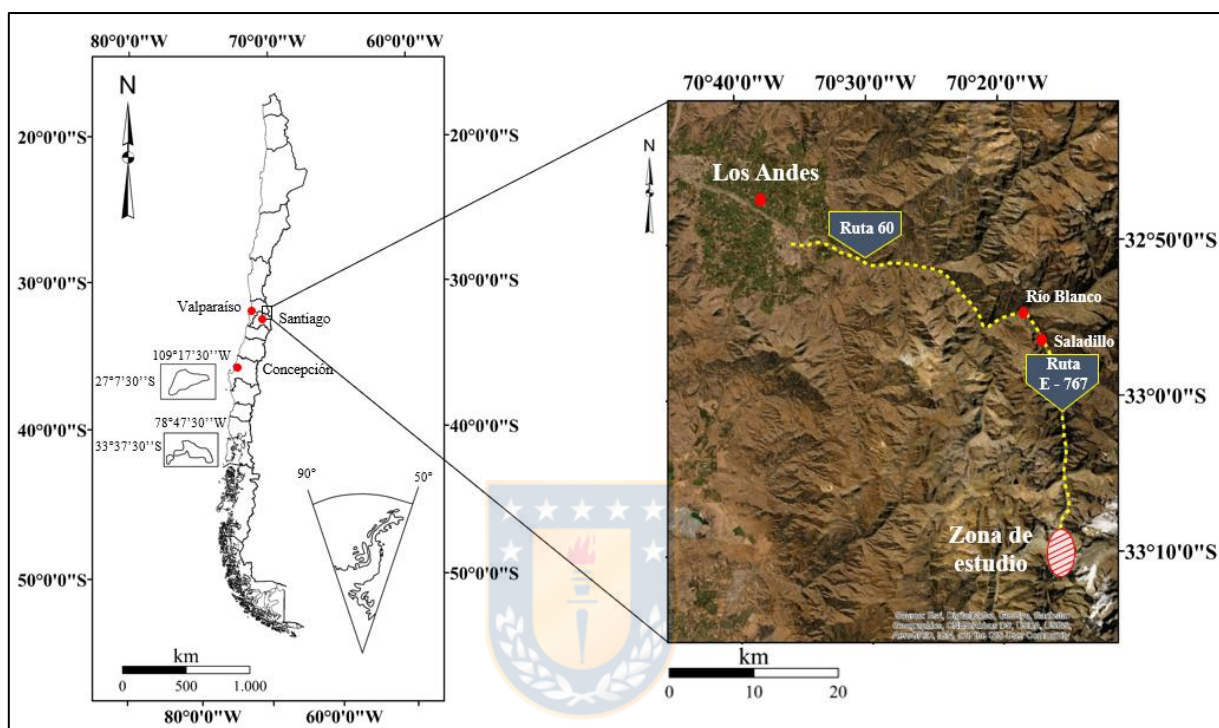
Las operaciones de División Andina se ubican en la cordillera de Los Andes, en la ciudad homónima, entre los 3.700 y 4.200 m s.n.m, en el valle de Aconcagua, Región de Valparaíso. El área de estudio (Figura 1.1) que corresponde a la Fase 5 (F5) DS del rajo Don Luis se localiza a los 33°09' latitud sur y 70°15' latitud oeste. Para acceder al rajo desde Los Andes, se debe conducir por el Camino Internacional Ruta 60 que conecta la ciudad con el paso fronterizo Los Libertadores, este camino se debe seguir unos 30 km hasta llegar al poblado de Río Blanco, donde se toma la Ruta E - 767, que lleva a la localidad de Saladillo. Unos 30 km más al sur se encuentra el acceso a las instalaciones de Don Luis.

### 1.1.2. Historia de División Andina

Baros (2010), recopiló los antecedentes históricos de la división. La historiadora menciona que parte de la mina actualmente explotada por División Andina, fue conocida originalmente como La Americana, su descubridor fue un arriero de Los Andes, quien en 1880 explotó un bolsón de minerales de alta ley. Sin embargo, fue el neoyorkino Marcos Fabrick quien en 1892 obtuvo el primer título de propiedad de La Americana, el primero vinculado al yacimiento Río Blanco. Fabrick ratificó e inscribió la pertenencia por última vez en 1897, al fallecer y en cumplimiento de



su testamento, sus bienes fueron legados a Clara Luna viuda de Patiño. Cuando ella falleció en 1903, su hijo Luis Patiño Luna solicitó el legado de su progenitora para él y su hermana Rosa, herencia que les fue concedida en 1907. Pero en breve, La Americana pasó a ser en su totalidad propiedad de Luis, quien compró las pertenencias a su hermana.



**Figura 1.1:** Ubicación y accesos al área de estudio.

Posteriormente, los derechos fueron cedidos a la Compañía Minera Las Nuevas Condes, que se conformó en 1921 por escritura pública en Los Andes. Sin embargo, dicha empresa nunca explotó estas pertenencias y solo fue creada para legalizar su traspaso posterior al ingeniero Félix Corona, quien constituyó la empresa Compañía Minera Aconcagua. Pero, la serie de obras que proyectaba realizar esta compañía, para el desarrollo de la minería en La Americana requerían más dinero de lo calculado, lo que significó buscar capital en inversionistas extranjeros. Por este motivo, Rodolfo Michels, socio en Estados Unidos de *Nichols Copper Corporation*, compañía dedicada al tratamiento y venta de minerales de cobre, concentrado y cobre fundido visitó el campamento chileno, reconoció la mayor parte de las labores y viajó a Estados Unidos. La información reunida, interesó a Allan Rogers, accionista y asesor técnico de la consultora, quien formó la empresa *Río Blanco Copper Corporation Limited* junto a Corona en el estado de Virginia. En abril de 1924,

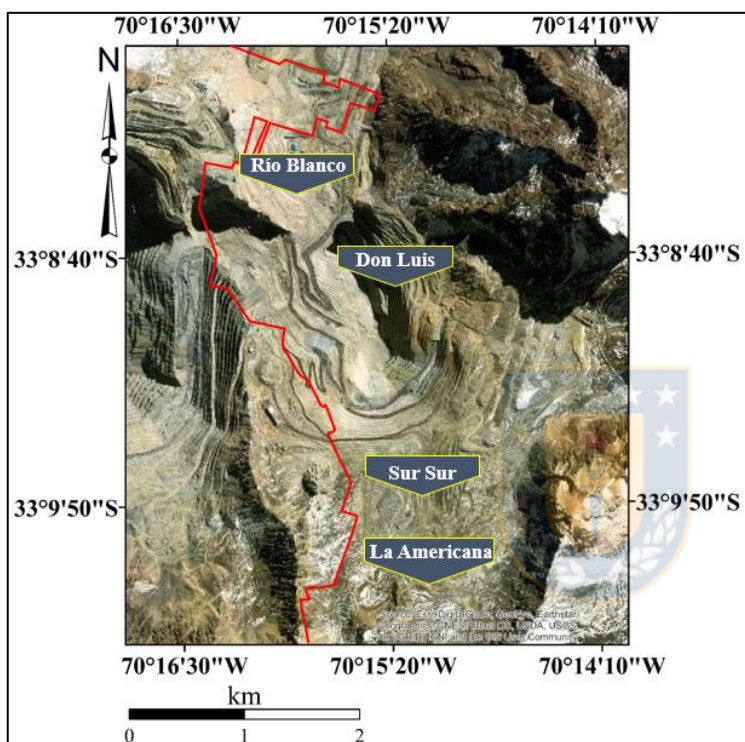
Corona llegó a Chile y compró todas las propiedades de Minera Aconcagua a nombre de la Compañía Minera Río Blanco Limitada. En los años venideros se hicieron prospecciones y estudios, sin llegar a desarrollar faenas propiamente extractivas, decidiendo guardar el proyecto como reserva futura.

En la década de 1950 la empresa estadounidense *Cerro Corporation* envió representantes a Chile con la idea de expandirse, dada su experiencia en faenas mineras a gran altura se interesaron en el yacimiento de Río Blanco. En 1955, tomaron una opción de compra sobre *Río Blanco Copper Corporation* con derechos para hacer exploraciones en la mina. Los datos recogidos fueron revisados detenidamente por profesionales y consultores en las oficinas de Nueva York, con los que tomaron la decisión final de comprar en 1956 las pertenencias mineras, incluyendo a La Americana. En 1960 constituyeron la subsidiaria Compañía Minera Andina S.A., cuyo objeto era realizar toda clase de actos relacionados directa e indirectamente con la industria minera y, en especial, los de reconocimiento, explotación de pertenencias y producción de minerales. Pero, en 1967 comenzó el proceso de Chilenización del cobre, mediante esta ley el país procedió a adquirir el 51% de las acciones de los grandes yacimientos cupríferos de la gran minería, que estaban operando en poder de empresas estadounidenses. Años más tarde, el gobierno propuso el Proyecto de Nacionalización del cobre, legislación que pretendía poner fin a la dependencia económica extranjera, de esta manera se tomó posesión inmediata de cada yacimiento sin ejercer su opción de compra. Por lo tanto, Río Blanco pasó a manos de Chile como sociedad colectiva del Estado con el nombre de Compañía Minera Andina a cargo de la empresa nacionalizada Compañía Minera Andina S.A.

Finalmente, el proyecto Río Blanco entró en operación en 1970, con la apertura de la mina subterránea. A comienzos de 1976, el gobierno impulsó la creación de la denominada Corporación Nacional del Cobre de Chile, CODELCO Chile, en el entendido de que ella continuaba ejerciendo los derechos adquiridos por el estado en la gran minería. La formación de CODELCO puso fin expresamente a las anteriores sociedades ordenando su disolución legal, así fue como Compañía Minera Andina se transformó en División Andina anexada a dicha corporación.

Anticipando al agotamiento del Primer Panel de la mina subterránea, la compañía solicitó un plan

de sondajes con el objetivo de asegurar la continuidad productiva del yacimiento, dicha campaña posibilitó el descubrimiento de la mina Sur Sur en 1980, localizada más arriba del valle del río Blanco y unos 2 km al sur del yacimiento subterráneo, el rajo comenzó operaciones en abril de 1983. Otros cuerpos mineralizados fueron descubiertos producto de la investigación emprendida para buscar nuevas reservas, lo que permitió que en 1987 entrara en producción un nuevo rajo, denominado Don Luis (Figura 1.2).



**Figura 1.2: Yacimiento Río Blanco - Los Bronces.** La línea roja indica el límite de la propiedad minera. Las ubicaciones de los desarrollos mineros en División Andina de CODELCO Chile se encuentran a la derecha de la línea y a la izquierda Los Bronces, propiedad de Anglo American.

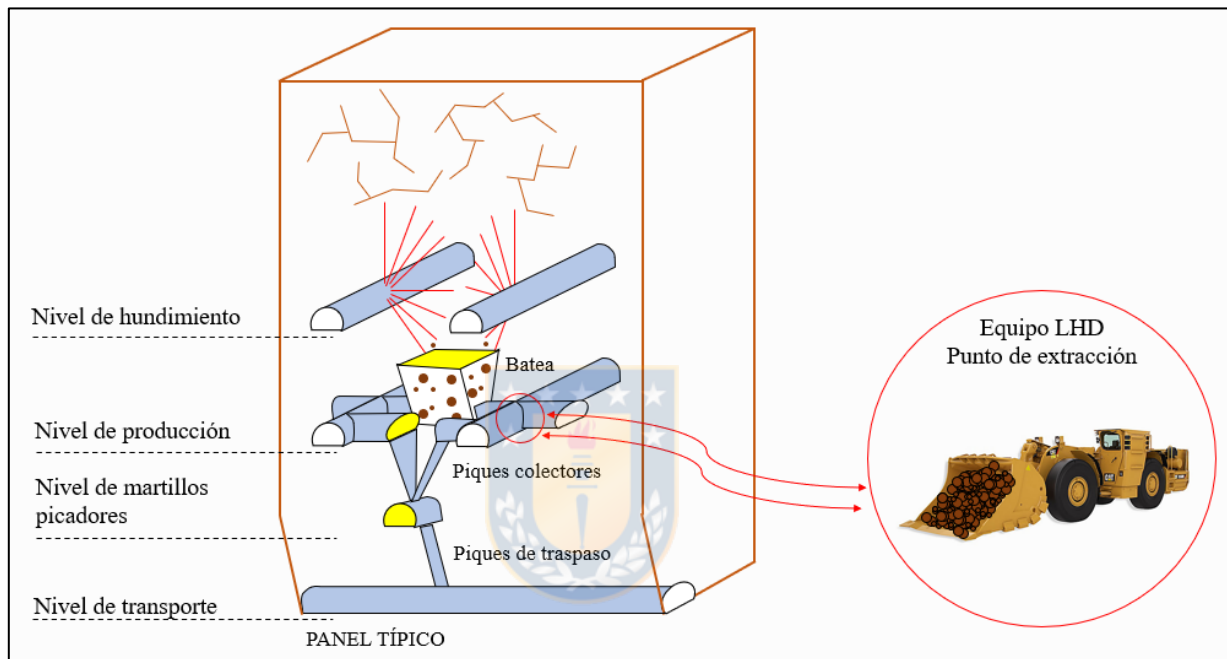
### 1.1.3. Métodos de extracción

Como se menciona anteriormente, en División Andina la extracción de mineral se realiza en una mina subterránea (Río Blanco) y un rajo abierto.

En la mina subterránea Río Blanco se utiliza el método de extracción Hundimiento por Paneles (*Panel Caving*, en la Figura 1.3), en su variante convencional y se desarrolla en tres niveles principales como explica Blanco, 2013.

En el más cercano a la superficie se induce el hundimiento de una columna mineralizada,

socavándola mediante la excavación de un corte basal, proceso que se realiza aplicando las técnicas convencionales de perforación y tronadura. El mineral derrumbado se extrae a través de zanjas recolectoras excavadas previamente, que conectan el nivel de hundimiento con el subyacente de producción, facilitando la extracción del mineral y generando nuevas condiciones de inestabilidad. El fenómeno continúa y el desplome o hundimiento de la columna se propaga sucesivamente hasta la superficie, donde se genera un cráter de subsidencia.



**Figura 1.3: Método de explotación de *Panel Caving*.** Se pueden identificar los niveles que forman parte de este método de extracción (modificado de Fuenzalida, 2010).

El nivel de producción, corresponde a un conjunto de galerías paralelas entre sí (al igual que el nivel de hundimiento) donde se realiza la extracción del mineral que es transportado por un equipo LHD (Carga, Transporte y Descarga; *Load, Haul and Dump*) que carga el mineral en puntos de extracción y lo lleva a puntos de vaciado ubicados en las calles de producción, donde se dirige al nivel de reducción para luego llegar al nivel de transporte, mediante piques de traspaso (labores verticales o inclinadas que conectan el nivel de producción con el de transporte). Desde el nivel de transporte se conduce el mineral a planta de chancado localizada en interior mina.

En el rajo Don Luis la extracción se ejecuta a cielo abierto (*open pit*) por bancos, y considera los procesos de perforación, tronadura, carguío y transporte (Rojas, 2009). Para separar el mineral se

construyen pozos de perforación. El número, ubicación y características de cada uno de estos se definen en una malla de perforación. Los pozos están ubicados a distancias regulares entre sí, y tienen el largo necesario para atravesar la altura del banco.

En el proceso de tronadura se carga con explosivos los pozos generados en la perforación, estos se detonan con encendido eléctrico y se activan mediante un control remoto, luego se establece una secuencia de detonación entre los distintos pozos de una tronadura, de manera que se fragmente el volumen de roca esperado y se dañe lo menos posible a las paredes circundantes.

Las etapas de carguío y transporte se realizan de forma conjunta, mediante palas el material tronado es cargado en camiones de gran capacidad, que lo transportan al lugar de destino correspondiente, dependiendo de la cantidad de mineral que posea la roca. La roca estéril se envía a botaderos, el material de baja ley a botaderos especiales y el mineral por sobre la ley de corte es derivado a piques de traspaso, donde es conducido gravitacionalmente a la planta de chancado, en donde se inicia el proceso de conminución a través de un sistema en línea, hasta llegar a la planta de tratamiento (ubicada al interior de la mina subterránea).

## 1.2. Clima

Luebert & Pliscoff (2012), mencionan que, en la Región de Valparaíso, la variación espacial de las temperaturas y precipitaciones se controla fundamentalmente por la elevación, la orientación respecto de la presencia de grandes cadenas montañosas y la distancia del mar.

En específico para la cuenca del río Aconcagua, Arauna & Miranda (2000), reconocen diversos climas. En la costa y el valle, el clima templado cálido. En algunos sectores de los cordones cordilleranos intermedios y de la cordillera de la Costa, el clima es de estepa. En la alta cordillera donde se ubica División Andina, predomina el clima de tundra por efectos de la altura, que se caracteriza por escasas precipitaciones, fuertes vientos, suelo pobre en nutrientes y escasa diversidad biológica.

### **1.3. Descripción del problema**

La minería a cielo abierto requiere de un monitoreo geotécnico constante, para evaluar la estabilidad de los taludes excavados, en función de resguardar la seguridad de los trabajadores y asegurar la sustentabilidad de los procesos productivos. En el primer caso, se procura que las personas puedan trabajar sin sufrir lesiones o accidentes fatales, producto de caídas o deslizamientos de rocas y desde el punto de vista de los procesos productivos, la estabilidad del macizo rocoso permite desarrollar todas las actividades asociadas a la extracción de mineral manteniendo la continuidad operacional.

Para el estudio de la estabilidad de taludes resulta fundamental comprender el comportamiento del macizo rocoso, que queda definido por las propiedades geomecánicas de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

Para caracterizar las inestabilidades que se producen por un efecto combinado entre estructuras y macizo rocoso, División Andina utiliza modelos de Redes de Fracturas Discretas o DFN por sus siglas en inglés (Ortiz, 2019), que simulan la arquitectura interna de la roca, con esta información se pueden realizar análisis predictivos de estabilidad a escala de bancos, talud global e interrampa. Para la construcción de los modelos Schulz (2019) recomienda mapear discontinuidades con un largo estructural  $\geq 5$  m, ya que son las que generan bloques inestables similares en geometría y volumen a los observados en los bancos, de estas fracturas se requiere conocer la orientación, longitud y frecuencia con que se distribuyen, información que se obtiene de un mapeo digital realizado sobre un levantamiento tridimensional tomado con un escáner láser, técnica que tiene por objetivo capturar información en sectores donde no se puede realizar un mapeo convencional de bancos por motivos de seguridad.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Construir y calibrar modelos DFN para identificar potenciales inestabilidades en el diseño de Fase



5 DS, rajo Don Luis.

#### 1.4.2. Objetivos específicos

1. Definir las zonas en que se realizan los modelos DFN, para lo cual se debe hacer una revisión de información estructural y litológica, considerando el diseño de la fase.
2. Determinar los parámetros de orientación, continuidad e intensidad de las estructuras mapeadas.
3. Optimizar la metodología de calibración de las simulaciones.
4. Construir y calibrar modelos DFN, evaluando los errores asociados al cálculo de los parámetros mapeados y modelados.
5. Evaluar los análisis de estabilidad de cuñas, utilizando la geometría de los bancos de diseño de la Fase 5 DS y producir modelos híbridos con las fallas explícitas mapeadas, para mejorar la precisión del análisis predictivo de las inestabilidades de la fase, comparando con las cuñas vistas en terreno, los bloques inestables generados.

#### 1.5. Trabajos anteriores

Los principales antecedentes bibliográficos relacionados a la geología regional del área de estudio corresponden a:

- Aguirre (1960) fue el primero en estudiar la estratigrafía, litología y estructura de la región andina de la provincia de Aconcagua. Luego de 20 años, Thiele (1980) sintetizó el conocimiento geológico existente de la cordillera de los Andes de la Región Metropolitana. Posteriormente, Moscoso *et al.* (1982) levantaron la geología de la parte sur de la provincia de Choapa y el sector oriental de las provincias de Petorca, San Felipe y Los Andes.
- Rivano (1996) estudió la geología entre los 32° y 33°S, desde costa al límite con Argentina y

Sellés & Gana (2001), la del área de Talagante - San Francisco de Mostazal.

Algunos de los estudios que contribuyeron al conocimiento geológico del yacimiento Río Blanco - Los Bronces, son los siguientes:

- López & Vergara (1982) analizaron datos geoquímicos relativos al distrito minero Río Blanco - Los Bronces, con el fin de alcanzar una mejor comprensión de la historia genética y evolutiva de los intrusivos asociados con la mineralización cuprífera de dicho yacimiento. Ese mismo año, Stambuk *et al.* (1982) definieron la geología del yacimiento Río Blanco, relacionando las mayores concentraciones de mineralización de cobre y molibdeno con rocas volcánicas y brechas del complejo Río Blanco.
- Vergara & Latorre (1984) caracterizaron el Complejo Volcánico de Río Blanco, de edad Plioceno. Realizaron levantamientos de detalle en superficie y en labores subterráneas, lo que permitió detallar la petrografía y petrología del complejo y sus mecanismos de emplazamiento.
- Skewes & Holmgren (1993) estudiaron el solevantamiento andino, erosión y emplazamiento de brechas mineralizadas en el depósito de cobre porfídico Los Bronces, aplicando geotermometría de inclusiones fluidas.
- Skewes *et al.* (2003) presentaron datos petrológicos de la Brecha Donoso del depósito Río Blanco - Los Bronces, con los que confirmaron el papel predominante de los fluidos magmáticos en la generación de brecha de turmalina rica en cobre.
- Frikken (2003) determinó la química, evolución y orígenes de los fluidos mineralizantes dentro del contexto de la arquitectura regional y el entorno geodinámico, y lo que implica esto para la génesis del mineral del sistema magmático - hidrotermal del yacimiento Río Blanco.
- En el año 2005, Davidson *et al.* describieron los precursores magmáticos de los fluidos hidrotermales en el depósito Río Blanco, Frikken *et al.* investigaron la zonificación mineralógica e isotópica dentro del complejo de brechas de turmalina del sector Sur - Sur



relacionadas con el pórfido y utilizaron dichos resultados para interpretar los procesos que causaron la deposición de mineral de alta ley, y Deckart *et al.* efectuaron dataciones radiométricas en el depósito Río Blanco - Los Bronces, para aclarar las relaciones temporales en el sistema porfídico de Cu - Mo.

- Irarrazaval *et al.* (2010) resumieron la historia de exploración del área de Los Bronces, enfocándose en las metodologías de exploración.
- Toro *et al.* (2012) recopilaron datos geológicos y geocronológicos para proporcionar una actualización del modelo evolutivo magmático - hidrotermal del distrito Río Blanco - Los Bronces.
- Skarmeta *et al.* (2017) generaron un modelo estructural del yacimiento Río Blanco, según ordenes jerárquicos y geocronológicos, evaluando la relación existente entre estructuras y las diferentes fases de magmatismo, mineralización y alteración (SGEOM, 2017).
- Solé *et al.* (2018) actualizaron el modelo geológico del yacimiento Río Blanco enfocados en los proyectos de minería a rajo abierto y subterráneo (SGEOM, 2018).

Los primeros estudios relacionados al modelamiento de DFN datan de la década de los 70' y se realizaron en el campo de la hidrogeología, con el objetivo de analizar propiedades de las aguas subterráneas. Desde entonces, los avances en esta materia han permitido simular de manera cada vez más precisa las redes de fractura de los macizos rocosos, lo cual ha posibilitado su aplicación en el área de la geotecnia. Alguno de los trabajos desarrollados a lo largo de dichos años, se describen a continuación:

- Castillo *et al.* (1972) determinaron propiedades hidráulicas asociadas con un flujo de filtración bidimensional no confinado, para un macizo rocoso con dos familias de fracturas.
- Warburton (1980) presentó un nuevo modelo estadístico para la distribución geométrica y espacial de las fracturas, incorporando la forma de las fracturas basado en paralelogramos.

- Long *et al.* (1982) analizaron la permeabilidad para un sistema bidimensional fracturado, utilizando las propiedades geométricas (forma, tamaño, orientación, ubicación) de las discontinuidades como variables aleatorias de un modelo con matriz impermeable.
- Long & Witherspoon (1985) examinaron cómo la interconexión entre las fracturas afectaba tanto la magnitud como la naturaleza de la permeabilidad.
- Dershowitz & Herda (1992) definieron medidas de intensidad de fracturamiento en una, dos y tres dimensiones, y las relaciones entre ellas.
- Elmo *et al.* (2014) desarrollaron modelos DFN a gran escala utilizando la orientación, tamaño e intensidad de fractura, concluyendo que los modelos podían usarse para mejorar la previsibilidad de las simulaciones geomecánicas y para definir parámetros de los macizos rocosos.
- Lei *et al.* (2015) crearon una metodología para escalar redes de fractura bidimensionales (2D), estimando propiedades hidromecánicas de sistemas de fractura natural de gran escala basándose en modelos de pequeña escala.
- Para CODELCO - DAND, Lizama (2015) estableció una metodología de mapeo estructural y realizó un análisis estadístico de los parámetros estructurales mapeados en el Túnel de Exploración, Nivel 17 y Shorter (2015) determinó las curvas granulométricas para el sector correspondiente al Túnel de Exploración Nivel 17, del proyecto Sur Sur Pionero, mediante el método de Redes de Fracturas Discretas. Posteriormente, Divasto (2018) generó la metodología para construir modelos DFN en minería a rajo abierto, para evaluar potenciales condiciones de riesgo en el diseño de taludes futuros y a nivel de bancos. Al año siguiente, Ortiz (2019) aplicó la metodología para la construcción de modelos DFN para la determinación de fragmentación *In situ* del yacimiento Río Blanco. El último estudio realizado por Schulz (2019) para esta División y relacionado a esta temática, consistió en construir modelos DFN a escala fase, para representar el arreglo estructural de las discontinuidades mayores e intermedias del rajo Don Luis, lo que permitió identificar los eventuales bloques favorables para la formación de

inestabilidades, su geometría, volumen aproximado y condición de estabilidad a escala banco, fase e interrampa.

## 1.6. Terminología y acrónimos

En el texto se utilizan continuamente abreviaciones asociadas a la temática en estudio, su significado queda expresado a continuación:

- CODELCO: Corporación Nacional del Cobre de Chile.
- D: *Dip* o buzamiento de un plano de interés.
- DD: *Dip Direction* o dirección de buzamiento de un plano de interés.
- DAND: División Andina.
- DFN: *Discrete Fracture Network* o Redes de Fractura Discreta. Los DFN son modelos geológicos estocásticos, que representan el orden interno de las fracturas en el espacio (Fox *et al.*, 2012).
- F5 DS: Fase 5 DS de mina rajo Don Luis.
- GRMD: Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Gerencia de CODELCO encargada de reunir la información para desarrollar los planes y dar dirección a la división en las metas productivas.
- P<sub>10</sub>, P<sub>21</sub>, P<sub>32</sub>: medidas de intensidad de fracturamiento lineal, areal y volumétrica definidas por Dershowitz & Herda (1992).
- SGEOL: Superintendencia de Geología, perteneciente a la GRMD.

- SGEOM: Superintendencia de Geomecánica, perteneciente a la GRMD.

Cabe destacar que en texto se utilizan puntos (.) como separador de miles y comas (,) para separar decimales (se encuentran redondeados), de acuerdo con las reglas del idioma. Además, los términos discontinuidad, estructura y fractura se emplean de manera indiferenciada.

## 1.7. Agradecimientos

A CODELCO, División Andina quisiera agradecer por darme la oportunidad de realizar mi Memoria de Título. En especial a mi tutor Fernando Ortiz por permitirme continuar la investigación del modelamiento de DFN, que viene desarrollando hace años. Mis agradecimientos a Alfredo Zárate, por su paciencia en terreno y apoyo constante, y a Alejandro Espinoza por sus revisiones metódicas. A los tres, gracias por sus correcciones e ideas para desarrollar este trabajo. A todos los miembros de la Superintendencia de Geomecánica mi gratitud, particularmente, a Claudio Montenegro que me enseñó el manejo del instrumental de trabajo una y otra vez, por sus conversaciones y buena disposición.

A los docentes y funcionarios del Departamento Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción, quisiera agradecerles por su aporte continuo a la formación de los estudiantes, su dedicación y cercanía. Aún más a los profesores Ramiro Bonilla, Abraham González y Luis Quinzio que se dedicaron a la revisión de este trabajo.

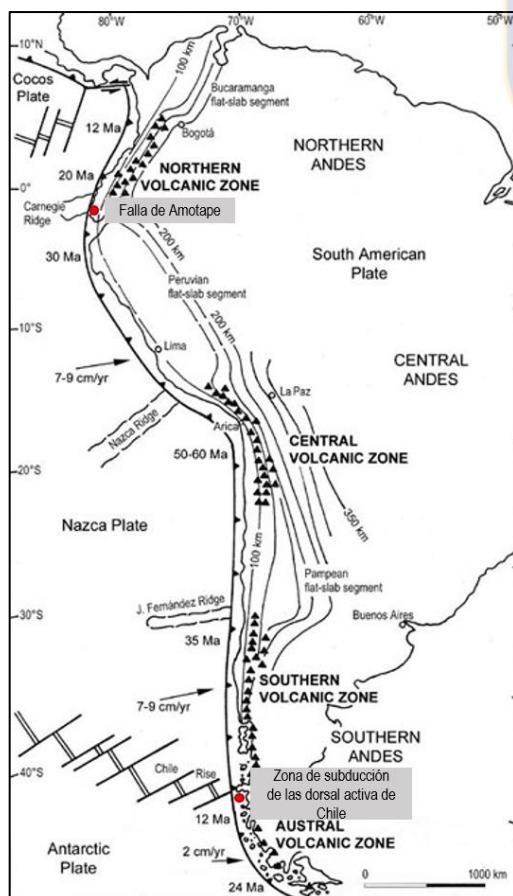
A mis amigos por hacer de los tiempos universitarios excelentes años, llenos de buenos recuerdos. Finalmente, agradezco a mi familia. A ustedes mi gratitud eterna por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1. Generalidades

La cordillera de los Andes recorre gran parte de Sudamérica paralela a la costa, debido a que se ha formado como consecuencia de la subducción de las placas oceánicas Nazca y Antártica bajo Sudamérica, siendo el principal proceso tectónico a lo largo del margen Andino desde el Jurásico.

El arco volcánico andino se dispone en cuatro segmentos (Figura 2.1) separados como Zona Volcánica Norte (ZVN), Zona Volcánica Central (ZVC), Zona Volcánica Sur (ZVS) y Zona Volcánica Austral (ZVA). Los cuatro segmentos con volcanismo activo ocurren en zonas donde el ángulo de subducción es relativamente inclinado, y entre ellos existen regiones donde el ángulo de subducción es relativamente plano a profundidades >100 km y el volcanismo está ausente (Stern, 2004).



**Figura 2.1:** Mapa esquemático de los cuatro segmentos volcánicamente activos de los Andes. Mapa modificado de Ramos & Alemán, 2000 en Stern, 2004, indica las profundidades en kilómetros de la Zona de Benioff, las dorsales oceánicas, edades de la placa oceánica cerca a la fosa chilena peruana, las tasas y direcciones de convergencia a lo largo de los Andes.

## 2.2. Geología Regional

Los Andes Centrales abarcan el margen sudamericano desde la falla de Amotape ( $3^{\circ}\text{S}$ ) hasta la zona de subducción de la dorsal activa de Chile ( $47^{\circ}\text{S}$ ), comprendiendo la Zona Volcánica Central y la Zona Volcánica Sur. El distrito Río Blanco - Los Bronces, se localiza en una zona de transición entre estos dos segmentos geológicos mayores del borde andino. Hacia el sur, a los  $33^{\circ}20'\text{S}$ , comienza la Zona Volcánica Sur asociada a la reaparición del volcanismo (Astaburuaga *et al.*, 2012). Mientras que, hacia el norte, entre los  $27^{\circ}\text{S}$  -  $33^{\circ}\text{S}$ , la subducción es de tipo *flat - slab*, donde el ángulo de manteo de la placa oceánica es  $<10^{\circ}$  entre los 100 y 150 km de profundidad. Al norte y al sur de este *gap* con ausencia de volcanismo, la inclinación del *slab* es cercana a  $30^{\circ}\text{E}$ , siendo el típico ejemplo de subducción tipo Chilena (Farías *et al.*, 2010).

Esta transición entre ambos dominios coincide con la zona en donde es subductada la Dorsal asísmica de Juan Fernández bajo el margen sudamericano (a los  $32,5^{\circ}\text{S}$ ). La subducción de dorsales está directamente relacionada con el establecimiento de regímenes de subducción plana, y a su vez en estos se producen las condiciones mecánicas y tectónicas apropiadas para la formación y emplazamiento de grandes depósitos de pórfidos de Cu - Mo (Stern & Skewes, 2005 en SGEOM, 2017).

### 2.2.1. Evolución geotectónica

La historia tectónica de los Andes centrales iniciada en el Jurásico ha estado marcada por una serie de fases extensionales y compresivas, en la cual el último evento extensional habría ocurrido en el Paleógeno al formarse una extensa cuenca subsidente de orientación aproximada norte - sur, que posteriormente, en el Mioceno inferior, fue invertida parcialmente (Charrier *et al.*, 2002 en Astaburuaga *et al.*, 2012). Esta cuenca se ha denominado Abanico, por estar compuesta por estratos volcánicos y volcanosedimentarios pertenecientes a la Formación Abanico (Eoceno superior - Mioceno inferior) expuesta en la parte occidental y central de la cordillera Principal y en la parte de la depresión Central (Astaburuaga *et al.*, 2012), extendiéndose entre los  $\sim 27^{\circ}$  y  $37^{\circ}\text{S}$ , continuando hacia el sur en la cuenca de Cura Mallín asociada con la formación homónima en territorio chileno (Quiroga *et al.*, 2015). Fock *et al.* (2006), presenta un modelo de la evolución

paleogeográfica para la inversión de la cuenca de Abanico:

#### 2.2.1.1. Eoceno medio

Edades de trazas de fisión en apatito obtenidas en rocas cretácicas del borde oriental de la cordillera de la Costa indican que las mismas sufrieron un proceso de exhumación hacia los 40 Ma. Esta última se interpreta como producto de la formación de una cuenca extensional hacia el este de la cordillera de la Costa, la denominada cuenca de Abanico (Figura 2.2).



**Figura 2.2:** Perfil paleogeográfico para el Eoceno medio entre los 33° y 34°S. Tomado de Fock *et al.* (2006).

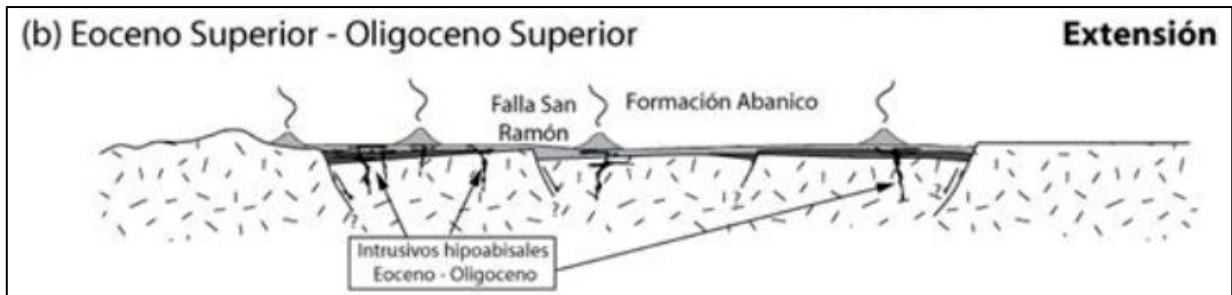
#### 2.2.1.2. Eoceno superior - Oligoceno superior

Asociado al movimiento de fallas normales de alto ángulo se observa en la cuenca de intra - arco una fuerte subsidencia y desarrollo de espacios que permiten albergar las sucesiones de la Fm. Abanico (Figura 2.3). Las fallas formadas estaban activas durante la depositación, como lo evidencian los estratos de crecimiento extensional contenidos en las intercalaciones sedimentarias (Charrier *et al.*, 2002 en SGEOM, 2017). La gran cantidad de intrusivos hipabisales muestran abundante actividad magmática para este periodo.

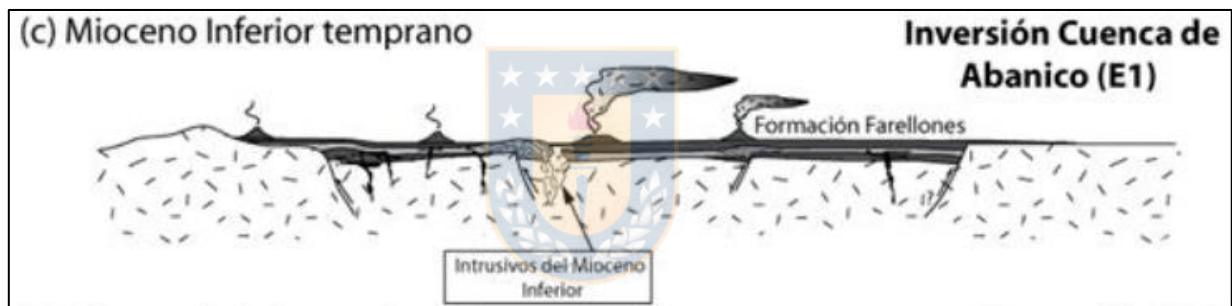
#### 2.2.1.3. Mioceno inferior temprano

Durante esta etapa se invierte la cuenca de Abanico. Este evento ha sido documentado con trazas de fisión en apatito, que indican una edad de exhumación de  $18,3 \pm 2,6$  Ma (Fock, 2005). En el borde oriental de la cuenca se forman fallas inversas de alto ángulo, asociadas a la inversión de las

fallas normales cenozoicas (que dieron origen a la cuenca) y mesozoicas (Charrier *et al.*, 2002 en Astaburuaga *et al.*, 2012). Sincrónico a la inversión de la cuenca se desarrollan los depósitos basales de la Formación Farellones (Figura 2.4). Intrusivos del Mioceno inferior emplazan en la parte central occidental de la antigua cuenca.



**Figura 2.3:** Perfil paleogeográfico para el Eoceno superior - Oligoceno superior entre los 33° y 34°S. Tomado de Fock *et al.* (2006).

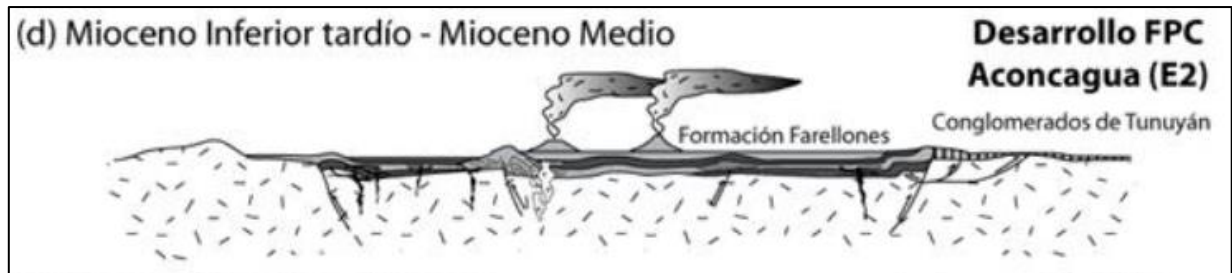


**Figura 2.4:** Perfil paleogeográfico para el Mioceno inferior temprano entre los 33° y 34°S. Tomado de Fock *et al.* (2006).

#### 2.2.1.4. Mioceno inferior tardío - Mioceno medio

Continuación de la inversión y migración de la deformación hacia el este, la que se concentra en el límite oriental de la cuenca. En este sector se obtuvieron edades de exhumación en apatito de  $13,3 \pm 3$  Ma (Fock, 2005). Durante la inversión, algunas de estas fallas se prolongaron hacia el este por el Yeso Principal generando las fajas corridas y plegadas de Aconcagua, La Ramada y Malargüe, en las que se produce el mayor acortamiento tectónico, hasta aproximadamente el Mioceno superior - Plioceno inferior (Giambiagi *et al.*, 2003 en Astaburuaga *et al.*, 2012). Se registra una migración del arco de Farellones hacia el este (Figura 2.5).

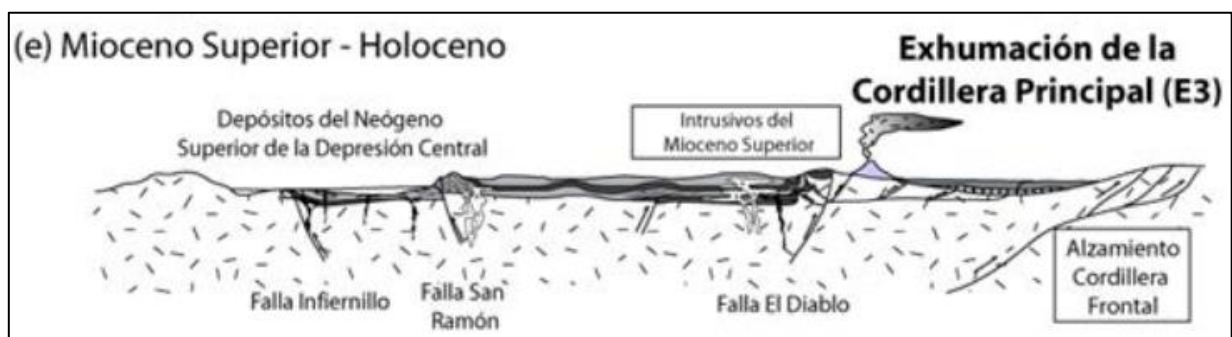




**Figura 2.5: Perfil paleogeográfico para el Mioceno inferior tardío - Mioceno medio entre los 33° y 34°S.**  
Tomado de Fock *et al.* (2006).

#### 2.2.1.5. Mioceno superior - Holoceno

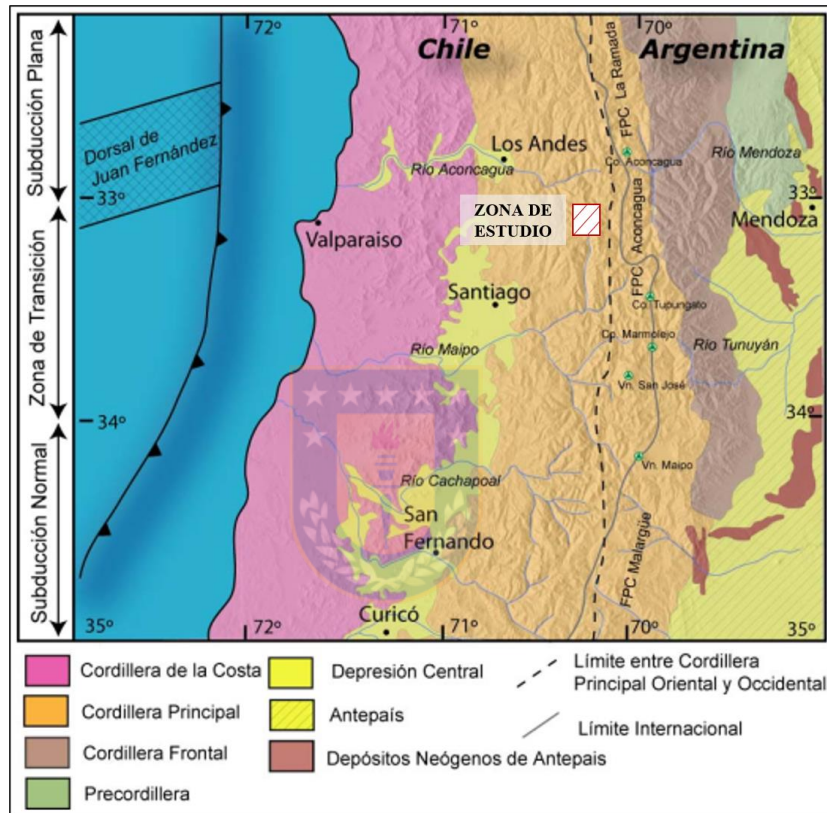
Se emplazan intrusivos durante el Mioceno superior (plutones de la Gloria y San Gabriel) ilustrados en la Figura 2.6, para este período la deformación se concentra principalmente en el límite oriental de la cuenca de Abanico en donde las edades de exhumación se encuentran entre  $11 \pm 3$  y  $5,2 \pm 0,8$  Ma (Fock, 2005). En el ámbito de la faja plegada y corrida del Aconcagua, se desarrollan reactivaciones de las fallas inversas, desarrollo de retrocorrimientos y fallas fuera de secuencia (Giambiagi *et al.*, 2003 en Fock *et al.*, 2006). Después de los eventos magmáticos de Mioceno superior, la actividad volcánica y magmática declina, pero algunos pulsos se desplazan al oeste, formando los depósitos de pórfidos cupríferos de El Teniente y Río Blanco - Los Bronces, este arco magmático estuvo activo entre los  $\sim 9$  y  $\sim 4$  Ma. Alrededor de los 4 Ma, el acortamiento migra hacia el este a la cuenca de antepaís y la cordillera chilena alcanza sus mayores elevaciones actuales, disminuyendo desde entonces drásticamente las tasas de alzamiento (Farías *et al.*, 2010).



**Figura 2.6: Perfil paleogeográfico para el Mioceno superior - Holoceno entre los 33° y 34°S.** Tomado de Fock *et al.* (2006).

### 2.2.2. Segmentación morfoestructural andina

Farías *et al.* (2010), menciona que la región andina entre los 32°S y 35°S comprende cinco unidades morfoestructurales mayores, de oeste a este son: cordillera de la Costa, depresión Central, cordillera Principal, cordillera Frontal (ausente al sur de los 34°15'S), y un antepaís activo. Las tres primeras ubicadas en Chile y se observan en la Figura 2.7.



**Figura 2.7: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35°S.** Tomado de Fock, 2005.

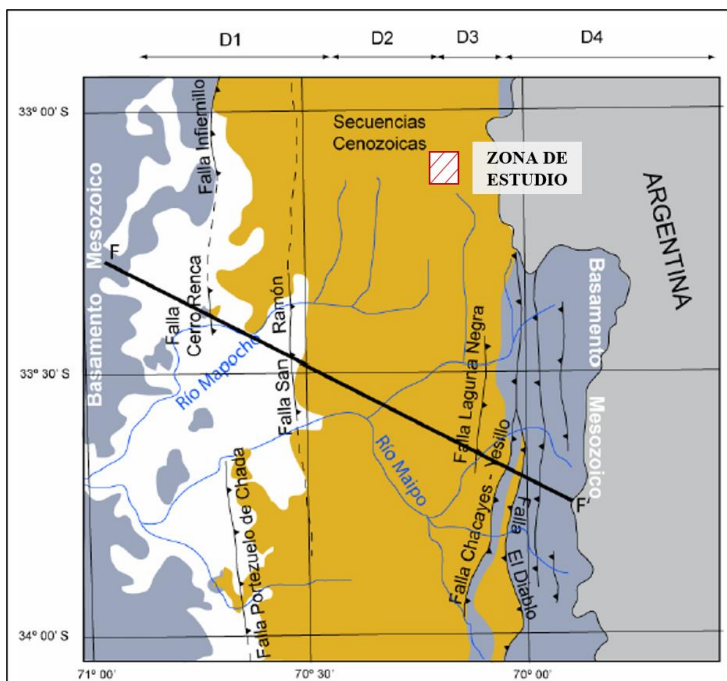
- Cordillera de la Costa: la forman cerros que rara vez sobrepasan los 2.000 m s.n.m. Puede ser dividida en dos flancos, uno occidental formado por un basamento del Paleozoico tardío - Triásico y un flanco oriental compuesto por secuencias volcánicas y sedimentarias mesozoicas, con manteo preferencia hacia el este. Estas series se extienden hasta el medio de la depresión Central (Thomas, 1958 en Farías *et al.*, 2010).
- Depresión Central: el relieve presenta pendientes suaves con elevaciones que van desde los 450

a 700 m s.n.m. Se compone por depósitos de grava, depósitos de ceniza volcánica y suelo fino, cuya edad, es probablemente Plioceno - Cuaternario (Vergara *et al.*, 2004 en Celedón, 2016). El basamento está constituido por unidades cretácicas dispuestas de forma similar a las unidades estratificadas de la cordillera de la Costa oriental, estas secuencias se ponen en contacto con rocas asignadas a los niveles basales de la Formación Abanico por medio de fallas inversas de vergencia oeste y por discordancias angulares (Farias, 2007 en Celedón, 2016).

- Cordillera Principal: la cordillera Principal es la unidad morfoestructural que presenta el mayor relieve en el sector, alcanzando alturas cercanas a los 6.570 m s.n.m. (Quiroga *et al.*, 2015). Ha sido dividida en dos grandes flancos, la cordillera Principal occidental (Chile), formada fundamentalmente por rocas cenozoicas de las formaciones Abanico y Farellones, y la cordillera Principal oriental (mayormente en Argentina) constituida por depósitos marinos de edad Jurásico - Cretácico, fuertemente plegados y fallados que conforman la faja plegada y corrida de Aconcagua (Ramos, 1996 en SGEOM, 2017).

### 2.2.3. Geología estructural

Fock (2005) describe cuatro dominios estructurales de importancia regional (Figura 2.8):



**Figura 2.8: Mapa geológico simplificado mostrando las principales fallas reconocidas regionalmente y los cuatro dominios estructurales. Tomado de Fock, 2005.**

- Dominio estructural I (D1): incluye al margen oriental de la cordillera de la Costa, la depresión Central y el límite occidental de la cordillera Principal de los Andes. Las principales estructuras reconocidas en este dominio corresponden a fallas de normales posteriormente invertidas, de vergencia oeste y pliegues apretados en su margen oriental. Entre los primeros, destacan las fallas San Ramón, Infiernillo y Portezuelo Chada.
- Dominio estructural II (D2): consiste principalmente en pliegues bastante abiertos, junto con el desarrollo de depósitos sintectónicos, ubicados en la parte central de la cordillera Principal occidental.
- Dominio estructural III (D3): se ubica en la parte oriental de la cordillera Principal occidental. Las estructuras afectan a la Formación Abanico principalmente, son anticlinales y sinclinales apretados de vergencia al este, asociados a retrocorrimientos de la falla más occidental (falla El Diablo) de la faja plegada y corrida del Aconcagua. Su límite oriental corresponde a la falla El Diablo.
- Dominio estructural IV (D4): afecta a las rocas mesozoicas de la cordillera Principal oriental, y corresponde al comienzo de la faja plegada y corrida del Aconcagua. Consiste principalmente en corrimientos de vergencia este, alguno fuera de secuencia, que afectan a estructuras desarrolladas previamente.

#### **2.2.4. Rocas estratificadas**

##### 2.2.4.1. Jurásico

###### A) Formación Río Colina (Caloviano ? - Oxfordiano)

Unidad definida por González (1963) en el valle del río Colina. Su base es desconocida y su techo corresponde al contacto concordante con la Formación Río Damas (Thiele, 1980).

Corresponde a un conjunto de sedimentitas clásticas marinas, fosilíferas, que se presentan en una

secuencia de calizas y lutitas calcáreas, lutitas fisibles finamente estratificadas, areniscas y conglomerados finos, intercalados con rocas volcánicas andesíticas. El conjunto muestra lentes de yeso interestratificados, que se observa también en forma de domos diapíricos que intruyen y cortan la serie (Thiele, 1980). En los valles del río Colina y del estero Azufre (al sur del volcán San José) la unidad aflora de manera regular, en ambos lugares se ha estimado un espesor visible no superior a 800 m.

Thiele (1980), menciona que la fauna recolectada, estudiada y clasificada por Tavera (1968), permite asignar a esta unidad una edad Caloviano ? - Oxfordiano. La Formación Río Colina se correlaciona en Chile central con el Miembro Santa Elena de la Formación Nacientes del Teno, con el miembro medio de la Formación Lagunillas y con el miembro superior de la Formación Valle Grande.

De acuerdo con González (1963) la Formación Río Colina se depositó en un ambiente marino, de facies regresivas.

#### B) Formación Río Damas (Kimmeridgiano)

Consiste en una secuencia definida en el valle del Río Damas, en la provincia de Colchagua por Klohn (1960). Su base es concordante con la Formación Río Colina y su techo con la Formación Lo Valdés.

Thiele (1980) revela que se trata de una sucesión de conglomerados y brechas conglomerádicas, gruesas a medianas, con intercalaciones potentes de areniscas y limonitas. Se intercalan también en la secuencia, abundantes niveles de rocas volcánicas andesíticas y se reconocen, pequeños lentes de yeso, sin importancia regional. El conjunto tiene una potencia aproximada de 3.000 m.

Por sus relaciones estratigráficas se estima con bastante exactitud su edad en Kimmeridgiano. Esta unidad se correlaciona con el miembro superior de la Formación Lagunillas y en Argentina la Formación Tordillo sería su equivalente (Thiele, 1980).

Los depósitos se habrían formados esencialmente en un ambiente terrestre, subaéreo y lacustre.

#### 2.2.4.2. Cretácico

##### A) Formación Lo Valdés (Titoniano - Hauteriviano)

Definida por González (1963) en el lugar homónimo en el valle del río Volcán. Thiele (1980) señala que su base es concordante con la Formación Río Damas y el techo lo es con la Formación Colimapu.

Se denomina Formación Lo Valdés a un conjunto constituido por tres miembros, el inferior y superior son principalmente calcáreos fosilíferos y el miembro medio se compone de sedimentos clásticos de facies rítmicas regresivas. La secuencia en general se representa por calizas y calcilutitas, que aparecen finamente laminadas. Lutitas y areniscas calcáreas, conglomerados y brechas. Se intercalan niveles de rocas volcánicas andesíticas. Hacia la parte superior de la unidad, existen pequeñas capas lenticulares de yeso interstratificadas. El espesor estimado para toda esta unidad es de 1.350 m, aproximadamente (Thiele, 1980).

Mediante datación fosilífera se determina que la Formación Río Valdés tiene una edad Titoniano - Hauteriviano (Tavera, 1967 en Thiele, 1980). Es posible correlacionar esta unidad, hacia el norte, con la Formación San José y hacia el sur, con la Formación Termas del Flaco. En Argentina, se identifica con el Grupo Mendoza.

Los miembros inferior y superior corresponden a sedimentos marinos de aguas someras. En cambio, el miembro medio señala más bien un ambiente costanero, lo que se evidencia por la depositación de lentes de evaporitas (yeso) y areniscas conglomerádicas de carácter regresivo (González, 1963).

##### B) Formación Lo Prado (Berriasiano - Hauteriviano)

La base de la Formación Lo Prado definida por Thomas (1958) al sur de la cuesta del mismo

nombre, no se expone en la Hoja Quillota y Portillo de Rivano (1996), y se dispone concordantemente bajo la Formación Veta Negra.

La conforman variadas litologías, consistentes principalmente en rocas sedimentarias, calcilitas negras fétidas fosilíferas, intercaladas con niveles macizos de calcarenitas grises, además aparecen niveles de brechas y/o conglomerados, con frecuentes intraclastos calcáreos. Existen intercalaciones de niveles volcánicos de andesitas que hacia la parte superior se encuentran alternadas con niveles de tobas de color rojizo. Esta secuencia tiene aproximadamente 1.500 m de espesor (Sellés & Gana, 2001).

Los hallazgos fosilíferos en las rocas de esta formación indican que tiene una edad Berriasiano - Hauteriviano (Tavera, 1952 en Sellés & Gana, 2001). Su desarrollo litológico permitió a Tidy (1970 en Nasi & Thiele, 1982) correlacionar unidades del cerro La Campana con la Formación Lo Prado.

Esta unidad marca el inicio de un periodo de actividad volcánica intensa, desarrollado en una cuenca ensiálica con un espesor atenuado que habría permitido el ascenso rápido de material del manto, denominada Cuenca Marginal Abortada (Mpodozis & Ramos, 1990 en Rivano, 1996), la secuencia se habría acumulado en un ambiente marino litoral, contemporáneo con actividad volcánica explosiva intermedia a ácida (Sellés & Gana, 2001). Por otra parte, la presencia en algunos niveles de restos vegetales (Covacevich, 1993 en Rivano, 1996) confirma un aporte terrígeno cercano.

### C) Formación Colimapu (Hauteriviano - Albiano)

Definida por Klohn (1960) en la quebrada homónima (afluente del río Maipo). Esta formación se superpone concordantemente y en transición paulatina a los estratos de la Formación Lo Valdés, e infrayace, concordantemente, a la Formación Abanico (González, 1963).

La serie contiene una secuencia de areniscas y lutitas rojas, conglomerados de matriz arenosa gris rojiza, lutitas rojas con niveles de rocas piroclásticas y algunas lavas andesíticas y calizas, en capas



lateralmente discontinuas. Su espesor alcanza los 2.000 m aproximadamente (Thiele, 1980).

Restos fósiles indican una edad mínima Albiano y de acuerdo con la edad asignada a la Formación Lo Valdés que la infrayace, su edad máxima sería Hauteriviano. La Formación Colimapu se puede correlacionar litológicamente con la Formación Cristo Redentor (Moscoso *et al.*, 1982).

Thiele (1980) indica que la unidad se habría depositado en un ambiente altamente oxidante, por tanto, el conjunto sedimentario tendría origen terrestre.

#### D) Formación Veta Negra (Barremiano - Albiano)

Esta formación, definida por Thomas (1958), ha sido reconocida solo al norte de la cuesta Barriga (Sellés & Gana, 2001). Se dispone concordantemente sobre la Formación Lo Prado, mientras que su contacto superior con la Formación Las Chilcas ha sido descrito como una discordancia angular (Sellés & Gana, 2001) y como concordante por Rivano (1996), quien también menciona que esta formación miente al este con 35° a 45° y reconoce en ella dos miembros:

- Miembro Purehue (inferior): constituido mayoritariamente por lavas andesíticas, frecuentemente brechosas y/o vesiculares de colores púrpuras a gris pardo, se presentan algunas intercalaciones sedimentarias de color rojo las que corresponden normalmente a areniscas, conglomerados y brechas (estas últimas en parte volcánicas). En general, las lavas están muy alteradas.
- Miembro Ocoa (superior): constituido casi exclusivamente por rocas andesíticas que se caracterizan por presentar una textura porfídica gruesa (ocoítas), estas rocas corresponderían probablemente a cuerpos hipabisales tipo filón manto los que intruirían a lavas andesíticas porfídicas más finas, las que se alternan con escasos niveles de rocas sedimentarias.

El espesor total de la formación ha sido estimado en unos 6.000 m (Piracés & Makshev, 1977 en Rivano, 1996), sin embargo, Rivano (1996), estima espesores entre 350 a 2.000 m para el Miembro Purehue, en tanto, el Miembro Ocoa alcanza potencias que varían entre 2.500 a 3.000m.



Se le asigna una edad Barremiano - Albiano, basada en sus relaciones estratigráficas con la Formación Lo Prado de edad Berriasiano - Hauteriviano e intruída en su parte superior por granitoides de edad Cenomaniano (Munizaga & Vicente, 1982 en Hasler, 2007). Rivano (1996), indica que las correlaciones más probables que se pueden establecer para la Formación Veta Negra son hacia el norte con la Formación Arqueros y una correlación parcial con la parte inferior de la Formación Pelambres.

Esta unidad es de origen volcánico subaéreo, en un ambiente continental. Las escasas intercalaciones sedimentarias y en donde la presencia de lutitas negras con restos de fósiles de vertebrados, ostrácodos y vegetales están sólo en la parte basal de la formación, indican el retiro del ambiente marino en ese momento, el cual habría desaparecido por colmatamiento a consecuencia del relleno de la Cuenca Marginal Abortada.

#### E) Formación Las Chilcas (Albiano - Campaniano)

La Formación Las Chilcas fue definida por Thomas (1958) en la localidad homónima. Esta unidad se encuentra en discordancia angular sobre la Formación Veta Negra y yace concordantemente bajo la Formación Lo Valle (Moscoso *et al.*, 1982).

Está constituida en un 95%, por brechas y conglomerados andesíticos gruesos, rojo - violáceos y andesitas porfídicas. Presenta, además, delgadas intercalaciones de limolita y areniscas calcáreas finas de color gris - verdoso. Los conglomerados presentan clastos, principalmente de andesitas porfídicas. Las intercalaciones finas corresponden a paquetes bien estratificados y lenticulares de areniscas y limos calcáreos. También se encuentran andesitas porfídicas y amigdaloidales. Toda la secuencia tendría una potencia de 7.000 m en la localidad tipo (Thomas, 1958 en Moscoso *et al.*, 1982) y forma una estructura sinclinal muy suave, de rumbo promedio N10°W a N15°W, con su ala oriental levemente más inclinada (25°) que el flanco occidental (10 - 12°) (Moscoso *et al.*, 1982).

Dataciones U/Pb en circones de niveles ígneos y sedimentarios de la Formación Las Chilcas permiten fijar su edad entre 105 y 82 Ma lo que correspondería al Albiano - Campaniano. Esta

secuencia constituye la prolongación natural de la Formación Quebrada Marquesa hacia el sur ( $31^{\circ}$  -  $32^{\circ}$ S). Hacia el este, la Formación Pelambres es su equivalente litológico.

Boyce (2015), resume el ambiente geotectónico en el que se deposita esta unidad, indicando que existe una cuenca compuesta principalmente por depósitos continentales de alta energía. Dicha cuenca se ve afectada por importantes eventos de subsidencia tectónica, que provocan el ingreso del mar. Además, menciona que los altos topográficos y el arco volcánico se encuentran probablemente hacia el oeste.

#### F) Formación Lo Valle (Maastrichtiano)

Definida por Thomas (1958), en la quebrada del estero Los Valles. Esta formación está en un contacto concordante y transicional sobre la Formación Las Chilcas. La zona de falla Chacabuco pone a la Formación Lo Valle en contacto con la Formación Abanico. El techo corresponde a la actual superficie de erosión (Moscoso *et al.*, 1982).

Está constituida principalmente por ignimbritas que forman vistosas cornisas de espesor variable, entre 5 y 50 m. Las tobas son menos frecuentes y tienen composición dacítica (Moscoso *et al.*, 1982). Nasi & Thiele (1982), reconocen en su área de estudio al sur del río Maipo, entre Melipilla y la laguna de Aculeo una sección basal de conglomerados y areniscas, sobre la cual se apoyan lavas andesíticas a riolíticas, ignimbritas y brechas, con intercalaciones de tufitas y areniscas. Gana & Wall (1997), reconocen potencias de aproximadamente 3.500 m para esta formación.

El volcanismo y sedimentación del Maastrichtiano, representado por la Formación Lo Valle, tuvo lugar entre los 72 - 71 Ma. Además, Gana & Wall (1997), detectan un hiatus entre las formaciones Lo Valle y Abanico, de al menos 37 Ma, que involucrara parte del Cretácico Superior (Maastrichtiano) y el Eoceno. Esta unidad se puede correlacionar cronológicamente, con la parte inferior de la Formación Abanico (Moscoso *et al.*, 1982).

La Formación Lo Valle se habría depositado en un ambiente continental, como producto de una actividad volcánica ácida, tipo nube ardiente.

### 2.2.4.3. Paleógeno - Neógeno

#### A) Formación Abanico (Eoceno superior - Mioceno)

Esta unidad fue definida por Aguirre (1960) en la provincia de Aconcagua. Posteriormente, Thiele (1980) menciona que su base es concordante con la Formación Colimapu y su techo se encuentra en discordancia angular con la Formación Farellones, mientras que Moscoso *et al.* (1982) indica que la unidad toma contacto con las formaciones Las Chilcas y Lo Valle, por medio de la zona de falla Chacabuco, añadiendo que las rocas de la Formación Abanico se disponen en dos franjas norte - sur separadas por afloramientos de la Formación Farellones, que la cubren en discordancia angular, sin embargo, en muchos lugares la discordancia se expresa como una pseudo - concordancia.

Su litología corresponde a lavas andesíticas, porfídicas y brechas, tobas andesíticas, con intercalaciones de areniscas, tufitas y niveles ocasionales de ignimbritas ácidas y lavas riolíticas. Entre el Juncal y Río Blanco, se puede observar una serie de filones - manto, diques y lacolitos, de longitud y espesores métricos, que corresponden, generalmente, a andesitas porfídicas y que intruyen a las rocas de esta unidad (Moscoso *et al.*, 1982). El espesor del conjunto se estima en 3.000 m, aunque se acepta que éste pudiese estar sobreestimado por numerosas intrusiones interstratificadas de filones - manto y de lacolitos andesíticos (Thiele, 1980).

Sobre la base de estudios de fauna fósil y a diversas dataciones se le asigna una edad Eoceno superior - Mioceno (Sellés, 1999 en Fock, 2005). La Formación Abanico se correlaciona en el norte de Chile con la Formación Baños del Toro, en el área central con la Formación Coya - Machalí y en Argentina es correlacionable con el Grupo Neuquén (Thiele, 1980).

Kay & Kurtz (1995 en Fock, 2005) afirman que la Formación Abanico se acumuló en una cuenca suavemente extensional, conclusión que posteriormente es ratificada por Jordan *et al.* (2001 en Fock, 2005), autores que sugirieron que la extensión y formación de cuencas estaría controlada por un incremento en la tasa de convergencia que ocurre entre los 28 y 26 Ma.

## B) Formación Farellones (Mioceno)

La Formación Farellones fue definida por Klohn (1960) en el área homónima (Rivano, 1996). Su límite inferior está marcado por la discordancia angular que la separa de la Formación Abanico (Thiele, 1980) y su techo corresponde a la actual superficie de erosión (Rivano, 1996).

Litológicamente corresponde a tobas soldadas dacíticas, potentes coladas de andesitas basálticas y menores cantidades de brechas volcánicas andesíticas y sedimentitas clásticas finas. Las ignimbritas que afloran en la base de esta unidad ocurren en bancos individuales de 1 a 5 m de potencia, con un espesor total promedio de 120 m (Moscoso *et al.*, 1982). El espesor de la unidad es de 2.500 m, aunque este aparece aumentado con los numerosos mantos intrusivos y lacolitos que se intercalan en la secuencia (Thiele, 1980).

Fock (2005), asigna una edad Mioceno a la Fm. Farellones, de acuerdo con dataciones radiométricas de K/Ar y Ar/Ar. Moscoso *et al.* (1982) indican que es posible hacer una equivalencia litológica y cronológica parcial con la Formación Campanario.

La presencia importante de tobas soldadas y lavas, con estructuras “aa” sugieren, en gran parte, que los estratos volcanígenos de la Fm. Farellones se habrían depositado en un ambiente continental subaéreo (Moscoso *et al.*, 1982).

### 2.2.4.4. Cuaternario

#### A) Unidad Volcánica Antigua (Pleistoceno)

Thiele & Katsui (1969) la definen como los esqueletos de volcanes extinguidos, formados principalmente de coladas andesíticas y traquiandesíticas. Estas coladas se distribuyen en una superficie importante del área fronteriza, constituyendo parte de altas cumbres, como el volcán Tupungato (6.550 m s.n.m), cerro Marmolejo (6.150 m s.n.m) y cordón del cerro Castillo (5.485 m s.n.m). El zócalo de estos esqueletos lo constituyen los terrenos paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos, tectónicamente imbricados. La unidad no se ve afectada, en superficie, por fallas de

importancia regional y aparece sellando todas las estructuras de pliegues y fallas de finales del Mioceno (fallas que caracterizan a la región). Thiele (1980), le asigna una edad Pleistoceno.

B) Ignimbrita Pudahuel (Pleistoceno medio - Pleistoceno Superior)

Definida por Polanski (1962), corresponde a un depósito asociado al Complejo Volcánico Maipo perteneciente a la Zona Volcánica Sur de la cordillera de los Andes. Su génesis se asocia a la formación de la caldera Diamante y se infiere que se trata de una erupción de gran volumen. Pineda *et al.* (2015) propone que el evento eruptivo que origina esta ignimbrita ocurre entre los 100 y 150 mil años.

C) Unidad Volcánica Nueva (Holoceno)

Se designa con este nombre a los volcanes que presentan manifestaciones históricas de actividad definidos por Thiele & Katsui (1969). Actualmente, se reconocen en ellos emanaciones y se sobreponen a la Unidad Volcánica Antigua. Están formados por coladas andesíticas frescas, con intercalaciones de mantos de brechas y piroclásticos menores (bombas, lapilla, cenizas). Dentro de ellos destacan el volcán Tupungatito (5.640 m s.n.m) y el volcán San José (5.880 m s.n.m) edificados sobre el volcán Tupungato y cerro Marmolejo, respectivamente. Thiele (1980), menciona que las coladas no aparecen afectadas por fallas menores como las reconocidas en la Unidad Volcánica Antigua, asignándole a esta unidad una edad holocena.

D) Depósitos no consolidados

Thiele (1980), reconoce distintos tipos de depósitos, detallados a continuación:

- Depósitos gravitacionales: los más importantes son aquellos productos de la reptación del suelo y talud, que producen acumulaciones detríticas importantes en la base de las pendientes suaves (suelo) y en las pendientes fuertes (talud).
- Depósitos glaciares: ubicados en las cabeceras de los esteros por sobre la cota 2.500 m s.n.m, se

encuentran rellenos por depósitos glaciares. Corresponden esencialmente a morrenas marginales y acumulaciones de detritos provenientes de glaciares de roca, se ubican en circos o nichos de las altas cumbres.

- Depósitos fluviales, fluvioglaciares y aluviales: los más destacados corresponden a los asociados con el relleno de la depresión Central. Los otros depósitos importantes los constituyen aquellos que rellenan todos los valles interiores de la región levantada. Sobresalen entre estos últimos aquellos que forman los importantes niveles de terrazas en el valle del río Maipo.
- Depósitos lacustres: poseen reducidas dimensiones, se acumulan en lagos formados detrás de algunas morrenas frontales o de depósitos producidos por desmoronamientos en los ríos Colina, Colorado, Maipo y Yeso. Esencialmente, se trata de depósitos de limos y arcillas, finamente laminados.

## 2.2.5. Rocas intrusivas



### 2.2.5.1. Cretácico Inferior

Los intrusivos afloran en el borde oriental de la cordillera de la Costa. Corresponden a plutones y stocks cuya litología principal son dioritas, granodioritas y tonalitas, que intruyen a las formaciones Lo Prado y Veta Negra. Dentro de esta unidad se incluyen la Diorita del Portezuelo Los Aromos, Plutón Cordón del Mallarauco (117 - 91 Ma), Diorita Puntilla del Viento (114 - 111 Ma) (Sellés & Gana, 2001) y el Plutón Cerro bandera (~120 Ma) (Wall *et al.*, 1999 en Fock, 2005).

### 2.2.5.2. Cretácico Superior

Se dividen en dos grupos:

- Plutones y stocks monzodioríticos, granodioríticos, dioríticos y tonalíticos, los que llegan a ocupar áreas de hasta 100 km<sup>2</sup>.

- Intrusivos hipabisales, de composición variable (básica a ácida), ocupan áreas desde los 500 m<sup>2</sup> hasta los 3 km<sup>2</sup>.

Intruyen a las formaciones Las Chilcas y Veta Negra. Diversas dataciones radiométricas permiten asignarles una edad Albiano superior - Turoniano inferior (Wall *et al.*, 1999 en Fock, 2005).

#### 2.2.5.3. Eoceno superior - Mioceno inferior

Estos intrusivos hipabisales se agrupan en stocks, filones mantos, cuellos volcánicos y diques, cuya composición varía desde gabros a andesitas de piroxeno, formando cuerpos de tamaño inferior a 8 km<sup>2</sup>. Intruyen a las formaciones Las Chilcas, Lo Valle y Abanico. Dataciones radiométricas permiten asignarle una edad Eoceno superior - Mioceno inferior. Su edad y geoquímica son similares a las lavas de la Formación Abanico, siendo posible que correspondan a sus conductos alimentadores (Wall *et al.*, 1999 en Fock, 2005).



#### 2.2.5.4. Mioceno

El régimen contraccional imperante durante el Mioceno inferior fue propicio para la acumulación de magmas y la formación de cuerpos plutónicos que localmente coalecieron hasta generar extensos batolitos. En el distrito Río Blanco - Los Bronces, la actividad plutónica se representa por los batolitos Río Blanco - San Francisco y Río Colorado. Las edades K/Ar y U/Pb disponibles señalan que el plutonismo fue continuo a lo largo del Mioceno inferior y medio, cercanamente sincrónico con el volcanismo de la Formación Farellones (Deckart *et al.*, 2010 en SGEOL, 2018).

El volcanismo y plutonismo del Mioceno fue atravesado por pórfidos subvolcánicos y cuerpos de brechas hidrotermales de edad Mioceno superior - Plioceno inferior, que se encuentran genética y espacialmente relacionadas con la formación del complejo de pórfidos de Cu - Mo de Río Blanco - Los Bronces, y con la historia de alzamiento y denudación sincrónica del que fue objeto (SGEOL, 2018).



#### 2.2.5.5. Mioceno superior - Plioceno

Los pórfidos andesíticos del Mioceno superior - Plioceno incluyen a los intrusivos Colina y Los Lunes, cuya litología corresponde a tonalitas y pórfidos dacíticos de biotita respectivamente (Baeza, 1999 en Fock, 2005).

Las unidades antes mencionadas se ilustran en el mapa de la geología regional de la Figura 2.9.

### 2.3. Geología del yacimiento Río Blanco

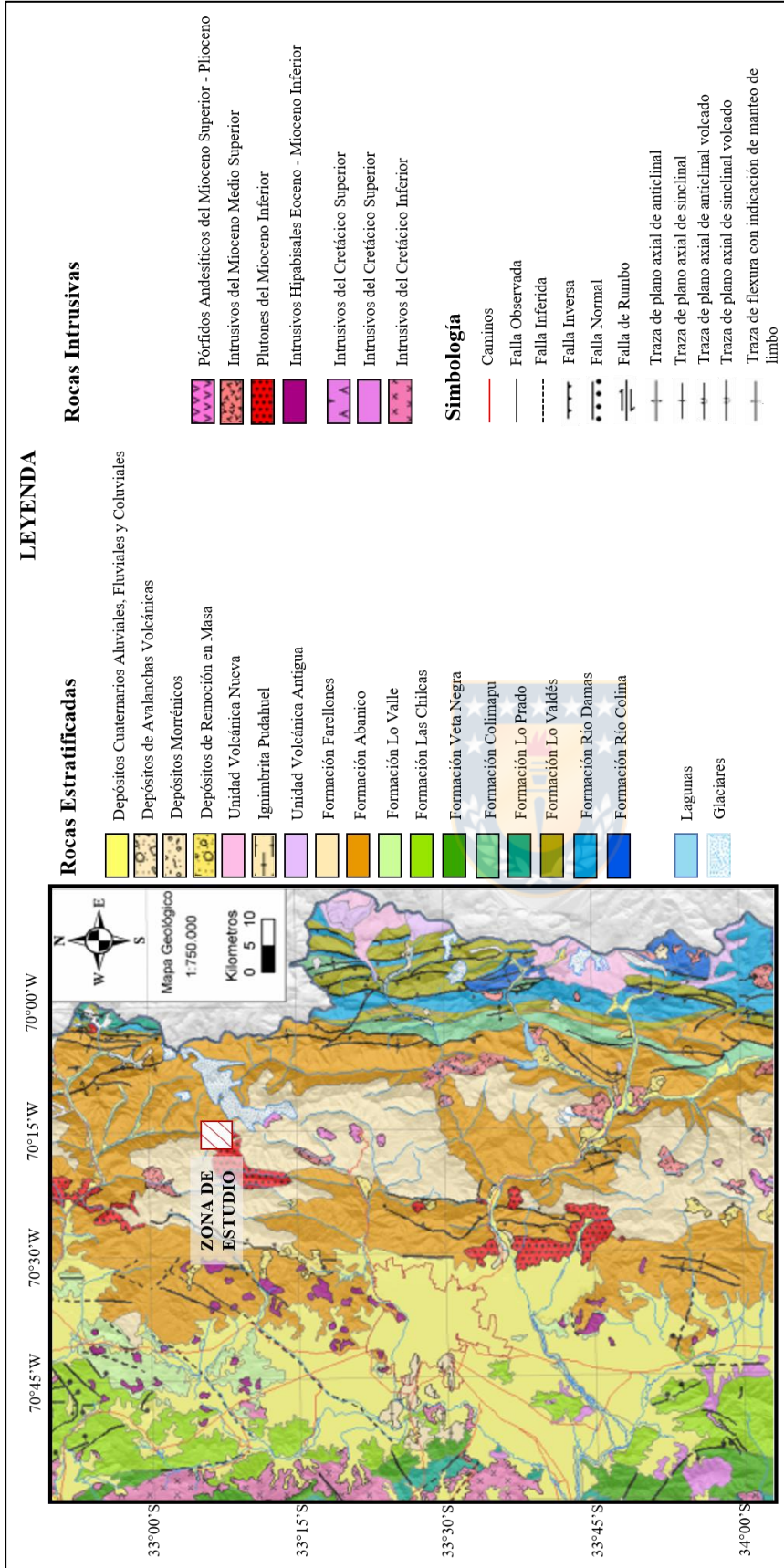
#### 2.3.1. Franja metalogénica

La convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana permite la generación de magmas que dan origen a conjuntos de yacimientos asociados con una determinada edad geológica y que son agrupados en franjas metalogénicas.

El depósito Río Blanco - Los Bronces se encuentra hospedado dentro de la franja metalogénica del Mioceno superior - Plioceno temprano, ubicada en los Andes centrales entre los 32° y 34°S. Corresponde a la franja más oriental y a su vez a la más joven. Presenta pórfidos de Cu - Mo de clase mundial, como lo son El Teniente y Los Pelambres, características que lo convierten en el segundo cinturón metalogénico más importante del país, después de la franja Eoceno tardío - Oligoceno temprano.

#### 2.3.2. Unidades litológicas

En río Blanco se reconocen diversas litologías ígneas, que varían desde volcánicas, intrusivas porfídicas, brechas y chimeneas. El modelamiento realizado por la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (SGEOL, 2018) contempla 32 unidades litológicas distribuidas en el yacimiento.



**Figura 2.9: Mapa de la Geología Regional. Modificado de Fock (2005).**

### A) Andesitas (AND)

Las rocas de composición andesítica son las más antiguas, de acuerdo a Deckart *et al.* (2005), que analizan la cronología de los eventos magmáticos e hidrotermales de este pórfido cuprífero, datando mediante U/Pb en circón las rocas de esta unidad, en el sector río Blanco obtiene una edad de  $17,20 \pm 0,05$  Ma y en el sector Don Luis  $16,77 \pm 0,25$  Ma, mientras que Wettke & Bertens (2008 en Hermosilla, 2015), utilizando la misma técnica determinan que la edad de estas rocas en el sector Sur - Sur es de  $17,24 \pm 0,20$  Ma, lo que permite correlacionar a esta unidad con el miembro intermedio lávico de la Formación Farellones (Piquer, 2010 en Hermosilla, 2015). Las andesitas se distribuyen hacia el norte y sur del yacimiento, presentan escasos fenocristales de plagioclasa, y texturas que varían desde porfídicas a afaníticas, además de un color gris oscuro a negro. Estas rocas de caja se observan en forma de *roof pendant* intruidas por granitoides y pórfidos. Bajo la cota 3.188 m s.n.m., se encuentran comúnmente xenolitos volcánicos recristalizados, registro del proceso de asimilación magmática por el que pasaron las andesitas. El ambiente volcánico se encuentra cortado por el ambiente intrusivo que está conformado por las unidades Granodiorita Río Blanco, Granodiorita Cascada y Diorita, que a nivel distrital corresponden a facies del Batolito Río Blanco - San Francisco (SGEOL, 2018).

### B) Granodiorita Río Blanco (GDRB)

Esta unidad intruye en contacto irregular a las andesitas, en la parte norte del yacimiento, generando localmente *hornfels* de biotita. Su composición varía desde granodiorita a tonalita, presentando textura fanerítica, de grano medio a grueso, color blanquecino y tonalidades rosadas. Deckart *et al.* (2005), les asigna una edad de  $11,96 \pm 0,40$  Ma.

Cuerpos de brechas tempranas se encuentran emplazados en el ambiente volcánico e intrusivo principalmente, distribuidos a lo largo de todo el yacimiento de disposición subvertical y elongados preferencialmente en sentido NW - SE en el sector río Blanco y N - S en los sectores Don Luis y Sur - Sur, encontrándose truncadas en el borde occidental por la unidad subvolcánica de Pórfido Don Luis, corresponden a Brecha de Granodiorita Río Blanco (BXGDRB), Brecha de Anhidrita (BXANH), Brecha de Biotita (BXB), Brecha de Turmalina (BXT), Brecha de Polvo de Roca

Temprana (BXPR) y Brecha de sílice - Feldespato Potásico (BXSK).

#### C) Granodiorita Cascada (GDCC)

Hermosilla (2015) menciona que hacia el sur domina esta unidad, la cual se encuentra intruyendo a la Granodiorita Río Blanco. Corresponde a una roca de textura fanerítica de grano medio, aunque localmente puede presentar variaciones con mucha diferencia de tamaño, otorgándole un aspecto porfídico a la roca. Su composición varía desde granodiorita, tonalita hasta monzodiorita con tonos que van de gris claro a rosa pálido. Deckart *et al.* (2005) determina que la edad radiométrica U/Pb de esta unidad es  $8,40 \pm 0,23$  Ma.

#### D) Aplitas (APL)

Localmente en el sector de Río Blanco, se han reconocido intrusivos menores de aspecto aplítico, con textura hipidiomórfica inequigranular de grano fino y color rosado claro (Hermosilla, 2015).

#### E) Diorita (DIOR)

Se distribuye principalmente en el sector oriental del yacimiento, donde se interdigita con la Granodiorita Cascada en forma de cuerpos tabulares subverticales de potencias cercanas a 60 m. En general, esta unidad comprende rocas faneríticas de textura hipidiomórfica de grano fino a medio. Composicionalmente varía de diorita a cuarzo - diorita y posee tonos verde oscuros a negro dada la abundancia de minerales máficos (Hermosilla, 2015). Se estima que la edad U/Pb de esta unidad es  $8,16 \pm 0,45$  Ma (Deckart *et al.*, 2005), traslapándose en el error con la edad obtenida para la GDCC.

Estos ambientes previamente descritos corresponden a la roca caja del yacimiento, la cual se encuentra intruída por unidades subvolcánicas de pórfidos (SGEOL, 2018).

#### F) Pórfido Cuarzo - Monzonítico (PQM)

Se reconoce esta unidad hacia el norte del yacimiento, sus rocas tienen una composición general dacítica, con textura porfídica. Hermosilla (2015), distingue un primer evento denominado Pórfido Cuarzo - Monzonítico temprano (PQM<sub>e</sub>) de edad U/Pb entre los 7,30 a 6,50 Ma (obtenido con una microsonda iónica de alta sensibilidad y resolución, SHRIMP), distribuido como diques discretos, orientados N27°W. Posteriormente, el segundo evento del pórfido denominado Pórfido Cuarzo - Monzonítico mineralizado (PQM<sub>m</sub>), puesto que se cree que este intrusivo habría gatillado una parte significativa de la mineralización en los sectores Río Blanco y Don Luis, contiene xenolitos de brecha con matriz de turmalina y biotita y posee una edad obtenida en U/Pb entre los 6,07 y 5,72 Ma (utilizando un método de abrasión química combinado con una ionización termal de espectrometría de masas, CA - TIMS) y forma un cuerpo masivo subvertical en profundidad (bajo los 3.188 m s.n.m.).

#### G) Brecha de Turmalina (BXT)

Hermosilla (2015), la define como una brecha altamente mineralizada, comúnmente monomítica, con clastos mayoritariamente de andesitas y/o granitoides y/o dioritas y en menor medida pórfidos dacíticos correspondientes a PQM<sub>e</sub>. La matriz corresponde a un agregado hidrotermal de grano fino a medio de turmalina acicular o radial, con cristales prismáticos y ocasionalmente biotita, lo que les otorga a estas rocas tonos negros a grises oscuros. Esta brecha es considerada temprana en el sistema, puesto que se encuentra cortada por sistemas de vetillas tempranas.

Se distribuye en la parte central del sector Don Luis y se manifiesta como un cuerpo homogéneo prácticamente vertical con orientación preferencial NW - SE con potencias de alrededor de 300 m y extensión vertical reconocida de 600 m. Hacia el sector norte y oeste se encuentra interrumpida por la intrusión del Pórfido Don Luis. El límite oriental de la brecha está marcado por el decrecimiento en la intensidad de la brechización, que se expresa en rocas craqueladas por turmalina (disminución del volumen de matriz), denominadas BT, mientras que sus raíces no se reconocen, puesto que bajo la cota 3.188 m s.n.m. domina la Brecha de Polvo de Roca, cuya formación cortó sistemáticamente a la Brecha de Turmalina (Hermosilla, 2015).

Su edad ha sido estimada mediante la datación Re/Os realizada en una molibdenita encontrada en una vetilla tipo B que corta a BXT en el sector Sur - Sur, obteniendo una edad  $5,52 \pm 0,03$  Ma, la que es considerada como la edad mínima para esta unidad, sumado a la presencia en estas rocas de clastos del Pórfido Cuarzo - Monzonítico temprano, se restringe la edad de la Brecha de Turmalina entre los 6,50 y 5,52 Ma (Hermosilla, 2015).

En el sector Sur - Sur, la BXT engrana en continuidad estructural a los 3.035 m s.n.m., con la Brecha de Biotita, que la subyace y corresponde al mismo cuerpo de brecha cuya composición de la matriz varía con la profundidad.

#### H) Brecha de Biotita (BxB)

Brecha cuyo componente principal de la matriz es biotita y polvo de roca. Comúnmente contiene fragmentos de granodiorita y andesitas, en menor proporción pórfidos de composición dacítica y rocas de textura aplítica.

#### I) Brecha de Matriz Cuarzo - Feldespato Potásico (BXSK)

Brecha polimíctica, destacando la presencia de clastos de granitoides, rocas con texturas aplíticas, pórfidos dacíticos, menos comunes son las brechas de turmalina. La BXSK corresponde a un evento posterior a PQM<sub>m</sub>, es decir, a los 6,10 Ma y anterior a los 4,90 Ma que es la edad mínima de cristalización de PDL<sub>ss</sub>.

#### J) Pórfido Feldespático (PFELD)

En el sector Don Luis se emplaza una red de diques de Pórfido Feldespático de orientación NW - SE y NNE - SSW, exhiben una textura porfídica de composición dacítica, fundamentalmente los fenocristales corresponden a plagioclasa, escaso cuarzo, feldespato potásico y biotita, mientras que la masa fundamental consiste en un agregado de cuarzo - feldespato. La edad de los diques del PFELD ha sido acotada de 5,90 a 5,60 Ma mediante dataciones U/Pb en circón (CA - TIMS y SHRIMP).

### K) Brecha de Polvo de Roca (BXPR)

Brechas cuya matriz corresponde a un agregado clástico fino comúnmente menor a 3 mm, el que corresponde a fragmentos de cuarzo, plagioclasa, feldespatos potásicos y minerales máficos, todos relacionados a la composición de las rocas de caja, dado que este material proviene de la trituración de la roca afectada por el fenómeno de brechización. Puede ser polimíctica o monomíctica, pudiendo presentar clastos de litologías variadas como granitoides, pórfidos dacíticos, andesitas, y brechas de turmalina, entre otros. Se caracteriza por una textura fragmental y localmente la matriz exhibe texturas fluidales, es por lo que comúnmente se ha caracterizado a esta unidad como una brecha magmática (Cuadra *et al.*, 2005 en Hermosilla, 2015), entendiendo que la naturaleza dominante de la matriz comprende composicionalmente los mismos elementos que los fragmentos granodioríticos.

Se distribuye inmediatamente bajo el cuerpo de brechas de turmalina en la porción central del sector Don Luis, bajo la cota 3.188 m s.n.m., en forma de una red de cuerpos subverticales de potencias que varían desde algunos metros a decenas de metros. Comúnmente los cuerpos poseen potencias del orden de 10 m y han sido reconocidos en la vertical por aproximadamente 700 m.

Agrupado en la unidad BXPR se han identificado brechas de matriz de biotita, que se distribuye preferencialmente bajo la cota 2.500 m s.n.m. y comprende pequeños cuerpos subverticales relacionados a los canales de polvo de roca que han sido recrystalizados por biotita, los cuales se relacionan localmente a diques de pórfidos dacíticos.

Su naturaleza clástica no permite datarla directamente, sin embargo, dadas sus relaciones de temporalidad con el Pórfido Don Luis quien la corta, la edad de las BXPR puede acotarse a una edad mínima de  $5,23 \pm 0,07$  Ma a  $5,02 \pm 0,13$  Ma.

### L) Pórfido Don Luis (PDL)

Unidad subvolcánica de gran extensión volumétrica, emplazada en el sector centro occidental del yacimiento. Se observa con una orientación N - S a NW - SE y se caracteriza por tener una



morfología tipo cono invertido (domo) de disposición subvertical, siendo de mayor volumen en su parte superior y más estrecho en profundidad, la potencia reconocida en la parte media es de aproximadamente 500 m y en profundidad se observa hasta la cota 2.500 m s.n.m., por tanto, tiene una extensión mínima en la vertical de 1.500 m s.n.m.

Las rocas son porfídicas de composición general dacítica y textura pseudofragmental. La masa fundamental consiste en un agregado cristalino extremadamente fino comúnmente inferior a 0,03 mm formando un intercrecimiento muy fino de cuarzo y feldespato potásico, con ocasional biotita.

En el sector Don Luis se emplaza el pórfido tardío (PDL<sub>SS</sub>) que interrumpe la continuidad de los cuerpos de brechas de turmalina y de la mineralización, y comprende edades entre 5,48 a 4,89 Ma, lo que incluye la edad registrada anteriormente por Deckart *et al.* (2005), para este pórfido, donde obtuvo una edad de  $5,23 \pm 0,07$  Ma. También se encuentra una red de diques, pertenecientes a facies feldespáticas del PDL (PDL<sub>PFELD</sub>), de edad entre 5,6 a 5,3 Ma (CA - TIMS). Los mapeos de detalle han permitido observar indistintas relaciones de corte entre las facies PDL y PDL<sub>PFELD</sub> permitiendo superponer eventos sincrónicos de emplazamiento de estas unidades.

Cuerpos de brechas tardías se reconocen en los sectores Don Luis y Sur - Sur, estas son emplazadas en ambientes volcánicos, intrusivos, brechas tempranas y pórfidos, y corresponden a las unidades menores de Brecha de Pórfido (BXP) y Brecha de Molibdeno (BXMO), cuerpos mayores de Brecha Monolito (BXMN), Brecha de Polvo de Roca Tardía (BXPR), Brecha Tobácea (BXTO\_PDL) y Brecha de Turmalina Tobácea (BXTTO\_PDL), elongadas en sentido NW - SE y N - S. Sin embargo, en el sector de Río Blanco, se reconoce una unidad de Brecha Tobácea (BXTO\_PCN) y Brecha de Turmalina Tobácea (BXTTO\_PCN) de facies tardías, restringida al emplazamiento del Pórfido Cerro Negro (PCN).

#### M) Brecha de Anhidrita - Hematita (BXANH - BXHEM)

Esta brecha se forma a partir de un craquelamiento de la roca de caja, principalmente granodioritas y localmente rocas porfídicas tardías (Chimenea Dacítica), cuya formación deja espacios abiertos y en ellos se da lugar al relleno de materiales posteriores como minerales hidrotermales,



típicamente se forma de un agregado cristalino grueso de anhidrita, yeso y/o carbonatos intercrecidos con cuarzo y/o hematita prismática.

#### N) Brecha de Pórfido (BXP)

Unidad menor con escasa distribución volumétrica, perteneciente a PDL. Corresponde a una brecha de contacto, con cantidades variables de roca de caja como xenolitos. Se ubica bajo la cota 3.188 m s.n.m.

#### Ñ) Pórfido Cerro Negro (PCN)

De acuerdo con nuevos sondajes exploratorios profundos realizados en el sector norte, es posible reconocer una dacita subvolcánica de 4,57 Ma. Emplazada en profundidad y en los bordes de la unidad fragmental riolítica, elongado en sentido N - S y de disposición vertical.

#### O) Brecha de Molibdenita (BXMO)

Brecha de Polvo de Roca, que cuando contiene molibdenita se denomina BXMO. Edad Re/Os 4,2 Ma (Hermosilla, 2015).

#### P) Brecha Monolito (BXMN)

Se distribuye en el flanco oeste del sector Sur - Sur, limitando al norte y al oeste del Pórfido Don Luis, forma un cuerpo de 840 m de largo, con anchos reconocidos de hasta 300 m. Tiene matriz de polvo de roca con sericita o biotita y/o clorita, abundancia de fragmentos de composición andesítica y de rocas subvolcánicas porfídicas, brecha de turmalina, pórfido y rocas intrusivas, características que le confieren un tono a pardo a negro.

#### Q) Brecha Tobácea (BXT0)

Corresponde a una zonación vertical que gradúa hacia superficie del cuerpo Brecha Monolito.

### R) Brecha de Turmalina Tobácea (BXTTO)

Consiste en una brecha tardía, volumétricamente más representativa que corta al PDL, posee clastos del pórfido PDL<sub>SS</sub> y granitoides, reconociéndose en menor medida clastos de brecha de turmalina, andesitas y rocas volcanoclásticas. La matriz se compone fundamentalmente de polvo de roca y turmalina. Se identifica hasta profundidades cercanas a la cota 3.188 m s.n.m., siempre en el ámbito del PDL y principalmente en el contacto entre el pórfido y las brechas de turmalina temprana. Se distribuye desde una superficie en forma de cono invertido por aproximadamente 300 m, la cual decrece rápidamente en profundidad. Este evento de brechización es posterior a todas las unidades descritas anteriormente, pero hasta la fecha no ha podido ser datada.

Las unidades de BXTO y BXTTO se separaron de acuerdo con el ambiente geológico donde se distribuyen, es decir, las reconocidas hacia el norte fueron asignadas al ambiente del Pórfido Cerro Negro (BXTO\_PCN y BXTTO\_PCN) y las distribuidas en la parte central fueron asignadas al ambiente del Pórfido Don Luis (BXTO\_PDL y BXTTO\_PDL) (SGEOL, 2018).

El conjunto de las unidades anteriores está intruido por el complejo subvolcánico La Copa, que está constituido por tobas de facies cristalinas y líticas, correspondientes a la Chimenea Riolítica y Chimenea Dacítica.

### S) Chimenea Dacítica (CHDAC)

Es una roca de textura porfídica, de carácter piroclástica y localmente fragmental que se distribuye hacia el sur del sector Río Blanco con forma de cono invertido y paredes con ángulos de 60° a 70° desde superficie, la potencia promedio de 200 m (cota 3.188 m s.n.m.), tiende a adelgazarse en profundidad, mientras que su dimensión en la vertical supera los 1.000 m. La CHDAC desarrolla una brecha de contacto, definida como Brecha de Chimenea Dacítica (BXCHDAC). El rango de edad de esta unidad ha sido obtenido mediante U/Pb en circón entre 5,00 y 4,70 Ma (Bertens, 2010 en Hermosilla, 2015) la cual es concordante con la edad de la Chimenea Riolítica.

Existe una estrecha relación con la edad del Pórfido Don Luis, permitiendo indicar una posible

relación comagmática entre la CHDAC y PDL.

#### T) Chimenea Riolítica (CHRIOL)

Posee una textura porfídica, con una masa afanítica de composición riolítica con fenocristales de cuarzo y escasa biotita (pórfido riolítico), se distribuye en planta como un anillo semicircular con un diámetro de 1 km aproximadamente. Esta unidad profundiza hacia el norte, alcanzando alrededor de 1.000 m en la vertical, se presume que en esta dirección estaría el ducto principal de alimentación. La CHRIOL en la parte central presenta una unidad de Toba de Ceniza (TBCEN) de menor competencia geomecánica. Esta unidad también posee una fase piroclástica de textura fragmental (BXCHRIOL), principalmente relacionada a los bordes de la chimenea, corresponde a una brecha de contacto con matriz de ceniza lítica y vítrea con fragmentos de intrusivos granodioríticos, dacíticos, andesíticos y volcánicos indiferenciados, de tamaños variables que pueden alcanzar decenas de bloques de decenas de metros. El rango de emplazamiento de la CHRIOL en el sector Río Blanco, sería de 4,92 a 4,26 Ma (Bertens, 2010 en Hermosilla, 2015), lo cual refleja la última actividad magmática registrada.

Finalmente, todos los ambientes geológicos descritos, se encuentran cubiertos depósitos de material no consolidado, representado por la unidad de Sobrecarga (SOB) y Morrenas (MORR), el cual corresponde al último y más joven de los ambientes geológicos presentes.

Las unidades litológicas mencionadas se visualizan en la Figura 2.10.

### 2.3.3. Alteración y mineralización

#### 2.3.3.1. Alteración de fondo

Se reconoce como *background* a una amplia biotitización de las rocas, relacionada a vetillas y guías de biotita, una asociación biotita - clorita en sectores muy restringidos y externamente en los sondeos de borde la asociación clorita - epidota. Todas estas asociaciones de alteración preservan la textura original de la roca y acompañan las primeras manifestaciones de mineralización en las

rocas de caja (granodioritas y andesitas).

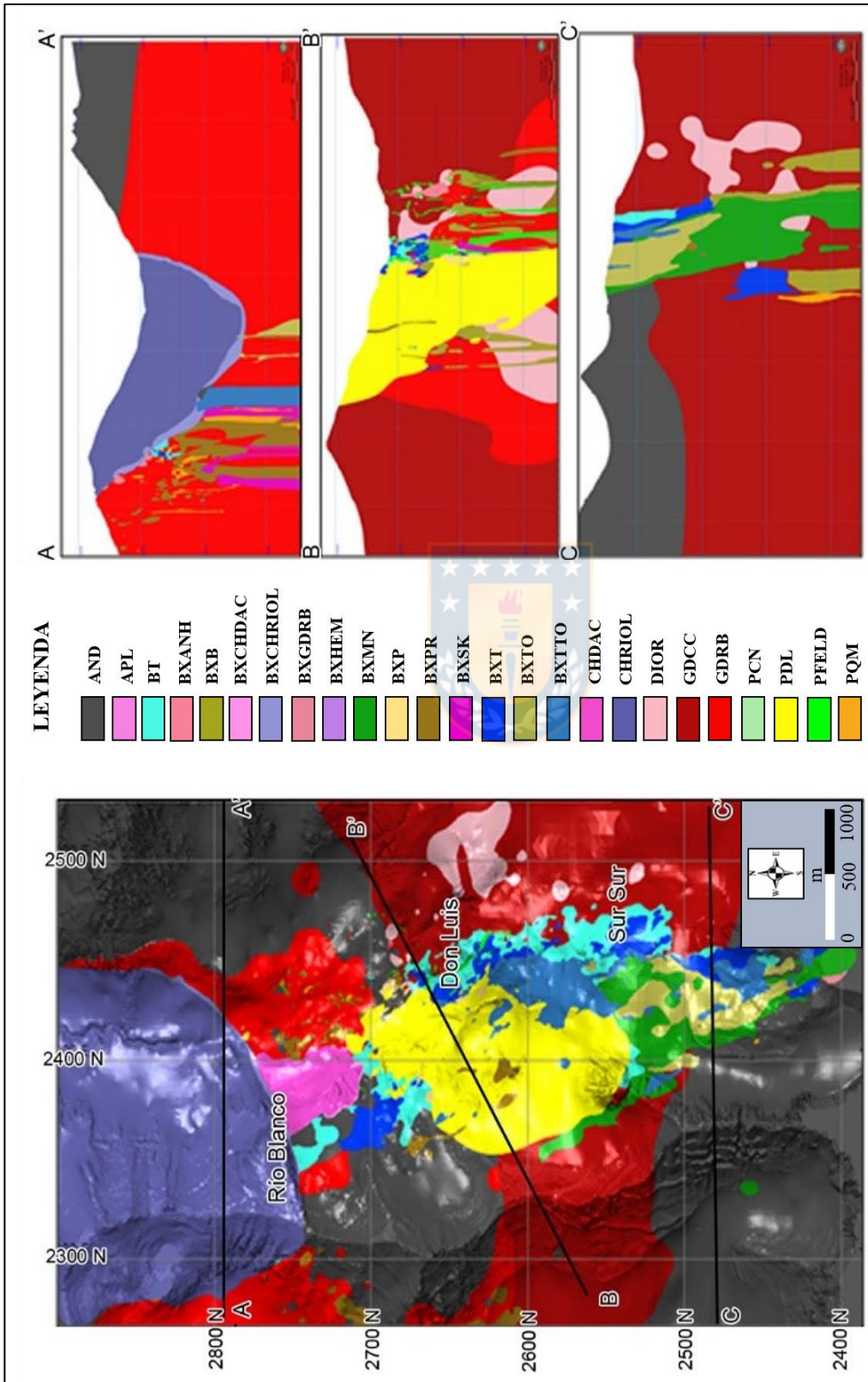


Figura 2.10: Modelo implícito tridimensional de las unidades litológicas del yacimiento Río Blanco. Tomado de SGEOL (2018).

### 2.3.3.2. Alteraciones tardimagmáticas

Comprende el desarrollo de biotita, feldespato potásico y sericita, estrechamente ligada al emplazamiento de pórfidos, manifestada en halos de vetillas tempranas tipo A y EBT, recristalización de brechas preexistentes o invadiendo la textura primaria de la roca. La mineralización desarrollada en estas asociaciones corresponde a calcopirita y menores proporciones de bornita y molibdenita.

### 2.3.3.3. Alteraciones hidrotermales tempranas

Posterior a la alteración tardimagmáticas, se manifiesta sobreimpuesta una asociación de alteraciones hidrotermales tempranas, cuyo componente principal es el desarrollo de sericita gris verde, manifestada como halo de vetillas tipo C, bien desarrolladas, afectando a clastos de brechas y reemplazando en forma masiva a la mineralogía primaria de las rocas, principalmente desarrollada en brechas de Turmalina, Polvo de Roca y en la porción media de los pórfidos. Este evento de alteración, sin lugar a duda se reconoce como uno de los principales controladores de la mineralización, con el desarrollo de especies mineralógicas de calcopirita - bornita y calcopirita - pirita respectivamente en granodioritas, pórfidos y brechas tempranas.

### 2.3.3.4. Alteración hidrotermal tardía

Se observa un evento de alteración hidrotermal tardía, caracterizado por la presencia de cuarzo - sericita tardía, manifestada principalmente en halos de vetillas tipo D y E, obliterando selectivamente la textura de la roca, con el desarrollo de pirita - calcopirita, pirita - sulfosales de cobre (tennantita - enargita).

### 2.3.3.5. Alteración sericítica - argílica tardía

El último evento corresponde a una alteración sericítica - argílica tardía, que afecta a las unidades subvolcánicas fragmentales con el desarrollo de pirita dominante (Solé *et al.* 2014 en SGEOL, 2018).

### 2.3.4. Geología estructural

En el Modelo Estructural de Andina (SGEOM, 2017) las fallas del yacimiento se categorizan según los siguientes órdenes estructurales, jerarquizados de acuerdo con su continuidad y espesor mapeado:

- Fallas de Orden 0: tienen una orientación preferente NE - SW en los sectores Don Luis y Sur - Sur, y ENE - WSW a E - W en el sector Río Blanco, presentan continuidad a escala distrital.
- Fallas de Orden 1: tienen una orientación preferencial NW - SE y E - W en Río Blanco, NW - SE y NE - SW en Don Luis y NE - SW en Sur - Sur. Con continuidades mayores a 500 m y espesores mayores a 10 cm.
- Fallas de Orden 2: poseen las mismas orientaciones preferenciales que las fallas de Orden 1 y sus continuidades son menores a 400 m, con espesores entre 5 y 10 cm.
- Fallas de Orden 3: sin dirección preferencial definida y siempre están contenidas entre estructuras de orden superior, con continuidades menores a 200 m.

La geocronología indica la existencia de un primer sistema que permite el emplazamiento de las granodioritas Río Blanco y Cascada, con orientaciones preferenciales N - S a NNW - SSE. Este sistema actualmente se encuentra sellado. El segundo sistema de dirección NE - SW, se forma aproximadamente entre los 14 Ma a 8 Ma, dentro de las rocas de caja, estas estructuras se reactivan en etapas tardías. Le sigue el sistema NW - SE, que queda contenido dentro del NE - SW, que tiene un importante componente de dilatación, mayor densidad de estructuras que el sistema NE - SW en el sector Río Blanco y es paralelo a la mineralización, por lo que, a pesar de estar formado por estructuras de menor longitud y potencia, es el sistema preferencial para albergar la mineralización en dicho sector y se forma alrededor de los 8 Ma y hasta los 5,50 Ma. El último sistema con orientación ENE - WSW a E - W se desarrolla desde los 5 Ma hasta al menos los 4 Ma, debido a que corta al Pórfido Don Luis y a las unidades de Chimenea Riolítica y Chimenea Dacítica.

Las fallas NW - SE tienen desplazamientos preferentemente sinestrales, actúan como barrera de propagación de otras estructuras y comúnmente son truncadas por el sistema NE - SW, que presenta desplazamientos mayoritariamente dextrales. A su vez, el sistema NE - SW es cortado por estructuras de orientación E - W, cuyos desplazamientos observados son tanto dextrales como sinestrales.

Además, SGEOM (2017) menciona, que las fallas de mayor continuidad comúnmente se forman por la coalescencia de varios segmentos anastomosados y/o con puentes de roca intermedios, en ocasiones unidos por estructuras de tipo lazo sigmoide, en echelon y terminaciones en forma de cola de caballo. Dichas morfologías indican que en las estructuras más continuas el desplazamiento es menor y han estado expuestas a deformación donde el cizalle es considerablemente menor que la dilatación y al craquelamiento interno de las estructuras de menor continuidad, situación que se ve reflejada en relaciones de corte con desplazamientos centimétricos entre estructuras.

Las superficies de falla son normalmente subverticales, no planares y sinuosas. Si bien la tendencia general es subvertical, la variabilidad del manteo conforma superficies onduladas.

Cabe destacar, que la expresión morfológica en una misma estructura puede ser extremadamente contrastante según ésta se desarrolle en dominio de roca primaria o secundaria. Las estructuras presentes en roca secundaria, independiente de su categoría estructural, tienen espesores significativamente mayores que sus equivalentes en roca primaria.

### **2.3.5. Ambientes geotécnicos**

Ortiz (2018 en SGEOL, 2018) menciona que la diferencia en la calidad geotécnica del macizo rocoso en la vertical es contrastante, y se produce como resultado de la interacción de la roca con aguas meteóricas, formando un Ambiente Primario y un Ambiente Secundario, cuyo límite es claro y definido, sin que exista una zona de transición.

Las rocas del Ambiente Primario están bajo el nivel freático, al no encontrarse afectadas por agentes atmosféricos de meteorización, estas rocas presentan alta calidad geotécnica, lo que se

traduce en baja cantidad de fracturas, las cuales además poseen sellos de yeso y/o anhidrita, por tanto, corresponde a una unidad impermeable.

El Ambiente Secundario es de menor calidad geotécnica, mayor cantidad de fracturas, las que se encuentran abiertas y con rellenos parciales de limonitas.

Además, se define un tercer ambiente de Chimenea, formado por las unidades más jóvenes del yacimiento (Chimenea Dacítica, Chimenea Riolítica y Brecha de Chimenea). En términos generales este ambiente es impermeable y con baja frecuencia de fracturas. En la Figura 2.11, se puede observar un cuadro resumen de la geología del yacimiento Río Blanco.





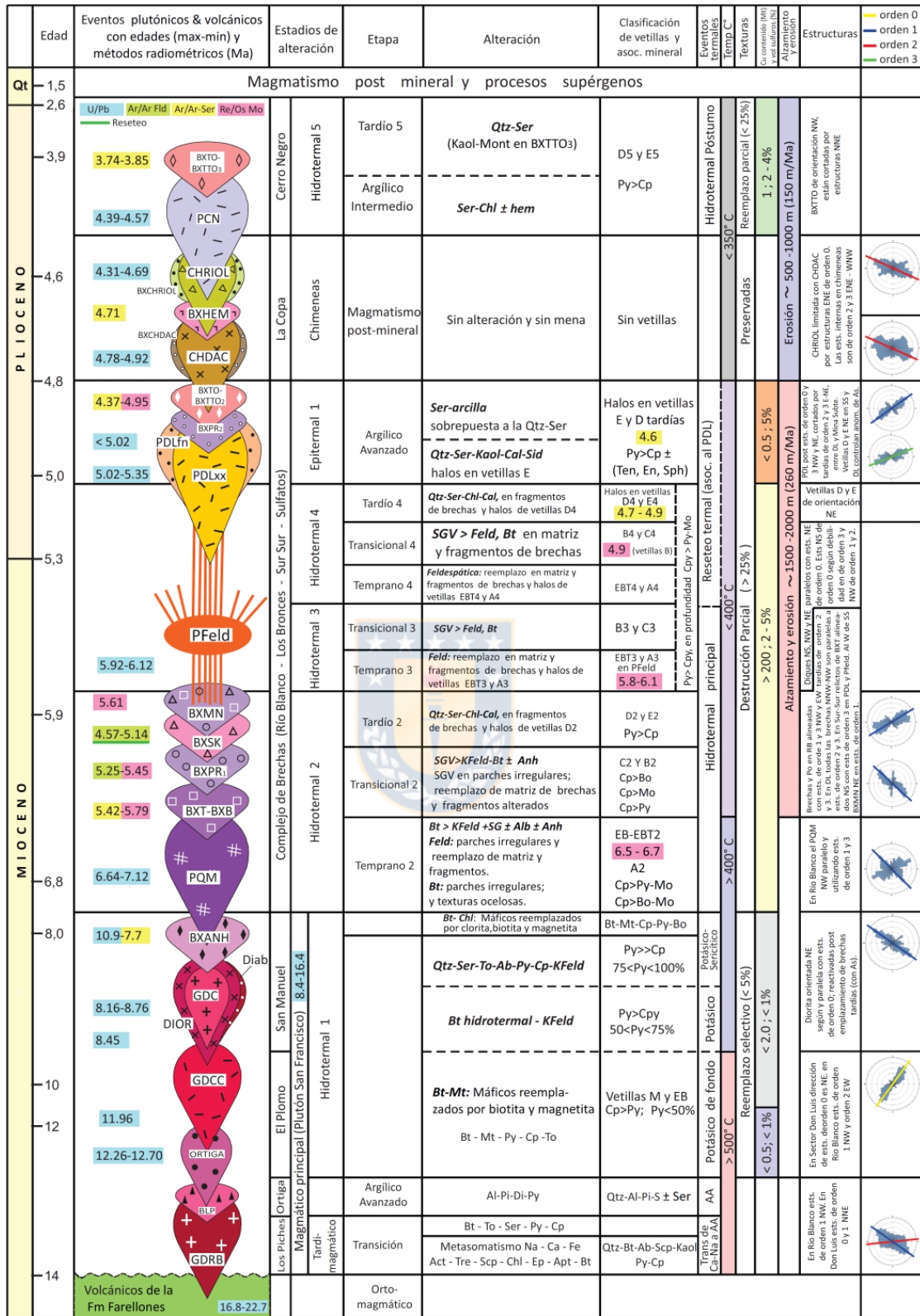


Figura 2.11: Cuadro resumen de la evolución geológica del yacimiento Río Blanco. Evolución de cada evento para las unidades presentes en el yacimiento, y su relación con las estructuras del área (SGEOM, 2017).

### 3. ANTECEDENTES TEÓRICOS

#### 3.1. Generalidades

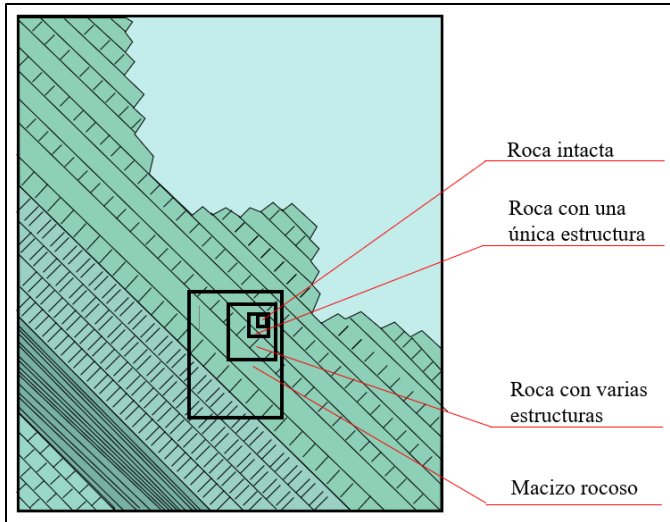
En minería el diseño de los taludes depende de la disposición y profundidad del cuerpo mineralizado, si el mineral a extraer no está en capas, los taludes se modifican continuamente al ir avanzando la excavación en profundidad y perímetro, aunque suelen mantenerse sus inclinaciones. Los análisis de estabilidad que permiten diseñar los taludes consideran el cálculo de Factor de Seguridad (FS), que se emplea para conocer cuál es el factor de amenaza para que se produzca un fallamiento y que, en términos simples, corresponde al cociente entre las tensiones tangenciales resistentes y las tensiones tangenciales deslizantes. Con esta información se puede definir el tipo de medida estabilizadora que se debe aplicar en caso de rotura real o potencial. Además, es necesario el conocimiento geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud (macizo rocoso), de los posibles modelos o mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades.

Para el estudio del comportamiento mecánico del macizo rocoso es necesario estudiar las propiedades tanto de la matriz como de las discontinuidades (Figura 3.1). La matriz rocosa es el material rocoso exento de discontinuidades o bloques de roca intacta que quedan entre ellas. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad. Una discontinuidad es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte, o dependiendo del caso, por la del material del relleno. Finalmente, el macizo rocoso es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades, y corresponden a medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos (González de Vallejo *et al.*, 2002).

#### 3.2. Factores influyentes en la estabilidad de taludes

González de Vallejo *et al.* (2002) mencionan que la estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos, geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. La combinación de los factores

citados puede establecer la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de roca.



**Figura 3.1: Diagrama de transición desde roca intacta hasta macizo rocoso.**

Los factores condicionantes de la estabilidad de los taludes son intrínsecos a los materiales naturales, mientras que los factores desencadenantes provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones. Estos últimos son factores externos que actúan sobre macizos rocosos, modificando sus características, propiedades y condiciones de equilibrio del talud.

### 3.2.1. Factores condicionantes

#### 3.2.1.1. Estratigrafía y litología

Diferentes tipos de litologías poseen distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas. Las propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material, junto con la presencia de agua, gobiernan su comportamiento tenso - deformacional y, por tanto, su estabilidad.

#### 3.2.1.2. Estructura geológica y discontinuidades

La combinación de los elementos estructurales con los parámetros geométricos del talud, altura,

inclinación y su orientación, determinan los problemas de estabilidad. La estructura del macizo rocoso queda definida por la distribución espacial de los sistemas de discontinuidades, que individualizan bloques de matriz rocosa que se mantienen unidos entre sí por las características y propiedades resistentes de las discontinuidades. La existencia de estas estructuras implica un comportamiento anisótropo del macizo y planos preferenciales de rotura.

### 3.2.1.3. Condiciones hidrogeológicas

La presencia de agua en el talud reduce su estabilidad al disminuir la resistencia del terreno y aumentar las fuerzas que tienden a la inestabilidad, los efectos más importantes son:

- Reducción de la resistencia al corte de los planos de rotura, al disminuir la tensión normal efectiva.
- La presión ejercida sobre grietas de tracción aumenta las fuerzas que tienden al deslizamiento.
- Aumento de peso del material por saturación.
- Erosión interna por flujo subsuperficial o subterráneo.
- Meteorización y cambios en la composición mineralógica de los materiales.
- Apertura de discontinuidades por agua congelada.

### 3.2.1.4. Propiedades geomecánicas

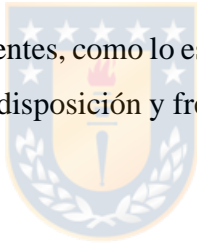
La posible rotura de un talud a favor de una determinada superficie depende de la resistencia al corte de la discontinuidad, que está controlada por los parámetros resistentes del material, es decir, la cohesión ( $c$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ). La cohesión es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca, mientras que el ángulo de fricción interna es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca.

La resistencia en macizos rocosos estará dada por las propiedades de las discontinuidades, por las propiedades de la matriz rocosa o por ambas. La resistencia al corte de los planos de debilidad depende de su naturaleza y origen, orientación, espaciado, continuidad, rugosidad, abertura, relleno, presencia de agua, resistencia a la compresión simple. Estos planos de rotura se pueden producir a favor de discontinuidades y a través de puentes de roca, estos últimos, en general, aportan resistencia al conjunto.

#### 3.2.1.5. Tensiones naturales

La liberación de tensiones que puede suponer la excavación de un talud puede originar tal descompresión que el material se transforma y fragmenta por las zonas más débiles. El estado tensional de un talud depende de su configuración geométrica y del estado de tensiones del macizo rocoso previo a la excavación.

En el caso de macizos rocosos competentes, como lo es en DAND, el principal factor condicionante es la estructura geológica, es decir, la disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidad y el grado de fracturación.



### 3.2.2. Factores desencadenantes

#### 3.2.2.1. Sobrecargas estáticas y dinámicas

Modifican la distribución de las fuerzas y pueden generar condiciones de inestabilidad. Entre las primeras están el peso de estructuras, paso de vehículos pesados, rellenos, entre otros, que ejercen una carga adicional sobre la cabecera de los taludes y pueden contribuir al aumento de fuerzas desestabilizadoras. Las cargas dinámicas se deben a movimientos sísmicos, naturales o inducidos, y a las vibraciones producidas por tronaduras cercanas al talud.

#### 3.2.2.2. Precipitaciones y régimen climático

Influyen en la estabilidad de los taludes al modificar el contenido de agua del terreno.

### 3.2.2.3. Procesos de meteorización

En determinados macizos rocosos blandos, los procesos de meteorización pueden causar la pérdida de resistencia y dar lugar a caída de material o formación de roturas.

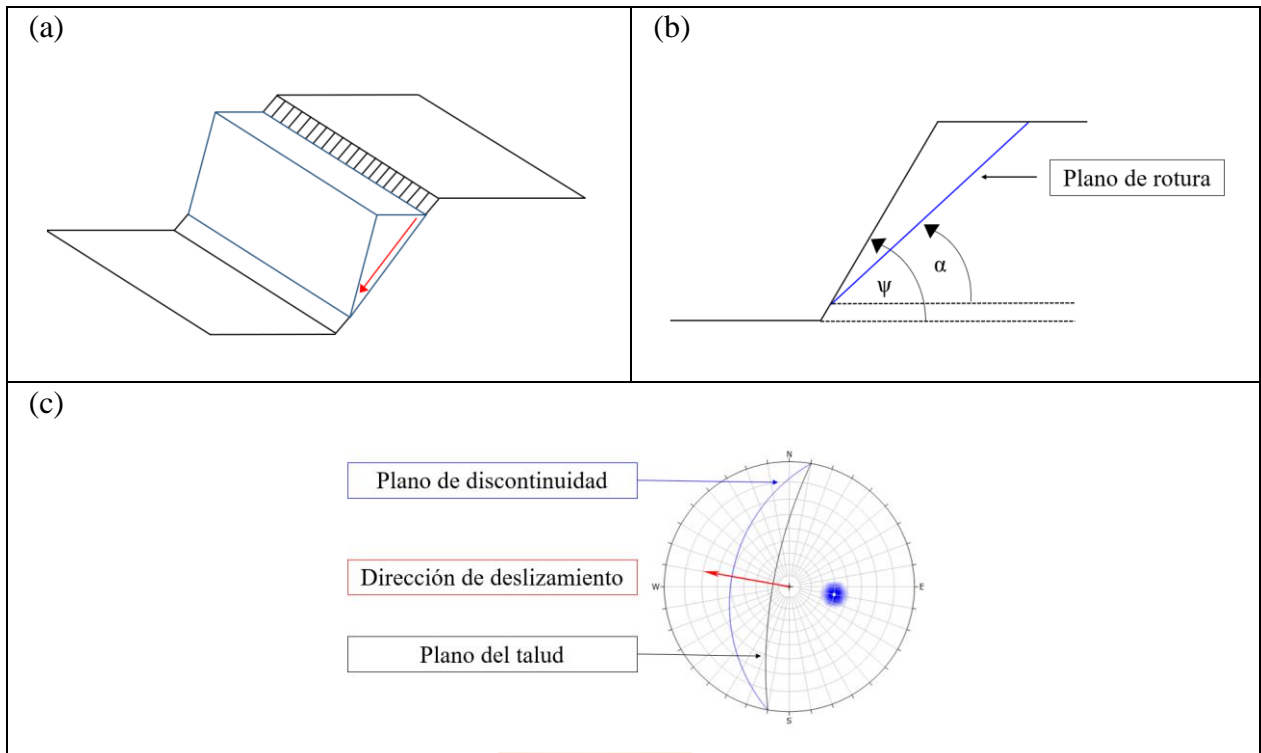
## 3.3. Mecanismos de falla

Los diferentes tipos de rotura que se dan en taludes de roca están condicionados por el grado de fracturamiento del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud, quedando la estabilidad definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa. González de Vallejo *et al.* (2002) precisa que los modelos de rotura más frecuentes son: rotura plana, en cuña, por vuelco, por pandeo y curva.

### 3.3.1. Rotura plana

Se llama rotura planar o plana a aquella en la que el deslizamiento se produce a favor de una única superficie plana preexistente, que puede ser estratificación, una junta tectónica, falla, entre otros, como se aprecia en la Figura 3.2. Para que este tipo de rotura se produzca se deben dar las siguientes condiciones:

- Los rumbos del plano del talud y del plano de deslizamiento deben ser paralelos o casi paralelos, formando entre si un ángulo máximo de  $20^\circ$  (Herrera, 2000).
- El buzamiento de la discontinuidad ( $\alpha$ ) debe ser en la misma dirección y con un ángulo menor que el del talud ( $\psi$ ), cumpliéndose la condición que la discontinuidad debe estar descalzada por el talud.
- El manto de la discontinuidad ( $\alpha$ ) debe ser mayor que su ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ).
- Los límites laterales de la masa deslizante han de producir una resistencia al deslizamiento despreciable.

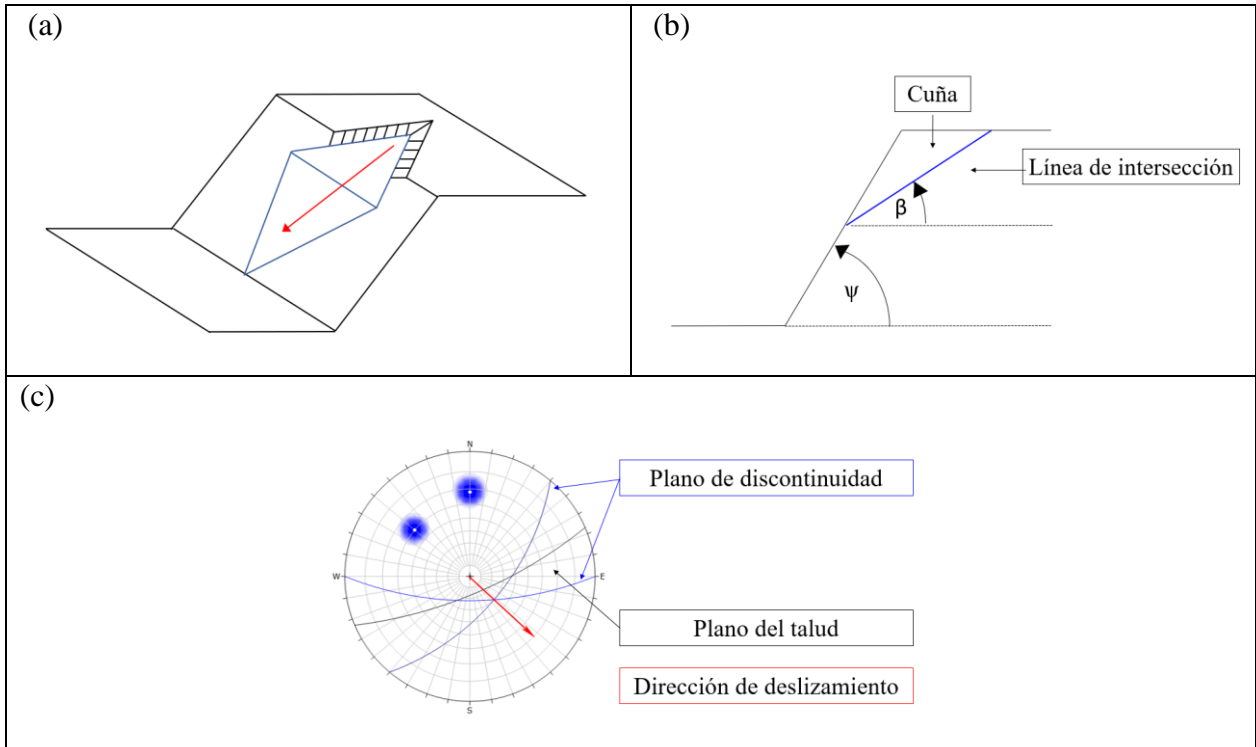


**Figura 3.2: Esquemas de roturas planas.** En (a) representación de un talud y formación de una falla plana, indicando la dirección de deslizamiento del bloque inestable. La imagen (b) muestra la vista en perfil del talud y las condiciones necesarias para que se genere este tipo de rotura y en (c) red estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud (modificado de Vallejos *et al.*, 2002).

### 3.3.2. Rotura en cuña

Corresponde al deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por:

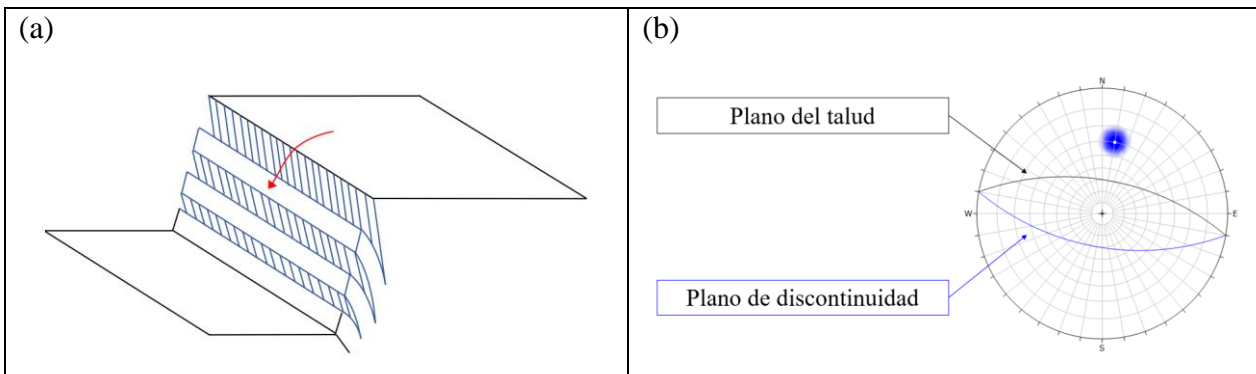
- Dos planos de discontinuidades de rumbos oblicuos respecto al del talud, quedando el rumbo del talud comprendido entre los de las familias de discontinuidades (Herrera, 2000).
- Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud.
- La dirección de deslizamiento corresponde a la dirección de buzamiento de la línea de intersección ( $\beta$ ) de las dos familias de discontinuidades, que debe ser a favor del talud y con menos inclinación que este ( $\psi$ ) como se observa en la Figura 3.3.
- El manto de la línea de intersección debe ser mayor que su ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ).



**Figura 3.3: Esquemas de roturas en cuña.** En (a) representación de un talud y formación de una falla en cuña, indicando la dirección de deslizamiento del bloque inestable. La imagen (b) muestra la vista en perfil del talud y las condiciones necesarias para que se genere este tipo de rotura y en (c) red estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud (modificado de Vallejos *et al.*, 2002).

### 3.3.3. Rotura por volcamiento

Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos o sistemas de diaclasas tienen manto contrario a la inclinación del talud y rumbo paralelo o subparalelo al mismo (Figura 3.4).

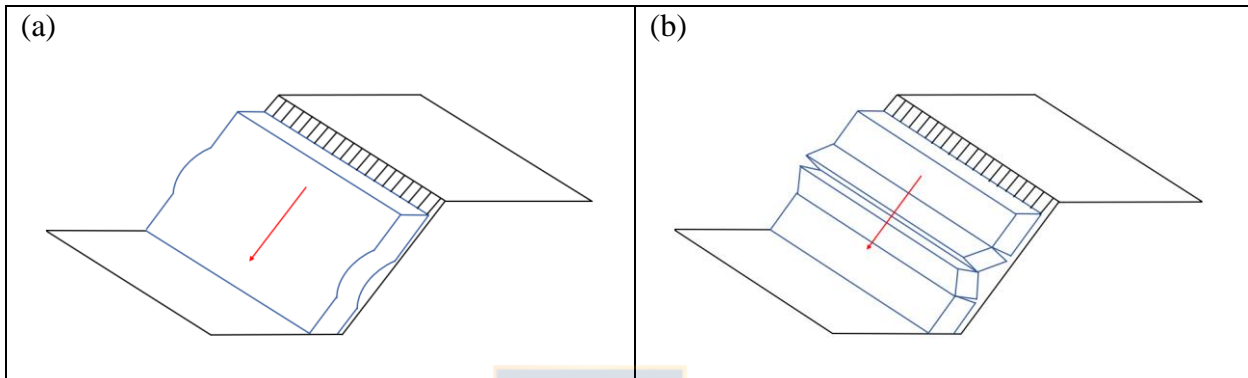


**Figura 3.4: Esquemas de fallas por volcamiento.** En (a) talud con estructuras favorables al vuelco de estratos. (b) Representación estereográfica de una discontinuidad con la misma orientación que el talud, pero buzamientos opuestos (modificado de Vallejos *et al.*, 2002).



### 3.3.4. Rotura por pandeo

Este tipo de rotura se produce a favor de planos paralelos al talud y con buzamiento mayor que el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ). La condición necesaria para que se produzca es que los estratos sean suficientemente delgados, en relación con la altura del talud. Las roturas pueden ocurrir con o sin flexión del estrato como en los casos de la Figura 3.5.



**Figura 3.5: Esquemas de fallas por pandeo.** Pandeo de estratos verticalizados, en (a) pandeo por flexión, en (b) pandeo por fractura (modificado de Vallejos *et al.*, 2002).

### 3.3.5. Rotura circular

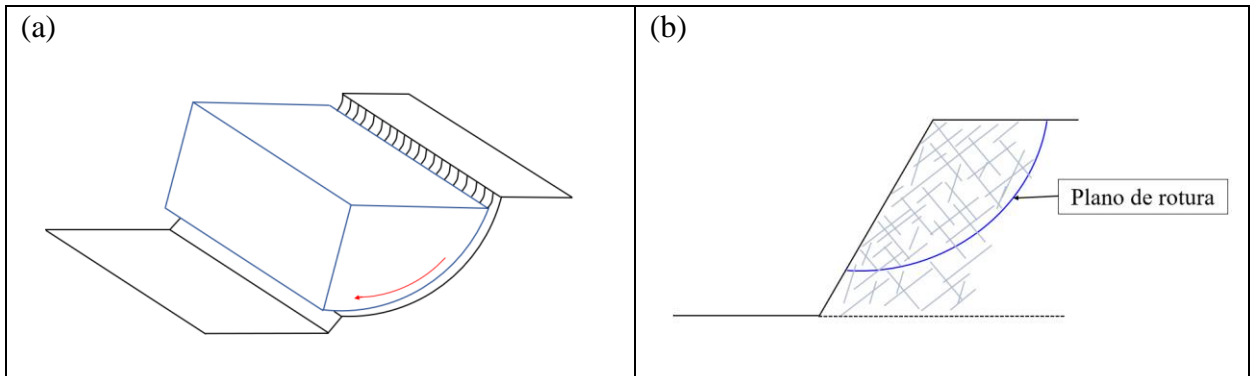
Es aquella en que la superficie de deslizamiento es asimilable a una superficie cilíndrica cuya sección transversal se asemeja a un arco de círculo (Herrera, 2000). La rotura puede ocurrir en macizos rocosos blandos poco competentes y en macizos muy alterados o intensamente fracturados, presentan comportamiento isótropo (Figura 3.6) y donde los planos de discontinuidad no controlan el comportamiento mecánico (González de Vallejo *et al.*, 2002), en los que además ha de cumplirse la condición de que el tamaño de las partículas de suelo o roca sea muy pequeño, en comparación con el tamaño del talud.

## 3.4. Modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFN)

### 3.4.1. Concepto de DFN

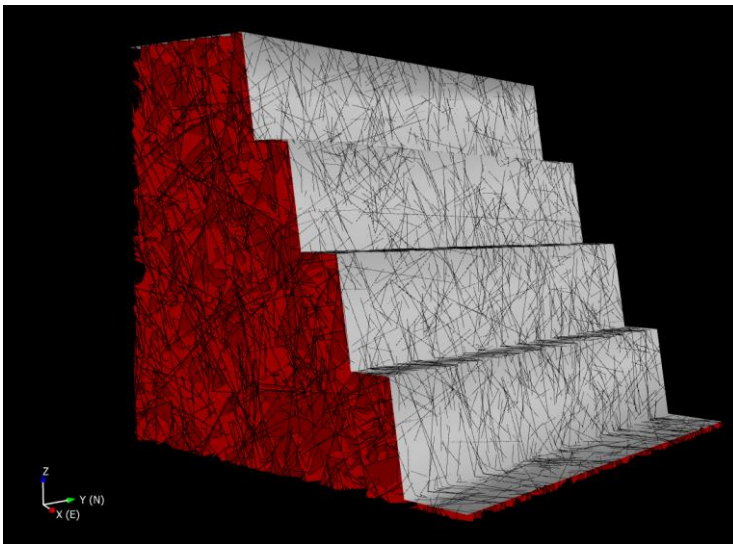
Las Redes de Fracturas Discretas (*Discrete Fracture Network*, DFN) son modelos tridimensionales

que buscan describir la heterogeneidad natural de los macizos rocosos fracturados (*Golder Associates*, 2006).



**Figura 3.6: Esquemas de roturas circulares.** En (a) y (b) formación de roturas curvas en macizos rocosos intensamente fracturados (modificado de Vallejos *et al.*, 2002).

Para la construcción de cada modelo se debe comprender la distribución espacial de las fracturas dentro de un volumen de roca, para lo cual es necesario realizar mediciones de la orientación, continuidad e intensidad en las estructuras, que se quiere representar, ya que se requiere definir funciones de probabilidad que permitan la generación estocástica de un gran número de discontinuidades que simulen la conectividad y geometría de las redes de fractura naturales (Elmo *et al.*, 2014), como se observa en la Figura 3.7.



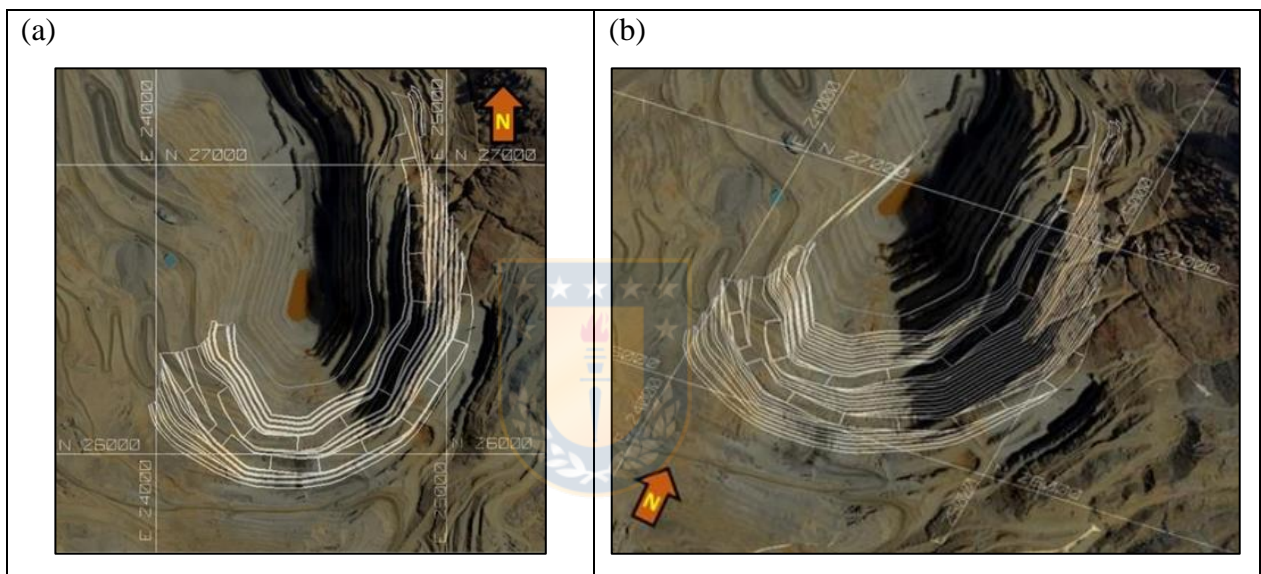
**Figura 3.7: Modelo de Redes de Fracturas Discretas.** En la imagen el modelo se encuentra intersectado y cortado por un talud conformado por cuatro bancos.

*Golder Associates* es uno de los grupos pioneros en usar Redes de Fractura Discretas, desarrollando

el software *FracMan* (utilizado en este estudio) para ser aplicado en un amplio rango de problemas geomecánicos incluyendo estabilidad de taludes y túneles, fragmentación *in situ*, flujo de aguas subterráneas, entre otros.

### 3.4.2. Sectorización del área de estudio

En el área de estudio que corresponde a la mina rajo Don Luis, específicamente a la Fase 5 DS, cuya extensión se visualiza en la Figura 3.8.



**Figura 3.8: Ubicación de F5 DS en mina rajo Don Luis.** En (a) y (b) diseño (líneas blancas) de F5 DS, el sector en evaluación comprende la extensión de toda esta fase (tomado de SGEOM, 2019b).

Los desarrollos de Fase 5 DS, se emplazan en un ambiente geotécnico secundario. En la Fotografía 3.1 es posible reconocer las pátinas de limonita por su color amarillento de las rocas fracturadas.

En la evaluación geotécnica y geomecánica de F5 DS, realizada por la Superintendencia de Geomecánica (SGEOM, 2019b) se menciona que el diseño de la fase corta a cinco Grupos Litológicos, diferenciados por sus características geotécnicas y estructurales. Su distribución se muestra en la Figura 3.9, de este a oeste, donde se identifica una amplia extensión de la unidad Intrusivo Duro, pasando al sector central dominado por la unidad de Brechas, seguido de la unidad de Brechas Tobácea y finalmente, en su extremo occidental, la presencia de la unidad Pórfidos.

Todas las unidades son continuas en la vertical dentro de los límites de este estudio. El material que se encuentra en los extremos de la fase corresponde principalmente a Sobrecarga y Relleno, materiales No Consolidados depositados de manera natural y antrópica.



**Fotografía 3.1: Vista panorámica de F5 DS.** En la imagen del área de estudio es posible observar el color amarillo de la limonitización de las fracturas, típica de roca de ambiente secundario.

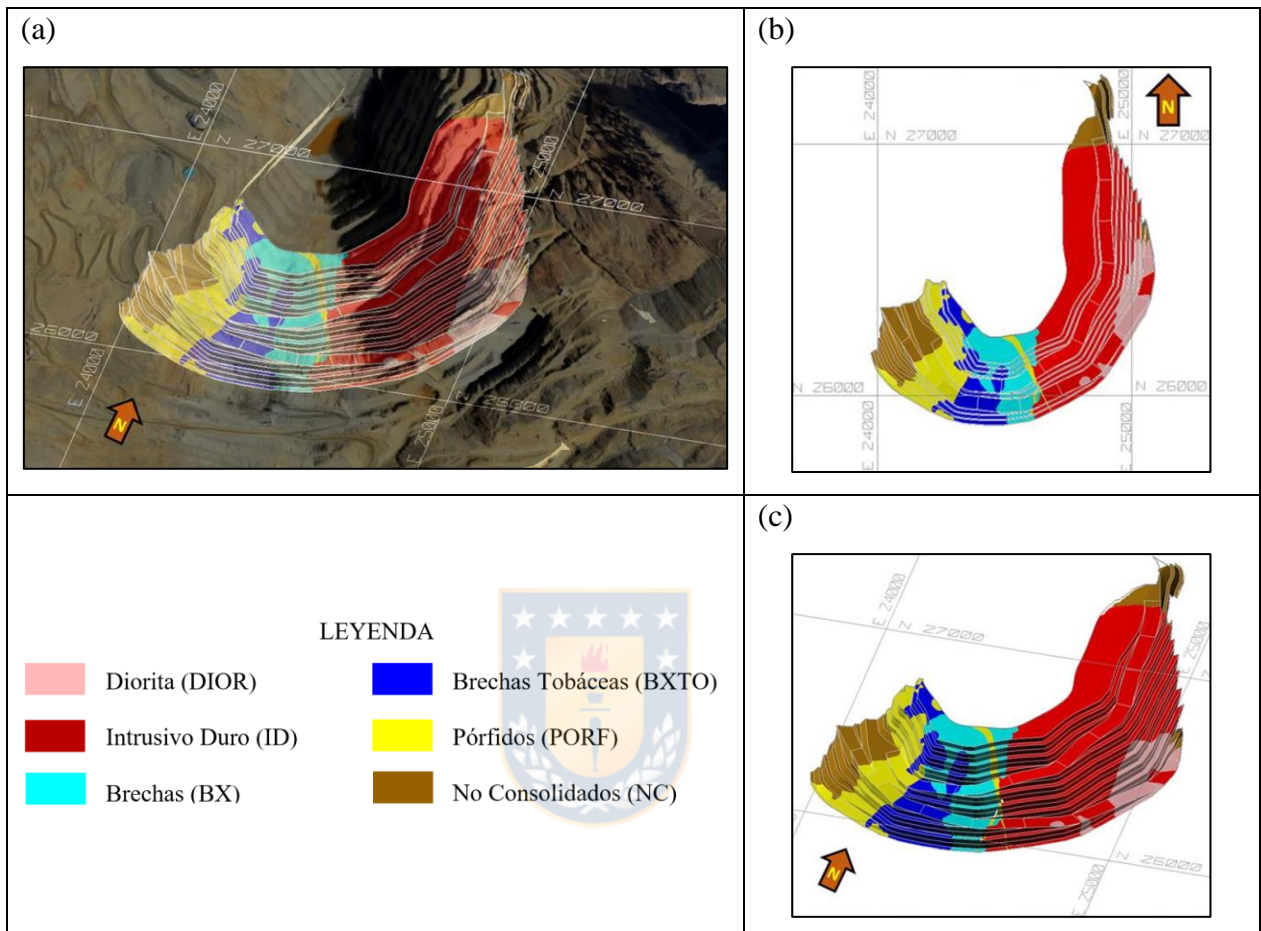
Previo a la adquisición de datos en terreno, es importante caracterizar el área de estudio de manera estructural y litológica, pero además tener en cuenta el diseño de la fase. Estos aspectos son críticos al momento de decidir la ubicación y número de modelos DFN a construir.

La correcta representación de las estructuras es fundamental para la construcción de DFN, es a partir del mapeo que se obtiene la orientación y largo de las trazas de las discontinuidades. La construcción de este tipo de modelos requiere, además, el cálculo de la frecuencia de fracturas por eje coordinado. Dicho valor es dependiente de la orientación del banco que se ha mapeado. Por lo anterior, la cantidad de modelos a construir para representar la fase depende, en parte, de los quiebres en las orientaciones del diseño de F5 DS.

También hay que tener en consideración las condiciones estructurales. Desde este punto de vista, el sector tiene fallas con las siguientes orientaciones:



- Sistema NE - SW: se presenta en todo el sector de mina Don Luis, con gran continuidad a escala de banco y pared (con casos de hasta 600 m).



**Figura 3.9: Distribución de los Grupos Litológicos de F5 DS.** En (a), (b) y (c) diferentes vistas de los Grupos Litológicos de F5 DS, tomadas de SGEOM, 2019b.

- Sistema NW - SE: con manteos subverticales, localmente de bajo ángulo y manto al sur, en la pared noreste, este y sureste, mientras que en la pared suroeste este sistema manta al noreste.
- Sistema E - W: con manteos subverticales, este sistema se asocia a fallas mayores que pasan de lado a lado del rajo.
- Sistema E - W: es un sistema importante con manteos de bajo ángulo, principalmente en la pared sureste de todo el rajo, con continuidades a nivel de banco a pared.

- Sistema N - S: corresponde principalmente a fracturamiento subvertical, con continuidades importantes en la vertical.

La presencia de un sistema en particular o la conjugación entre ellos en algún tramo del diseño de la fase, causa diferencias en la calidad geotécnica del macizo, estos contrastes entre sectores demandan realizar modelos DFN que representen escenarios particulares.

### 3.4.3. Levantamiento tridimensional

Los parámetros geotécnicos necesarios para la construcción de modelos DFN se mapean desde levantamientos tridimensionales, tomados en este estudio con el dispositivo Láser *I - Site* 8.800, procesándose posteriormente en el *software PointStudio* 8.1 de *Maptek*. En la Fotografía 3.2 se observa el dispositivo posicionado sobre un trípode que le da soporte.



**Fotografía 3.2: Láser *I - Site* 8.800.** El dispositivo de detección utilizado para este estudio fue el Láser *I - Site* de *Maptek*, que incorpora para su funcionamiento la tecnología LiDAR.

La técnica del escaneo láser es utilizada para obtener de manera precisa información de la geometría de un objeto empleando luz láser. En este caso, el escáner opera bajo la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*), que posee dispositivos muy precisos para calcular el tiempo que toma la luz en recorrer la distancia entre el dispositivo de detección y el objeto reflejado, en este caso, la superficie de los afloramientos (Tiruneh & Stetler, 2013).

Antes de comenzar con el escaneo, una cámara digital incorporada en el sistema LiDAR toma una

imagen en 360° del sector, la que se puede ver en una *tablet* conectada al escáner, desde donde se puede configurar, administrar y visualizar el escaneo. Es desde ahí que se selecciona el área de interés y la resolución con la que se desea trabajar, que viene por defecto en 2, 4, 8 o 16 *bytes*. El producto final es una densa nube de puntos, donde cada uno de ellos contiene atributos RGB (*Red, Green, Blue*).

Las ventajas de usar tecnología LiDAR sobre métodos de mapeo tradicionales es la gran cantidad de datos que se pueden adquirir, proporcionando información que ayuda a minimizar los errores que son inducidos por el mapeo de campo, al representar la geometría tridimensional de los afloramientos en alta resolución, con tiempos de captura relativamente bajos y sin que exista la necesidad de tener contacto directo con las paredes del rajo.

Sin embargo, Tiruneh & Stetler (2013) mencionan la importancia de considerar las limitaciones de los levantamientos tridimensionales, las que son descritas a continuación:

- Las discontinuidades que tienen rumbos paralelos o subparalelos y/o manteos en el mismo ángulo que la línea de visión del escáner, tienen baja reflexión del láser, por lo que no habrá información de esas superficies.
- Se puede producir un truncamiento de las longitudes de las trazas de discontinuidades cortas, especialmente al crear superficies trianguladas a partir de datos de puntos, porque el escáner redondea o suaviza los bordes de estas superficies para ajustarlas con los datos de puntos adyacentes.
- El escáner láser no puede reemplazar las técnicas de mapeo de campo. La experiencia del mapeador es siempre necesaria para describir el macizo rocoso. Además, la asociación de las estructuras necesita ser interpretada en terreno, por lo tanto, el escaneo digital debe ser combinado con el mapeo en terreno.

En el procedimiento de captura de información geotécnica mediante escaneo láser, realizado por la Superintendencia de Geomecánica (SGEOM, 2019c) se recomienda el posicionamiento del

equipo a una distancia mínima de 40 m a la pared a escanear, debido a que el equipo láser *I - Site* tiene ángulos de lectura en la vertical de 40° y entre 110° y 120° en la horizontal. El dispositivo tiene que ser ubicado de manera perpendicular al centro de la ventana de mapeo elegida, ya que pierde resolución en la horizontal, lo que produce una disminución de la concentración de información hacia los costados.

Además, Schulz (2019) recomienda utilizar ventanas de mapeo de 64 m de alto por 64 m de ancho, es decir, restringidas en la vertical a dos bancos dobles, y el equipo con máxima resolución (16 *bytes*) a una distancia aproximada de 100 m del afloramiento, distancia que permite identificar fracturas  $\geq 5$  m.

#### 3.4.4. Parámetros para el modelamiento

Los modelos DFN son estocásticos, es decir, se obtienen resultados distintos cada vez que se realiza un nuevo modelo, pero cada uno de ellos respeta siempre los parámetros geotécnicos que se le entregan al *software*, lo que logra representar la variabilidad natural del macizo rocoso. En el manual para el usuario de la versión 7.7 de *FracMan* (Golder Associates, 2018) se describen los parámetros requeridos para lograr la caracterización del arreglo de las redes de fractura.

##### 3.4.4.1. Posicionamiento de las discontinuidades

*FracMan* utiliza tres algoritmos para posicionar las discontinuidades en el espacio de trabajo (Lee *et al.*, 2011):

- *Enhanced Baecher*: en este modelo los centros de las fracturas se ubican usando un proceso *Poisson* (estocástico), donde las fracturas se crean uniformemente dispersas en el espacio, con un radio y orientación determinado. Las fracturas representadas como polígonos con 3 a 16 lados, estos polígonos pueden ser equiláteros o elongados, dependiendo del usuario.
- *Nearest Neighbor*: modelo simple, no estacionario, en el que la intensidad de fractura  $P_{32}$  disminuye exponencialmente con la distancia desde las características principales (identificadas



por el usuario).

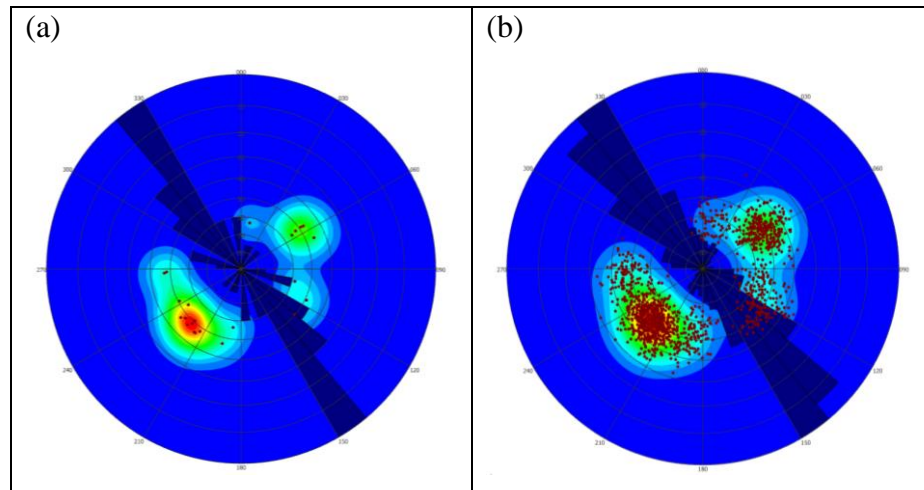
- *Levy Lee*: modelo estocástico que produce grupos de fracturas más pequeñas alrededor de fracturas más grandes y dispersas.

#### 3.4.4.2. Orientación de las discontinuidades

González de Vallejo *et al.* (2002) menciona que la orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su buzamiento (ángulo entre el plano medido y un plano horizontal) y por su dirección de buzamiento (dirección hacia donde se inclina la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente respecto al norte).

*FracMan* proporciona cinco tipos de distribuciones de probabilidad para variables direccionales:

- Distribución Constante: se debe elegir cuando todas las fracturas en el conjunto tengan el mismo *trend* y *plunge*.
- Distribución de *Fisher*: es un análogo de la distribución normal en una esfera, en donde la variabilidad del rumbo se ve obligada a ser igual a la variabilidad del manteo. Siendo tal que la variabilidad de la orientación se traza como un *cluster* circular en una red estereográfica de igual área.
- Distribución Normal: la variación del rumbo es mayor que la variabilidad del manteo.
- Distribución *Bingham*: esta distribución se encuentra al trazar datos de múltiples puntos de un pliegue.
- Distribución *Bootstrap*: permite usar datos de orientación en el modelo para la representación de fracturas. Con este método estadístico de remuestreo los datos entregados se replican en la simulación (Figura 3.10), independientemente de la cantidad de estructuras que contenga (Ortiz, 2019).



**Figura 3.10: Demostración de una Distribución *Bootstrap*.** (a) Diagramas de polos y rosetas generadas a partir de mapeo de terreno (23 estructuras), en (b) diagramas de polos y rosetas a partir de *bootstrapping* (1358 estructuras).

#### 3.4.4.3. Longitud de las discontinuidades

González de Vallejo *et al.* (2002), definió la persistencia de un plano de discontinuidad como su extensión. Sin embargo, la información del tamaño real de una discontinuidad resulta difícil de obtener y se utiliza el largo de traza máximo medible formado por la intersección de un plano de discontinuidad con un afloramiento (Dershowitz & Einstein, 1988).

*FracMan* admite varias distribuciones de probabilidad para definir valores escalares, como la longitud de las discontinuidades o su radio equivalente, las que son descritas a continuación:

- Distribución Uniforme: describe el comportamiento de una variable discreta que puede tomar  $n$  valores distintos con la misma probabilidad cada uno de ellos.
- Distribución Exponencial: en donde el exponente es la variable y la base es una constante, explicando un gran decrecimiento de la frecuencia en función del valor escalar.
- Distribución Normal: útil para modelar numerosos fenómenos naturales, formando una campana simétrica respecto de un determinado parámetro estadístico.
- Distribución Lognormal: en este caso, el logaritmo de la variable aleatoria se distribuye

normalmente.

- Distribución *Power Law*: conocida también como *Pareto*, es útil para describir la distribución del tamaño de las fracturas. Esta función se describe mediante dos parámetros,  $x$  mínimo ( $x_{min}$ ) y el exponente  $D$  ( $D$ ):

Función de Distribución de Probabilidad:  $f_x(x) = \frac{D(x_{min})^D}{x^{D+1}}$  cuando  $x \geq x_{min}, D > 0$

Función de Distribución Acumulada:  $F_x(x) = 1 - \left(\frac{x_{min}}{x}\right)^D$  cuando  $x \geq x_{min}, D > 0$

- Distribución *Weibull*: suele ser útil en el modelado espacial, para describir la distribución del valor  $P_{32}$ .
- Distribución *Gamma*: se utiliza para describir la incertidumbre en las medidas de intensidad de fracturamiento,  $P_{31}$  (número de fracturas/volumen de roca),  $P_{32}$  (área de las fracturas/volumen de roca) y  $P_{33}$  (volumen de las fracturas/volumen de roca).

Para determinar la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los largos estructurales, se deben realizar pruebas de bondad de ajuste (GOF, *Goodness of Fit*). *EasyFit 5.6* de *MathWave Technologies* analiza un conjunto de datos de entrada de manera automática, con las siguientes tres pruebas:

- Chi Cuadrado ( $X^2$ ): esta prueba identifica el ajuste entre la frecuencia observada de una muestra y la frecuencia esperada que se obtiene de una distribución hipotética (Quevedo, 2011).

En primer lugar, se plantean las hipótesis que se someten a prueba, la hipótesis nula ( $H_0$ ) para una prueba Chi Cuadrado postula que los datos se ajustan a una distribución dada y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) que los datos no se ajustan a la distribución.

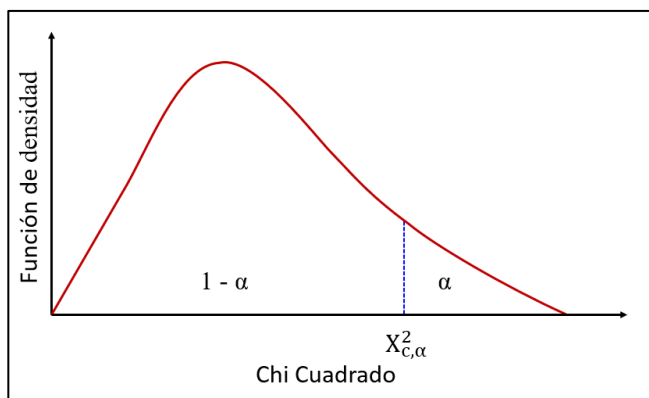
En segundo lugar, los datos deben ser agrupados en categorías o clases, lo cual se traduce en la construcción de una tabla de frecuencias o histograma.

En tercer lugar, se debe calcular el estadístico de la prueba Chi Cuadrado, que corresponde a:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Donde,  $O_i$  corresponde al valor observado para la clase  $i$ -ésima y  $E_i$  el valor esperado de la clase  $i$ -ésima.

El valor  $X^2$  se compara con un valor de la tabla de probabilidad para Chi Cuadrado (Anexo 1). La tabla tiene en la primera columna los grados de libertad ( $c$ ), que corresponde al total de categorías menos una y en la primera fila tiene el nivel de significancia ( $\alpha$ ) que consiste en la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera y corresponde a un valor definido por el investigador. Para que la hipótesis nula no sea rechazada, el valor  $X^2$  debe ser menor que el valor que corresponda de la tabla de Chi Cuadrado ( $X_{c,\alpha}^2$ ), es decir, se encuentra del lado derecho de la curva en la gráfica de la Figura 3.11.



**Figura 3.11: Distribución de probabilidad Chi Cuadrado.** La zona de rechazo de la hipótesis nula siempre se encuentra al lado derecho de la gráfica.

Adicionalmente, las pruebas de Chi Cuadrado permiten obtener un valor  $p$  ( $p$  value). Si este valor cumple con la condición de ser menor que el nivel de significancia impuesto, se considera como un resultado estadísticamente significativo y, por lo tanto, permite rechazar la hipótesis nula.

- *Kolmogórov Smirnov* (K - S): El procedimiento para emplear esta prueba es similar que Chi Cuadrado, se comienza planteando la hipótesis nula ( $H_0$ ) y alternativa ( $H_1$ ), luego se calcula la frecuencia observada de cada uno de los intervalos (la sumatoria final debe ser igual a 100), para obtener la frecuencia observada relativa acumulada ( $F_o(X_i)$ ) y la frecuencia esperada relativa acumulada ( $F_e(X_i)$ ). Con esta información se procede a calcular el estadístico de prueba ( $D$ ):

$$D = \max |F_e(X_i) - F_o(X_i)|$$

$D$  corresponde al valor máximo entre todas las diferencias de frecuencias relativas acumuladas esperadas y observadas, considerando los mismos intervalos de la variable. El estadístico  $D$  se compara con el correspondiente de la tabla de K - S (Anexo 1) dependiente del nivel de significancia establecido ( $\alpha$ ) y el tamaño muestral ( $n$ ), de manera que si el valor del estadístico de prueba ( $D$ ) es menor que el valor de la tabla ( $D_{n,\alpha}$ ) no se rechaza la hipótesis nula.

Las pruebas de *Kolmogórov Smirnov* al igual que las pruebas Chi Cuadrado obtienen un valor p, si este es menor que el nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula.

- *Anderson Darling*: en esta prueba una vez que se proponen las hipótesis, se usa el valor p correspondiente para probar si los datos provienen de la distribución hipotética. Si el valor p es menor que el nivel de significancia elegido, entonces se rechaza la hipótesis nula.

La prueba de bondad de ajuste que se utilice en el estudio debe ser adecuada al tamaño muestral empleado. Respecto de esto, la prueba Chi Cuadrado se puede utilizar cuando el tamaño muestral sea mayor a 30 datos (Monge & Pérez, 2015). En cuanto a *Kolmogórov Smirnov*, Pizarro *et al.* (1986 en Aguilera, 2007) indican que la prueba es válida para muestras grandes como para muestras pequeñas, en tanto que Pedrosa *et al.* (2014) señalan que el poder de detección de la prueba K - S es mayor si se emplean tamaños muestrales medios ( $n \sim 200$ ) y que la prueba de *Anderson Darling* es útil si se emplean tamaños muestrales pequeños.

Zeeb *et al.* (2013) mencionan que existe un problema respecto de la falta de consenso general del número mínimo de mediciones requeridas para determinar adecuadamente las distribuciones

estadísticas de las redes de fracturas. De acuerdo con Priest (1993 en Zeeb *et al.*, 2013) el área de muestreo debe contener entre 150 y 300 fracturas, de las cuales aproximadamente el 50% debería tener un inicio y final visible dentro de la ventana. Además, Bonnet *et al.* (2001 en Zeeb *et al.*, 2013) sugiere el muestreo de un mínimo de 200 fracturas para definir adecuadamente los exponentes de la distribución *Power Law* (distribución típica de los largos de trazas de fractura truncados). Sin embargo, esos números aplican solo a casos de estudio específicos. En consecuencia, el número mínimo de fracturas que debe contener un área de muestreo para aplicar los métodos de línea de detalle, ventana de mapeo y línea de mapeo circular no han sido definidos aún. Por lo tanto, Priest (1993 en Zeeb *et al.*, 2013) recomienda estudios sistemáticos que evalúen este problema.

#### 3.4.4.4. Forma de las discontinuidades

Conocer la forma de las discontinuidades es importante para caracterizar al macizo rocoso. Sin embargo, esta información es difícil de obtener, ya que el macizo generalmente es inaccesible en tres dimensiones (Zhang & Einstein, 2010). Los investigadores asumen formas poligonales, elípticas o circulares, dependiendo de los propósitos de sus estudios (Song, 2006). Debido a la conveniencia matemática, muchos autores utilizan discos circulares delgados ubicados al azar en el espacio para representar la forma de las fracturas (Warburton, 1980; Song, 2006).

Las discontinuidades en *FracMan* se generan como polígonos planos, con tres o más lados (definidos por el usuario). Por lo general, da origen a conjuntos de fracturas a partir de descripciones estocásticas de sus propiedades (Golder Associates, 2018).

#### 3.4.4.5. Intensidad de las discontinuidades

La abundancia es uno de los parámetros más importantes para describir las discontinuidades en un macizo rocoso. Puede ser expresada en termino de diferentes medidas en una, dos o tres dimensiones (Zhang, 2006).

Dershowitz & Herda (1992), describen un conjunto de medidas de densidad, intensidad y porosidad

que permiten cuantificar el fracturamiento (Tabla 3.1) con la notación  $P_{xy}$ , donde  $x$  es la dimensión del espacio de muestreo e  $y$  es la dimensión de la medida de la fractura.

**Tabla 3.1: Sistema de medición de discontinuidades.** Dershowitz & Herda (1992) describen un sistema para medir densidad, intensidad y porosidad de las fracturas. Donde para  $x$ , 0 indica una medida realizada en un punto, 1 significa que el muestreo se hace a lo largo de una línea, 2 una medida hecha en un plano y 3 dimensiones se refiere a que la medida se realiza en cierto volumen. En tanto, que para  $y$ , 0 denota la medida puntual de una fractura, 1 la medida de la longitud, 2 del área y 3 del volumen de una fractura.

		Dimensión de la fractura				
		0	1	2	3	
Dimensión de la región de muestreo	0	$P_{00}$ N° de fracturas por punto de muestreo				Medidas puntuales
	1	$P_{10}$ N° de fracturas por unidad de largo (frecuencia de fracturas)	$P_{11}$ Largo de fracturas que intersectan una línea de detalle			Medidas lineales
	2	$P_{20}$ N° de fracturas por unidad de área	$P_{21}$ Largo de fracturas por unidad de área	$P_{22}$ Área de las fracturas por unidad de área		Medidas areales
	3	$P_{30}$ N° de fracturas en un volumen dado		$P_{32}$ Área de las fracturas por unidad de volumen	$P_{33}$ Volumen de fractura por unidad de volumen	Medidas volumétricas
		Densidad			Intensidad	Porosidad

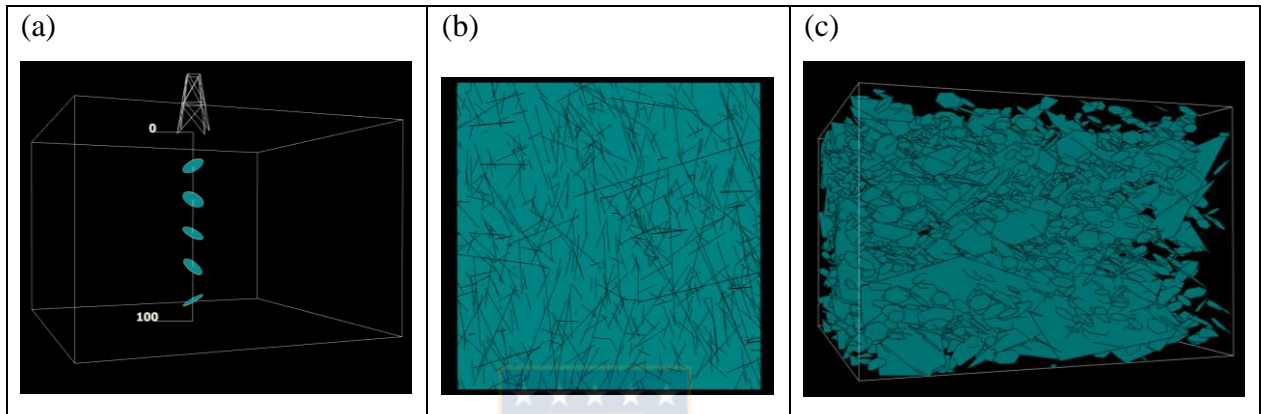
Para definir la intensidad del fracturamiento, se utilizan las medidas descritas a continuación (Fox *et al.*, 2012):

- $P_{10}$  o intensidad de fracturamiento lineal, corresponde al número de fracturas por metro (1/m). Se registra en sondajes y líneas de detalle (Figura 3.12 (a)).
- $P_{21}$  o intensidad de fracturamiento areal, se define como el largo de las trazas de las discontinuidades en cierta área mapeada ( $m/m^2$ ).  $P_{21}$  es generalmente registrado en la superficie



de afloramientos o paredes de túneles (Figura 3.12 (b)).

- $P_{32}$  o intensidad de fracturamiento volumétrico, se expresa como el área de la superficie de las fracturas por unidad de volumen de roca ( $m^2/m^3$ ). Es muy difícil obtener la medida de  $P_{32}$  en terreno, por lo que se calcula a partir de otras medidas de intensidad ( $P_{10}$  y  $P_{21}$ ) a través de simulaciones estocásticas o estimaciones analíticas (3.12 (c)).



**Figura 3.12: Medidas de intensidad de fracturamiento.** Simulaciones realizadas en *FracMan* para (a) un sondaje, (b) un plano y (c) un volumen.

La construcción de un modelo DFN requiere una serie de datos, que no son considerados por los métodos tradicionales de mapeo geotécnico, como que la frecuencia de fracturas ( $P_{10}$ ) se calcule por eje coordenado (Ortiz, 2019). Para lo cual las discontinuidades se deben separar por eje al que corta, sea horizontal (eje  $X'$ ), vertical (eje  $Z$ ) o transversal (eje  $Y'$ ). La definición del eje al que pertenece cada estructura está dada por el ángulo de incidencia entre la estructura y el eje de mapeo (se dice que forma parte de una dirección si la estructura corta al eje coordenado con un ángulo de incidencia superior a  $45^\circ$ ).

### 3.4.5. Análisis de cuñas de roca

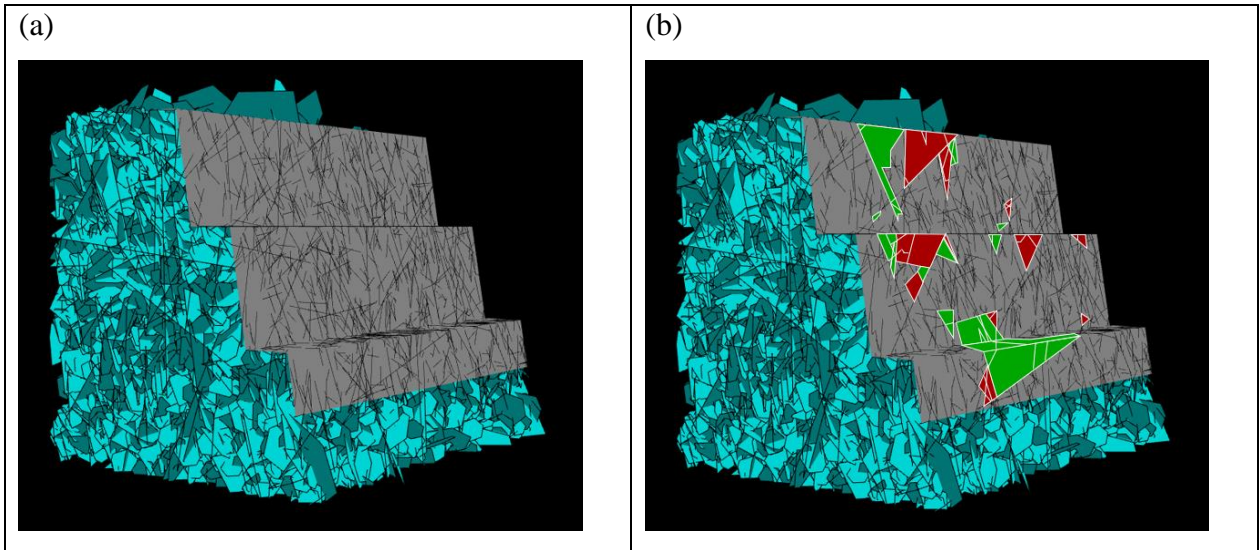
La herramienta de análisis de cuñas de roca de *FracMan* simula la estabilidad de los bloques en taludes o túneles de minas, lo que permite una evaluación probabilística de la estabilidad cinemática en excavaciones de rocas superficiales o subterráneas. Para llevar a cabo el análisis se debe contar con un modelo DFN definido por el usuario y con una superficie, que represente el

talud o túnel en el que se trabaja. Si la superficie no se cruza con el conjunto de fracturas, el análisis se ejecutará, pero los resultados no tendrán sentido.

La evaluación de estabilidad comienza identificando bloques tridimensionales (en los modelos DFN) que tengan al menos una cara en común con el talud que se esté evaluando. Los bloques se construyen formando inicialmente un mapa de conexión (Figura 3.13 (a)), compuesto por la intersección de las fracturas y la superficie. Una vez creado, se buscan formas cerradas creadas en el mapa y se hacen mapas de esas fracturas, repitiendo el proceso hasta considerar a todas las fracturas. Todas las caras resultantes se procesan para formar poliedros de un volumen mínimo (considerando que un bloque dado puede estar contenido dentro de un bloque más grande) conectados a la superficie (Golder Associates, 2018). Después de la identificación de bloques, el análisis debe proceder a la identificación de cuñas, que pueden estar formadas por cualquier número de caras de fracturas. Desde una perspectiva cinemática, se evalúa la estabilidad de un bloque examinando si posee caras inclinadas hacia abajo, que pudieran ser potencialmente una cara deslizante y definiendo su dirección de deslizamiento. Para cuñas identificadas como cinemáticamente extraíbles (Figura 3.13 (b)), el siguiente paso es determinar el factor de seguridad (Dershowitz *et al.*, 2019). Este factor se calcula utilizando el modelo de *Mohr - Coulomb* o el modelo de *Barton - Bandis*. Los bloques inestables (rojos) tienen un FS menor a 1, mientras que los estables (verdes) tienen un FS mayor a 1.

### 3.5. Métodos de muestreo

Según Dershowitz & Einstein (1988 en Zeeb *et al.*, 2013), un método común para evaluar el grado de fracturamiento del macizo rocoso, es la toma de datos geométricos de las redes de fractura del afloramiento y su posterior análisis para encontrar las distribuciones estadísticas que mejor se ajusten a los parámetros obtenidos. Los métodos más utilizados para la adquisición de datos de redes de fractura son muestreo en líneas de detalle, ventanas de mapeo y líneas de mapeo circular (Zeeb *et al.*, 2013). Cada uno de los tres métodos mencionados tiene ventajas y limitaciones cuando son aplicados a un afloramiento.



**Figura 3.13: Análisis de cuñas de roca en *FracMan*.** En (a) trazas dejadas por la intersección del modelo DFN y el talud (mapa de conexión) y en (b) Análisis de cuña, en rojo se representan los bloques inestables y en verde los estables.

### 3.5.1. Línea de detalle

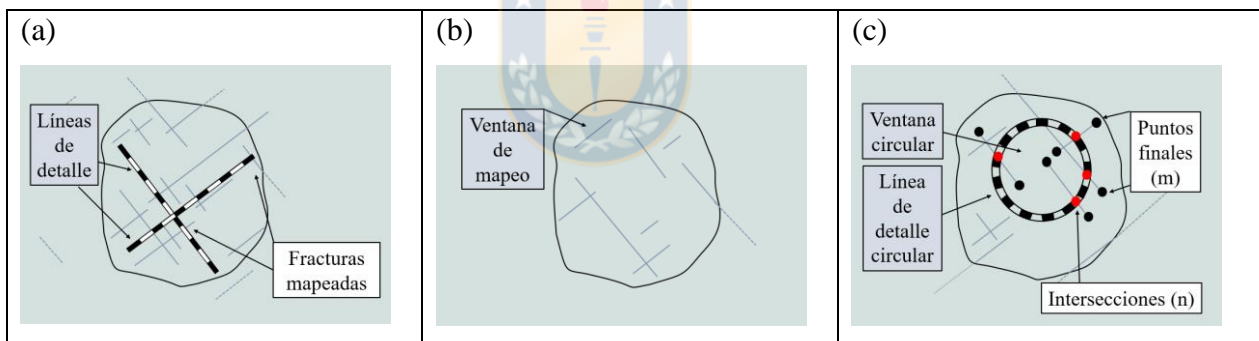
Este método provee información unidimensional de las redes de fractura, realizando un conteo de todas las discontinuidades que intersectan una línea de detalle estimando así el valor de  $P_{10}$  (1/m) como se observa en la Figura 3.14 (a), correspondiente a la intensidad de fractura lineal. Esta técnica es afectada por sesgos de orientación, truncamiento, censura y tamaño. El sesgo por orientación puede ser reducido al ubicar una línea de detalle de manera perpendicular a la orientación de determinado *set* de fracturas, si es necesario, varias líneas de detalle pueden ser usadas en afloramientos para capturar diferentes *sets*.

### 3.5.2. Celda o ventana de mapeo

Estima las propiedades estadísticas de redes de fractura midiendo los parámetros de todas las discontinuidades presentes dentro de un área de muestreo como exhibe la Figura 3.14 (b). Típicamente las aplicaciones de este método son la caracterización de redes de fractura usando datos de sensores remotos de imágenes satelitales o fotografías aéreas. En general, los sesgos que afectan el método de muestreo en ventanas de mapeo son por orientación, truncamiento y censura.

### 3.5.3. Línea de mapeo circular

Consiste en una combinación de líneas de detalle circulares y ventanas de muestreo (Figura 3.14 (c)). Este método no mide directamente características como la orientación y el largo de las fracturas individuales, sino que estima estos parámetros usando modelos estadísticos, a partir de la intensidad, densidad y el promedio de los largos de trazas de fractura. El estimador de intensidad se basa en un conteo del número ( $n$ ) de intersecciones entre las trazas de fractura y una o más líneas de detalle circulares. La densidad de las trazas de fractura se define como el número de centros de traza por unidad de área, sin embargo, en un afloramiento solo se puede medir una densidad aparente, debido a que no todas las trazas se encuentran completamente visibles, este valor se estima como el número de trazas completas y parciales dividido en el área de la ventana. Sin embargo, aunque estos estimadores son considerados de máxima verosimilitud, este método no proporciona información importante acerca de parámetros como la distribución de los largos de fracturas o su orientación.

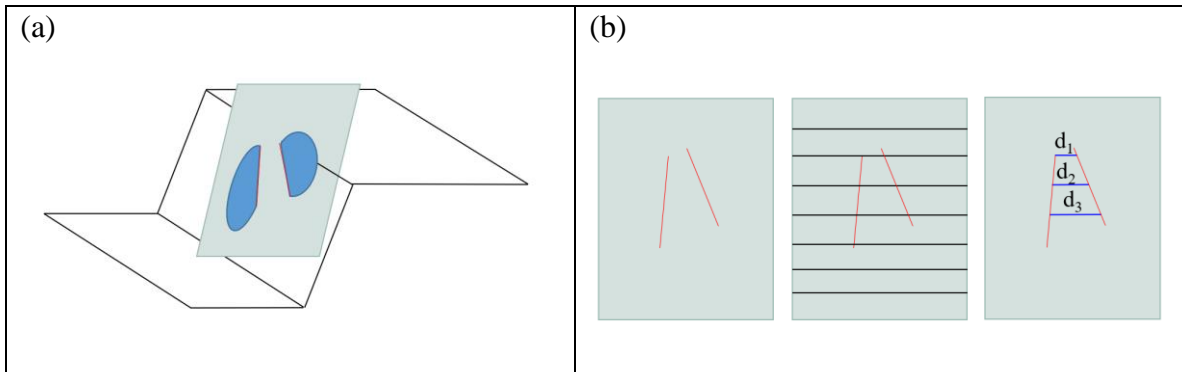


**Figura 3.14: Métodos de muestreo.** Métodos de línea de detalle (a), ventana de mapeo (b) y estimador circular (c). Las líneas continuas indican discontinuidades observables, mientras que las líneas segmentadas son parte de discontinuidades no observables (modificado de Zeeb *et al.*, 2013).

### 3.5.4. Secciones transversales

Una cuarta técnica se emplea en División Andina para obtener el valor de  $P_{10}$  (1/m) en el eje transversal al afloramiento, método que reduce el sesgo por orientación. Consiste en intersectar planos orientados en el eje transversal, con las discontinuidades pertenecientes a dicho eje, en cada plano se dibujan líneas de detalle y en ellas se miden los espaciamientos entre los pares de trazas de fracturas que se han formado por la intersección como se ejemplifica en la Figura 3.15.

Posteriormente, se calcula el inverso del promedio de los espaciamientos, valor que corresponde a la intensidad lineal de fracturamiento en el eje ortogonal a la cara de banco.



**Figura 3.15: Método de muestreo de secciones transversales.** En (a) se observa un plano (verdoso) ubicado de manera ortogonal a un talud, dicho plano se intersecta con discontinuidades (en azul) pertenecientes a este eje, estas intersecciones se observan en color rojo. Para el par de trazas formadas (b) se deben medir los espaciamientos  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  correspondientes al largo de las líneas azules, ubicadas sobre líneas de detalle (en negro) previamente trazadas.

### 3.6. Sesgos asociados a la captura de datos

Los sesgos pueden causar una subestimación o sobrestimación significativa de los parámetros estadísticos y pueden ser potencialmente perjudiciales para la caracterización de las redes de fractura (Zhang & Einstein, 1998 en Zeeb *et al.*, 2013).

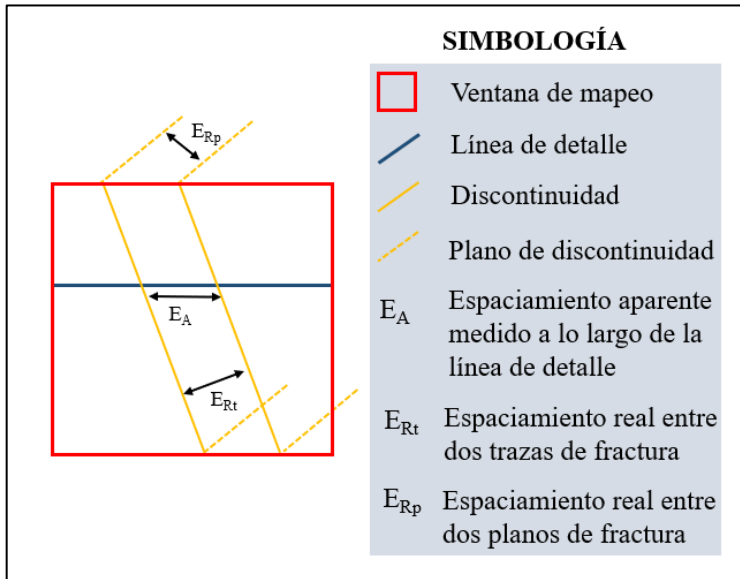
#### 3.6.1. Sesgo por orientación

El sesgo por orientación es causado por fracturas que intersectan la superficie del afloramiento o la línea de detalle con un ángulo oblicuo (Figura 3.16), lo que causa una subestimación de la frecuencia de fracturas al medir un espaciamiento aparente entre discontinuidades adyacentes.

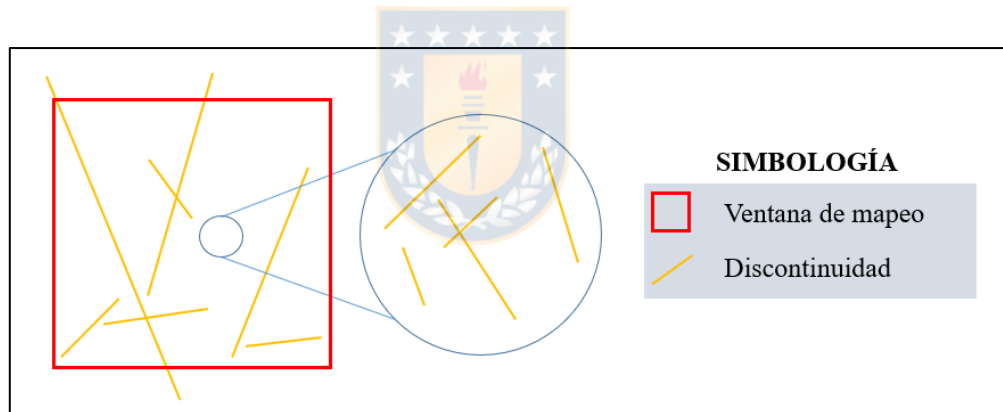
#### 3.6.2. Sesgo por truncamiento

Es causado por una limitación en la resolución, que depende del dispositivo de detección utilizado (para el caso de estudio, el dispositivo Láser *I - Site 8.800*) y el contraste entre la roca hospedante y la fractura. Esta limitación provoca que los tamaños de las discontinuidades no sean detectables

bajo cierta escala (Figura 3.17), subestimando el valor de la frecuencia de fractura.



**Figura 3.16: Esquema de sesgo por orientación.** El espaciamiento aparente medido entre fracturas oblicuas es mayor que el espaciamiento real, lo que causa la subestimación de la frecuencia de fracturas (modificado de Zeeb *et al.*, 2013).

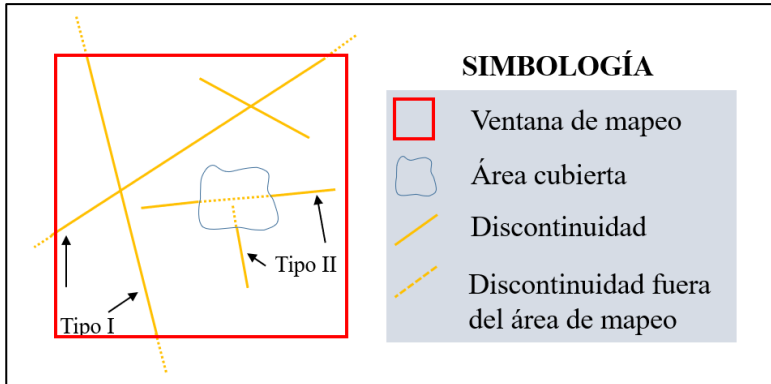


**Figura 3.17: Esquema de sesgo por truncamiento.** Al realizar un acercamiento al sector mapeado se observan las discontinuidades que no son detectables (modificado de Zeeb *et al.*, 2013).

### 3.6.3. Sesgo por censura

Existen dos tipos de sesgo por censura (Figura 3.18), el primero de ellos tiene relación con el tamaño del afloramiento, que al ser limitado causa que uno o ambos términos de las discontinuidades se encuentren fuera del área de muestreo. El segundo tipo se debe a la forma irregular del afloramiento, debido a la erosión, la superposición de capas de roca o vegetación, en este caso las fracturas tendrán ambos términos dentro del área de muestreo, pero parte de ellas

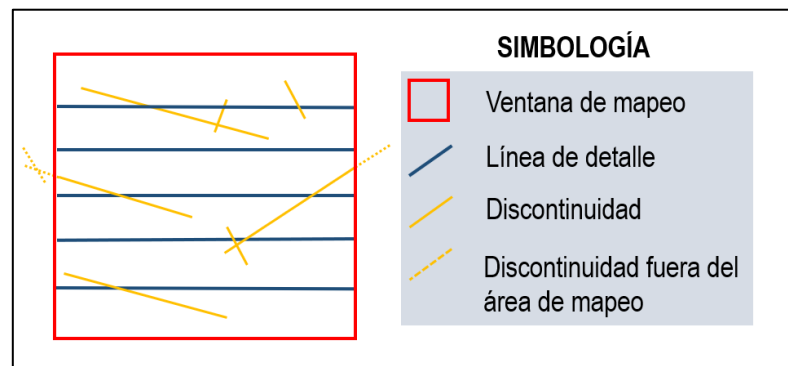
estarán ocultas a la observación. Un efecto típico del sesgo por censura es la sobrestimación de la densidad de fractura.



**Figura 3.18: Esquema de sesgo por censura.** El tipo I de sesgo por censura, es causado por la limitación del área de mapeo, y el tipo II por sector cubiertos del afloramiento (modificado de Zeeb *et al.*, 2013).

#### 3.6.4. Sesgo por tamaño

El sesgo por tamaño se encuentra asociado con el método de líneas de detalle, dado que la probabilidad de que una fractura interseccione una línea es proporcional a su largo, teniendo mayores posibilidades de ser muestreadas las discontinuidades más grandes (Figura 3.19).



**Figura 3.19: Esquema de sesgo por tamaño.** Modificado de Zeeb *et al.* (2013).



## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Generalidades

En el diagrama de la Figura 4.1 se describen las etapas de trabajo que se siguieron para la construcción de modelos DFN a partir de la información obtenida en el rajo Don Luis.

La primera etapa consistió en dividir el área de estudio en diferentes sectores, basándose en la información geológica disponible y el diseño de la fase.

A continuación, dentro de cada sector se realizaron levantamientos tridimensionales. Mientras el equipo tomaba los datos, se hicieron esquemas de las fallas presentes, para registrar la continuidad de las estructuras y las asociaciones que forman inestabilidades en los taludes.

En la tercera etapa se obtuvieron los datos a partir de la imagen escaneada, se comenzó haciendo un procesamiento del levantamiento para eliminar puntos que no fueran de interés y con los restantes se formó una superficie triangulada, sobre la cual se realizó el mapeo de discontinuidades. La finalidad de efectuar el mapeo es conseguir la orientación y los largos de las trazas de las fracturas, además de la intensidad de fracturamiento lineal  $P_{10}$  (1/m) a partir de la que se obtuvo la intensidad de fracturamiento volumétrica  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ). Todos estos parámetros fueron los datos de entrada aplicados en la construcción de los modelos DFN.

Posteriormente, se construyeron los modelos estocásticos con el *software FracMan*, donde se ingresaron los datos previamente mapeados y ajustados.

En la evaluación de los resultados se utilizó la herramienta de análisis de cuña de rocas de *FracMan*, para saber la estabilidad de los bloques formados por la intersección de los modelos DFN calibrados y los diseños de los taludes. Finalmente, al Análisis de cuña se incorporaron las fallas explícitas que fueron mapeadas en terreno (Modelo híbrido), la simulación formada se contrastó con las inestabilidades del talud real a modo de calibración final, con lo que se evaluó la representatividad de los modelos.

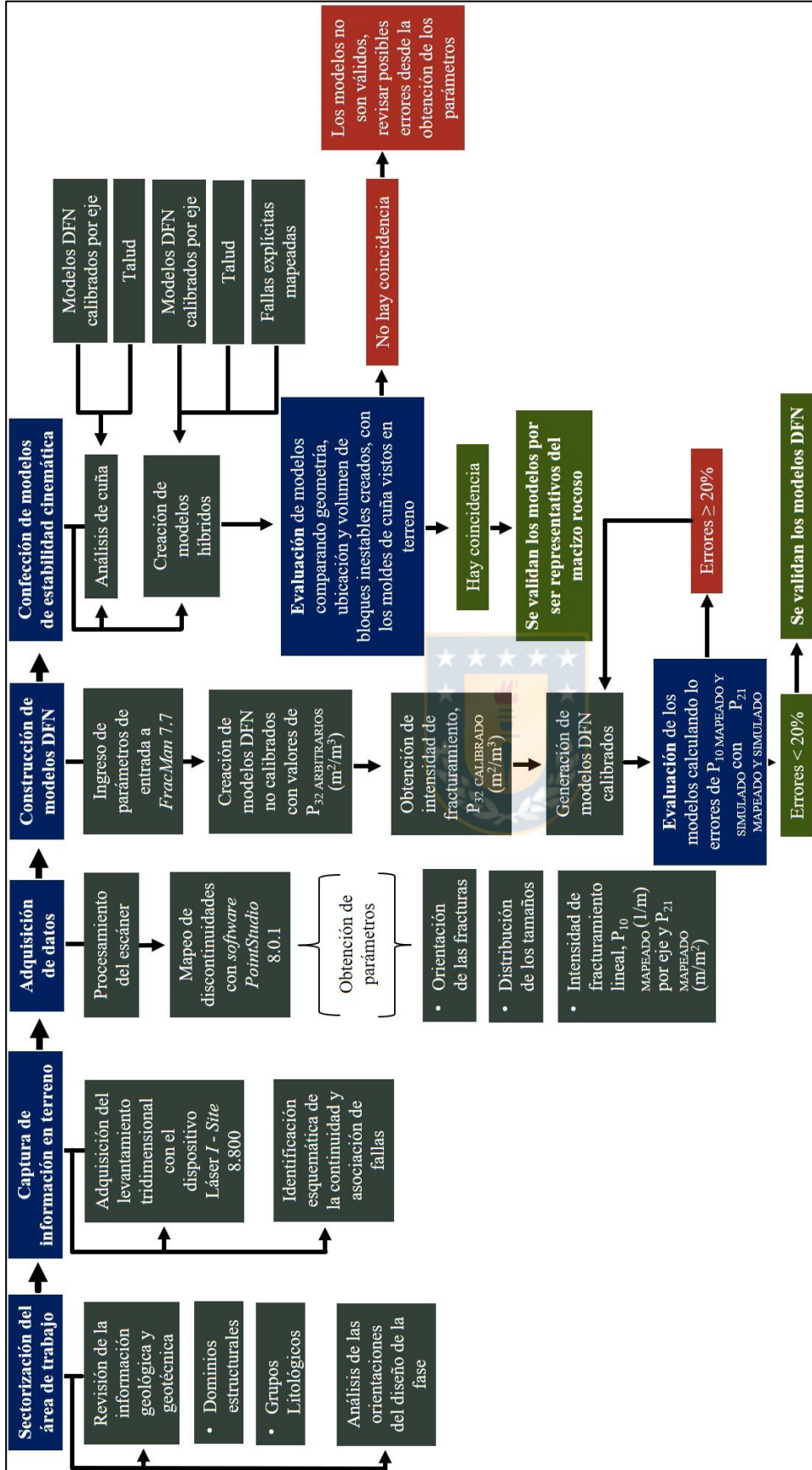
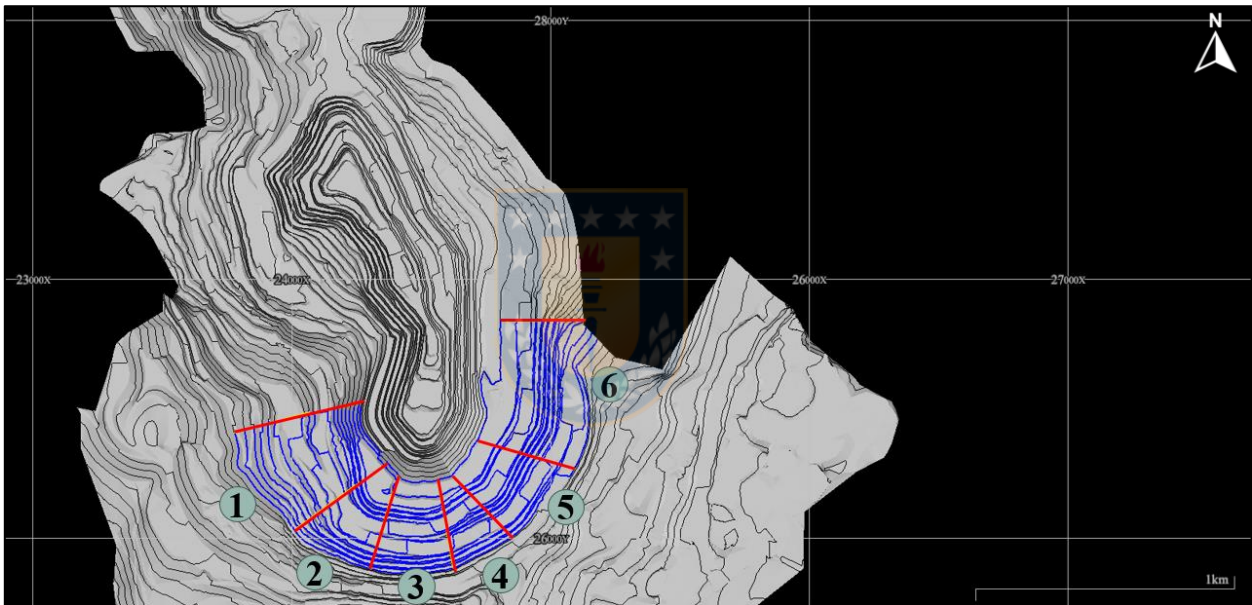


Figura 4.1: Diagrama de flujo del trabajo. Representa las distintas etapas en las que se logró la construcción evaluación de modelos DFN.

## 4.2. Captura de información en terreno

### 4.2.1. Sectores elegidos

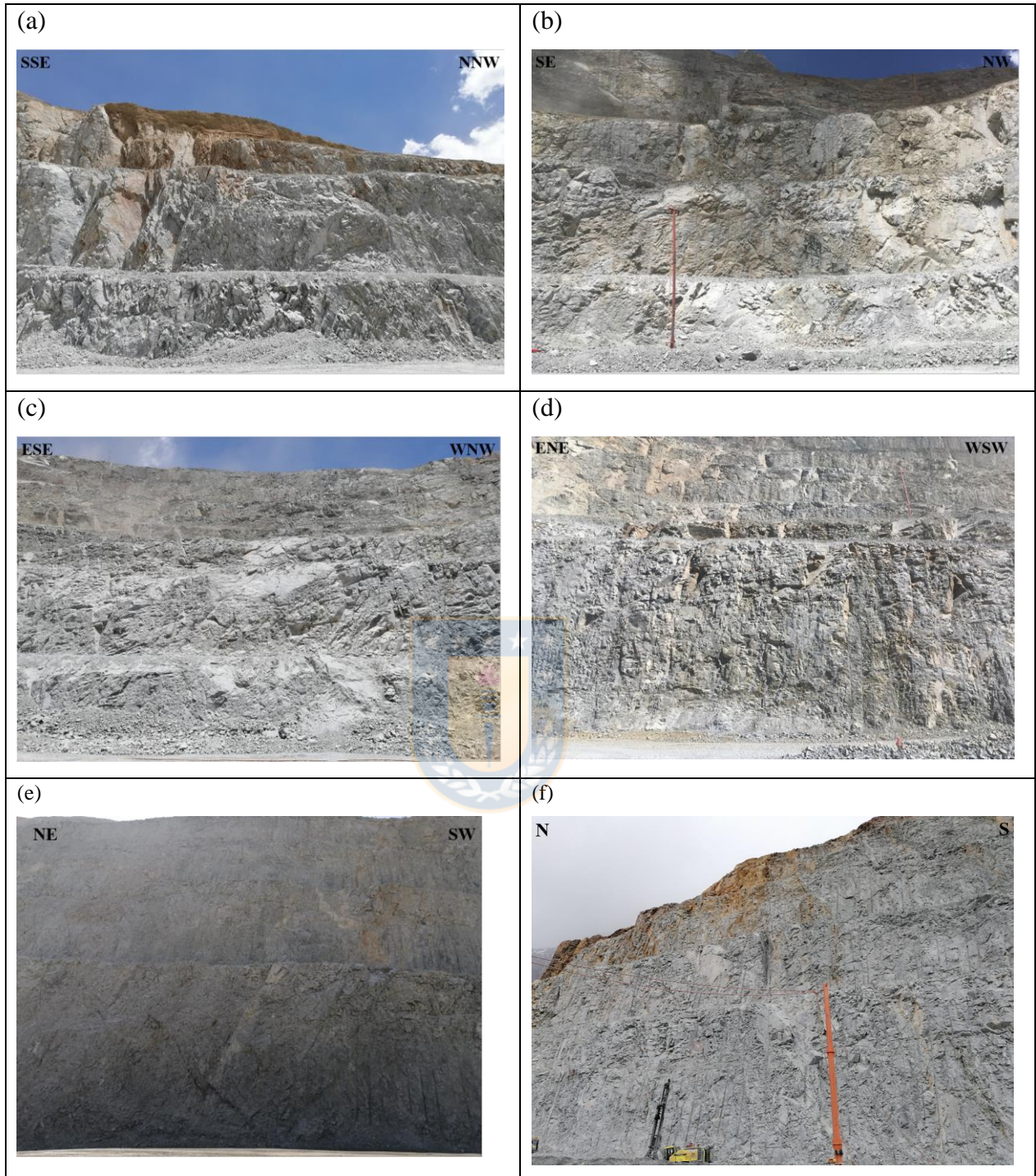
El área de estudio fue dividida en seis sectores (Figura 4.2), en cada uno de ellos se realizó un levantamiento tridimensional y dentro de él una o dos ventanas de mapeo (dependiendo de las características de los bancos), de donde se obtuvieron los parámetros para la construcción de un modelo DFN, es decir, por cada sección se construyó un modelo que fuera representativo de la arquitectura interna de todo el sector.



**Figura 4.2: Sectorización del área de trabajo.** El sector azul corresponde a F5 DS y las líneas rojas son las divisorias de los distintos sectores. Cada una de las cuales corresponde a la bisectriz de las orientaciones de las caras de banco colindantes.

La sectorización se basó principalmente en los cambios en las orientaciones del diseño de la fase, siempre considerando la historia geológica del yacimiento. Las Fotografías 4.1 muestran los sectores donde se tomaron los levantamientos tridimensionales.





**Fotografía 4.1: Sectores en estudio.** En (a) sector I, ubicado en el Grupo Litológico Pórfidos, y bancos con azimut de  $353^\circ$ . (b) Sector II de Brechas Tobáceas, con orientación de  $294^\circ$ . (c) El sector III en Brechas y con  $278^\circ$  de azimut. (d) Sector IV con  $241^\circ$  y en Brechas Tobáceas. (e) y (f) Sectores V y VI con orientaciones azimutales de  $209^\circ$  y  $182^\circ$  respectivamente, ambos en Intrusivo Duro.

Los sectores I y VI tienen orientaciones en la cara de banco  $\sim N - S$ , por tanto, existió la posibilidad de crear un modelo DFN que representara ambos sectores. Sin embargo, las diferencias

geocronológicas de estas unidades (Pórfido Don Luis y Granodiorita Cascada respectivamente) provocó que fueran afectadas por eventos tectónicos distintos, PDL desarrolló estructuras ENE - WSW a E - W preferentemente, mientras que en GDCC predomina el sistema NE - SW. Motivo por el cual, se decidió establecer secciones distintas.

Los cambios en las orientaciones de los taludes de los sectores II, III y IV marcaron los límites para establecer diferentes sectores.

En tanto, que en el sector V además de presentar un quiebre en la orientación, mostró mayor proporción de estructuras de orientación NW - SE que el sector VI, a pesar de estar ambos en la misma unidad litológica, razones por las cuales se definió como un sector independiente.

Para evaluar el resto de la metodología, se utilizó a modo de ejemplo el sector I.

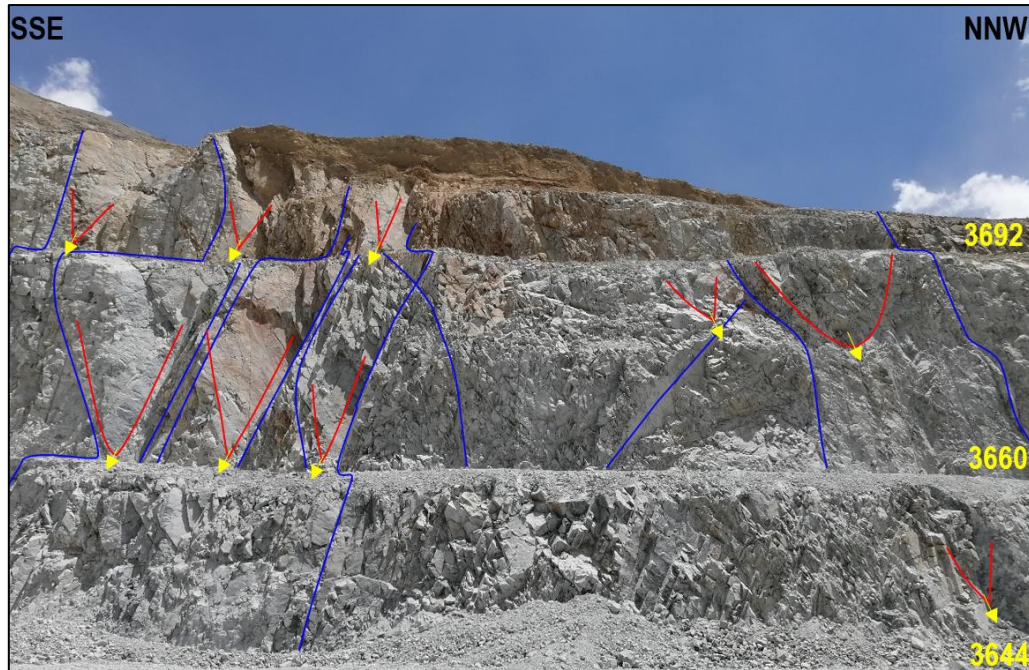
#### **4.2.2. Levantamiento tridimensional**

Para los escaneos realizados, se posicionó el equipo a distancias cercanas a 90 m de la pared, se utilizaron resoluciones de 8 o 16 *bytes*, lo que hizo variar el tiempo de captura entre 20 min a 1 h.

#### **4.2.3. Identificación esquemática de fallas**

Durante la toma de los levantamientos, se fotografió la pared escaneada y sus cercanías, de tal manera de tener una visión panorámica de los sectores. Sobre las imágenes se trazaron de manera esquemática las fallas, sus asociaciones y continuidades (Figura 4.3). También se registraron datos relevantes como la orientación de los bancos, si existían filtraciones, las coordenadas en la que se posicionó el equipo, la distancia del equipo a la pared, la resolución con la que se trabajó, la presencia de polvo en suspensión u ocurrencia de nevazones, y otros antecedentes que pudieran resultar importante al momento de procesar la información obtenida.





**Figura 4.3: Representación esquemática de las fallas del sector I.** En azul las trazas de fallas y en rojo se encuentran las zonas donde se forman inestabilidades, indicando (flecha amarilla) la dirección aproximada de caída. Los números amarillos corresponden a la cota de los bancos en m s.n.m.

### 4.3. Adquisición de datos

#### 4.3.1. Procesamiento de la imagen escaneada

Una vez escaneado el sector de interés, se importó la nube de puntos al *software PointStudio* donde se georreferenció la imagen. Para esto se incorporó un archivo de texto con las coordenadas (X, Y, Z) de la ubicación desde donde el dispositivo de detección hizo la toma del escaneo y de un punto de control. La coordinación se realizó por el nombre de los archivos (la nube de puntos y el archivo de coordenadas se llamaban de la misma manera), quedando la imagen posicionada en el sistema de referencia (Figura 4.4).

Posteriormente, se eliminaron aquellos puntos que no integraban parte de los bancos, por ejemplo, el polvo en suspensión, nieve o equipos mineros, lo que facilita posteriormente el procesamiento de los datos. Una vez limpia la imagen se creó una triangulación (Figura 4.5) de los puntos, generando la superficie sobre la cual se trabajó en las siguientes etapas.



**Figura 4.4:** Nube de puntos del sector I.



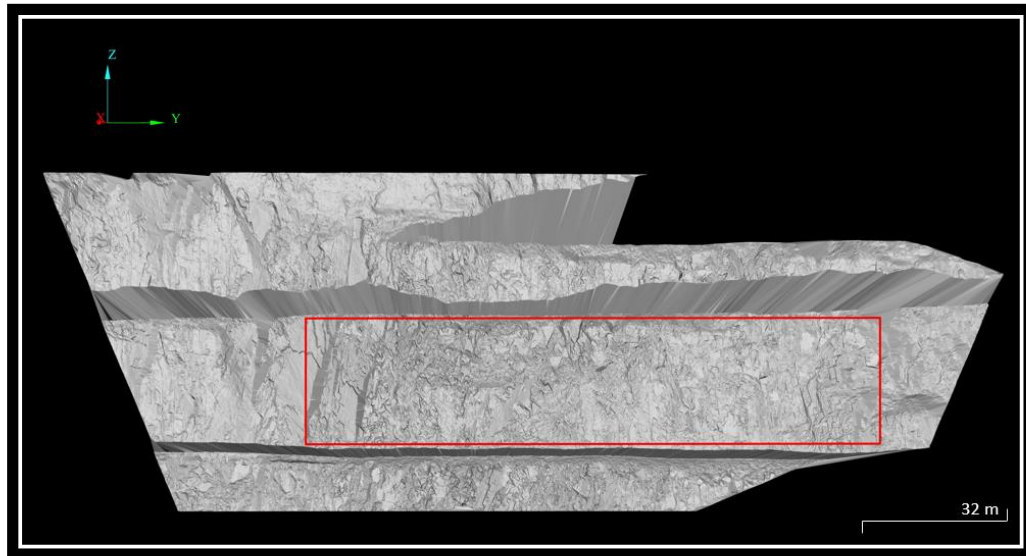
**Figura 4.5:** Triangulación de la nube de puntos del sector I.

### 4.3.2. Mapeo de discontinuidades

Una vez triangulada la nube de puntos, se buscó un área dentro de la imagen que resultara óptima para el mapeo de las discontinuidades. En el caso del escaneo de la Figura 4.6 se dibujó la ventana de mapeo de forma rectangular en el sector con mayor concentración de puntos y en el banco medio (cota 3.660 m s.n.m), que contenía más información tanto en la vertical como la horizontal, además, la ubicación de la celda permitió observar de manera más continua (hacia el banco superior e



inferior) la persistencia de las estructuras, reduciendo el sesgo por censura de tipo I.



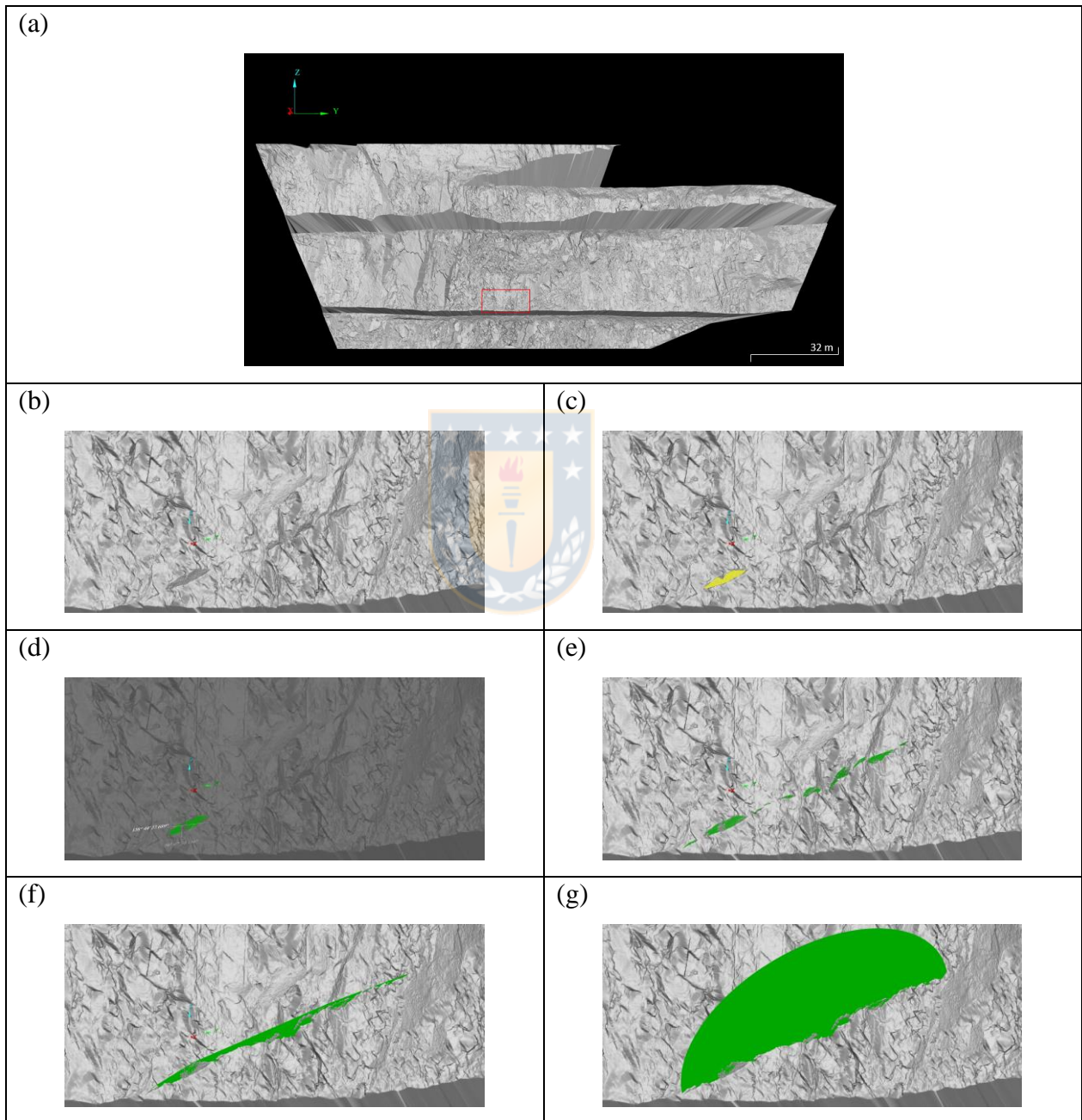
**Figura 4.6: Ventana de mapeo del sector I.**

La cantidad y dimensiones de las ventanas de mapeo fueron elegidas dependiendo de las condiciones del macizo y de la calidad de la información tomada por el láser, por lo que se excluyeron las patas de los bancos cubiertas con material, las crestas biseladas y las secciones con déficit de puntos.

De acuerdo con Priest (1993 en Zeeb *et al.*, 2013) se decidió mapear sobre 150 discontinuidades en las áreas de muestreo, considerando que de ellas ~50 % tuviera un inicio y final visible dentro de la ventana. Se mapearon todas las estructuras presentes dentro del área, sin importar que parte de ellas quedaran fuera del rectángulo, pero siempre considerando que tuvieran una longitud  $\geq 5$  m, medida establecida por Schulz (2019), de acuerdo con el tamaño de los bloques y discontinuidades que se busca modelar.

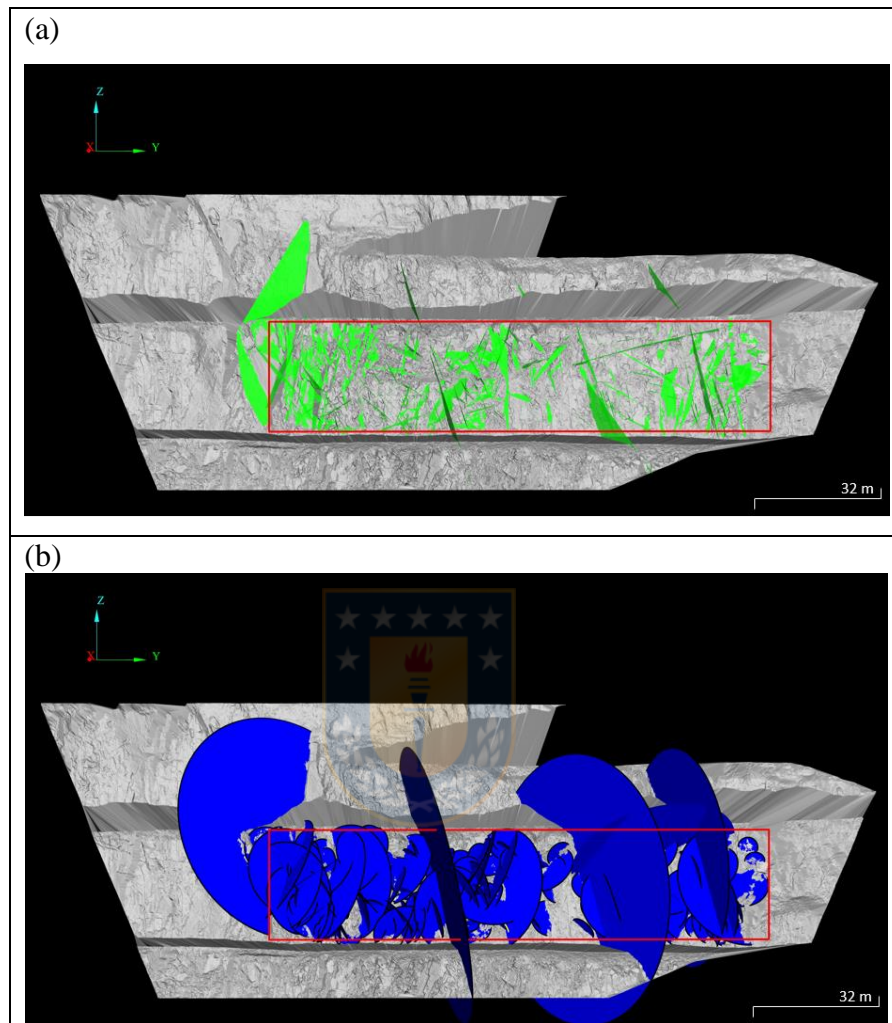
La formación de una discontinuidad a partir de la superficie triangulada (Figura 4.7) se realizó identificando todos los planos que forman una estructura. Para cada uno de ellos se seleccionaron los puntos que lo constituían y el *software* utilizando su módulo geotécnico calculó un plano promedio de dichos puntos, con rumbo y manto definido (la notación de *PointStudio* es *Right Hand* o Regla de la Mano Derecha), este procedimiento se repitió para todas las superficies que

pertenecían a esa discontinuidad. Posteriormente, se creó una triangulación de los planos que resulta en la forma final de la estructura. Sin embargo, para el cálculo de las intensidades de fracturas se construyeron discos estructurales, cuyo diámetro corresponde al largo máximo de la traza de la discontinuidad, quedando la fractura inscrita en la circunferencia.



**Figura 4.7: Pasos para la creación de un plano de discontinuidad.** En (a) el rectángulo rojo indica la zona de acercamiento, en (b) identificación de la discontinuidad, (c) selección de puntos de una superficie perteneciente a la fractura, (d) plano promedio calculado a partir de los puntos seleccionados, (e) conjunto de caras que forman la estructura, (f) y (g) plano y disco de la discontinuidad respectivamente.

El total de estructuras que se mapearon para el sector I se observa en la Figura 4.8 y corresponden a 205 discontinuidades.



**Figura 4.8: Discontinuidades mapeadas para el sector I.** En (a) planos de las discontinuidades y en (b) sus discos estructurales.

Al mapear se colocó atención en no confundir ciertas formas en el macizo con estructuras (medias cañas, sectores con evidencia de tronadura y rocas caídas), ya que esto conduce a múltiples errores en el cálculo de los parámetros necesarios para formar los modelos DFN.

Las 205 fracturas mapeadas para el sector I se exportaron de *PointStudio* como un archivo de texto personalizado, lo que incluyó datos de las coordenadas X, Y, Z (m) del centroide de cada discontinuidad, su manteo ( $^{\circ}$ ), dirección de manteo ( $^{\circ}$ ), rumbo ( $^{\circ}$ ), longitud (m), área ( $m^2$ ) y

nombre. Al abrir el archivo en una hoja de Excel, se ordenaron los datos según la longitud de las fracturas. Esto se realizó con la finalidad de corroborar que todas fueran  $\geq 5$  m. En este caso, no hubo discontinuidades de menor medida, pero si ocurriera se debe eliminar la estructura de *PointStudio* y de la base de información a incorporar al modelo.

#### 4.3.3. Obtención de las intensidades de fracturamiento lineal

Para el cálculo de  $P_{10}$  las estructuras mapeadas fueron separadas en tres grupos, dependiendo del eje coordenado al cual pertenecían. Si una discontinuidad cortó a un eje coordenado con un ángulo de incidencia  $\theta \geq 45^\circ$  (Figura 4.9), se asignó la estructura a dicho eje.

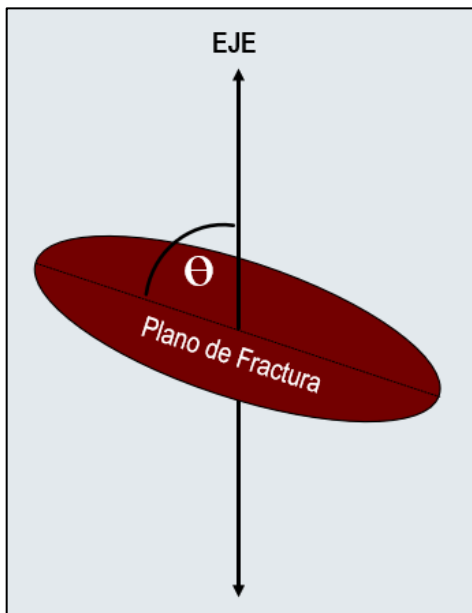
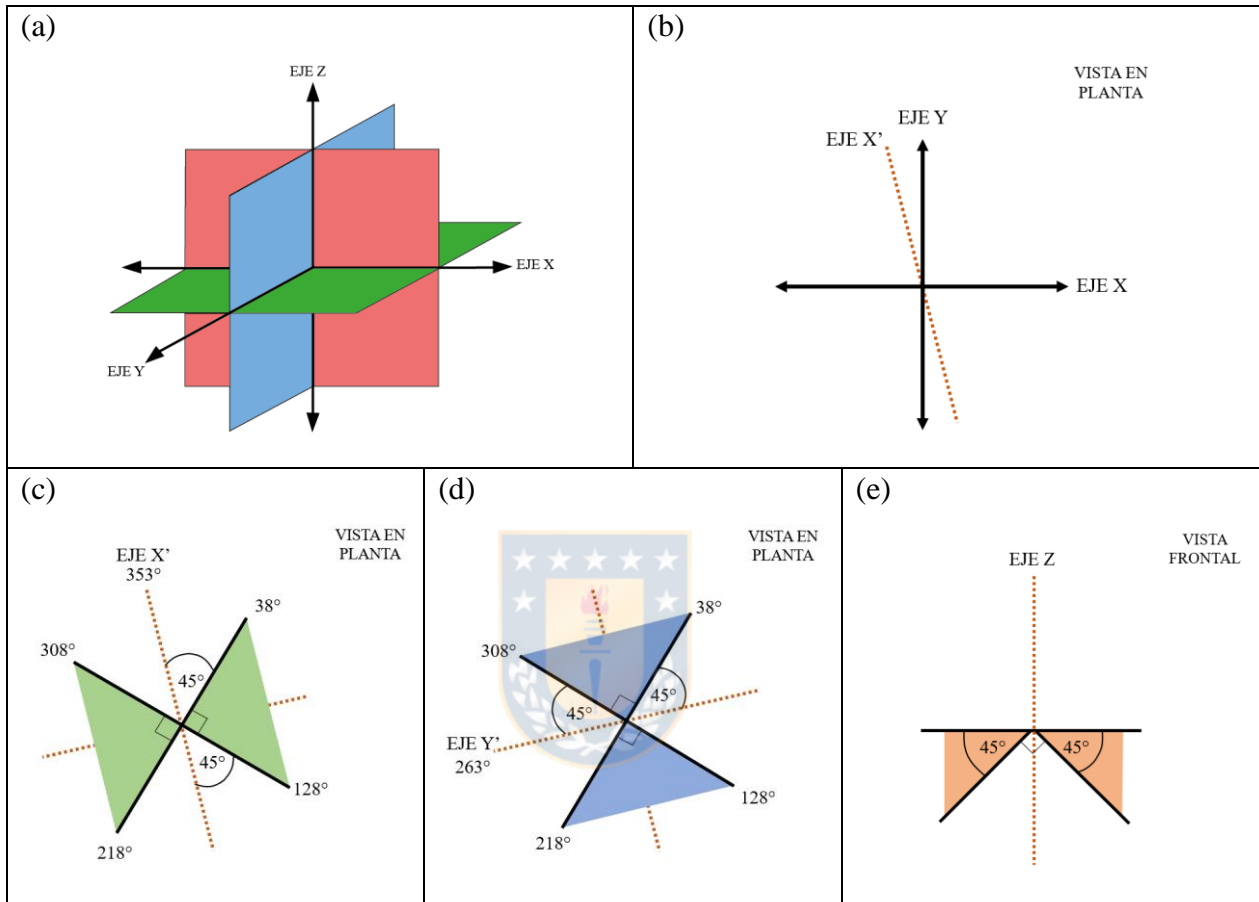


Figura 4.9: Ángulo de incidencia entre un plano de discontinuidad y un eje coordenado.

En un sistema coordenado (Figura 4.10) se definió en primera instancia la orientación del eje horizontal  $X'$ , como el azimut del banco en que se creó la ventana de mapeo, de manera perpendicular a este se posicionó el eje  $Y'$  y el eje  $Z$  se ubicó verticalmente. Se representó el talud en estudio en la Figura (c), con una orientación de  $353^\circ$  ( $X'$ ), posteriormente, se trazaron dos rectas ortogonales entre sí, con un ángulo de incidencia de  $45^\circ$  respecto de  $X'$ , los ángulos que marcaron dichas rectas corresponden a los límites entre los cuales se definieron las discontinuidades que pertenecían a este eje, es decir, las fracturas que se asignaron al eje  $X'$  fueron aquellas con rumbos  $\{ \geq 38^\circ \text{ y } < 128^\circ \}$  y  $\{ \geq 218^\circ \text{ y } < 308^\circ \}$ , siendo un total de 90 discontinuidades. El eje  $Y'$  tuvo azimut

de  $263^\circ$  y, por tanto, las 94 estructuras de este eje fueron aquellas que tenían orientaciones  $\{\geq 128^\circ$  y  $< 218^\circ\}$  y  $\{\geq 308^\circ$  y  $< 38^\circ\}$ . Finalmente, 21 fracturas se asignaron al eje Z y eran aquellas que tenían un manto  $< 45^\circ$ .



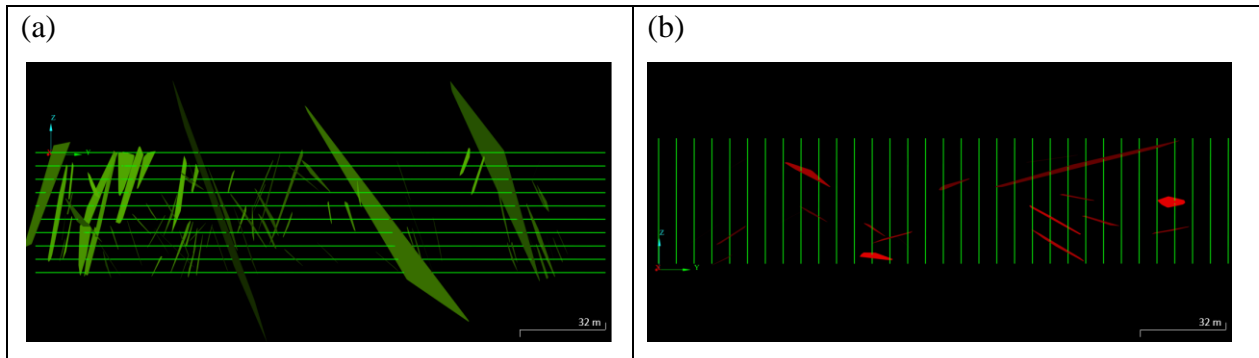
**Figura 4.10: Esquema de definición de ejes para las estructuras mapeadas.** En (a) sistema coordenado, en (b) definición del eje X', en (c) orientaciones entre las cuales las estructuras pertenecen al eje X', en (d) orientaciones entre las cuales las estructuras pertenecen al eje Y' y en (e) estructuras asignadas al eje Z.

Una vez que las discontinuidades fueron separadas, se procedió a calcular las frecuencias de fractura por eje coordenado. Para los ejes X' y Z se crearon, dentro de la ventana de mapeo, líneas de detalle horizontales equiespaciadas cada 3 m y verticales cada 4 m (Figura 4.11).

El cálculo de  $P_{10}$  por cada línea de detalle se obtuvo el cociente entre el número de discontinuidades que intersectaron una línea de detalle ( $N_i$ ) y el largo de esta ( $L$ ). Para el cálculo del  $P_{10}$  final correspondiente a cada eje se promedió la sumatoria de los cocientes, de acuerdo con el número de líneas de detalle ( $n$ ):

$$P_{10X,Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{L}}{n}$$

Los resultados de  $P_{10}$  para eje X' y Z se calcularon considerando que el largo de cada línea de detalle de X' fue de 128 m y de Z 28 m.



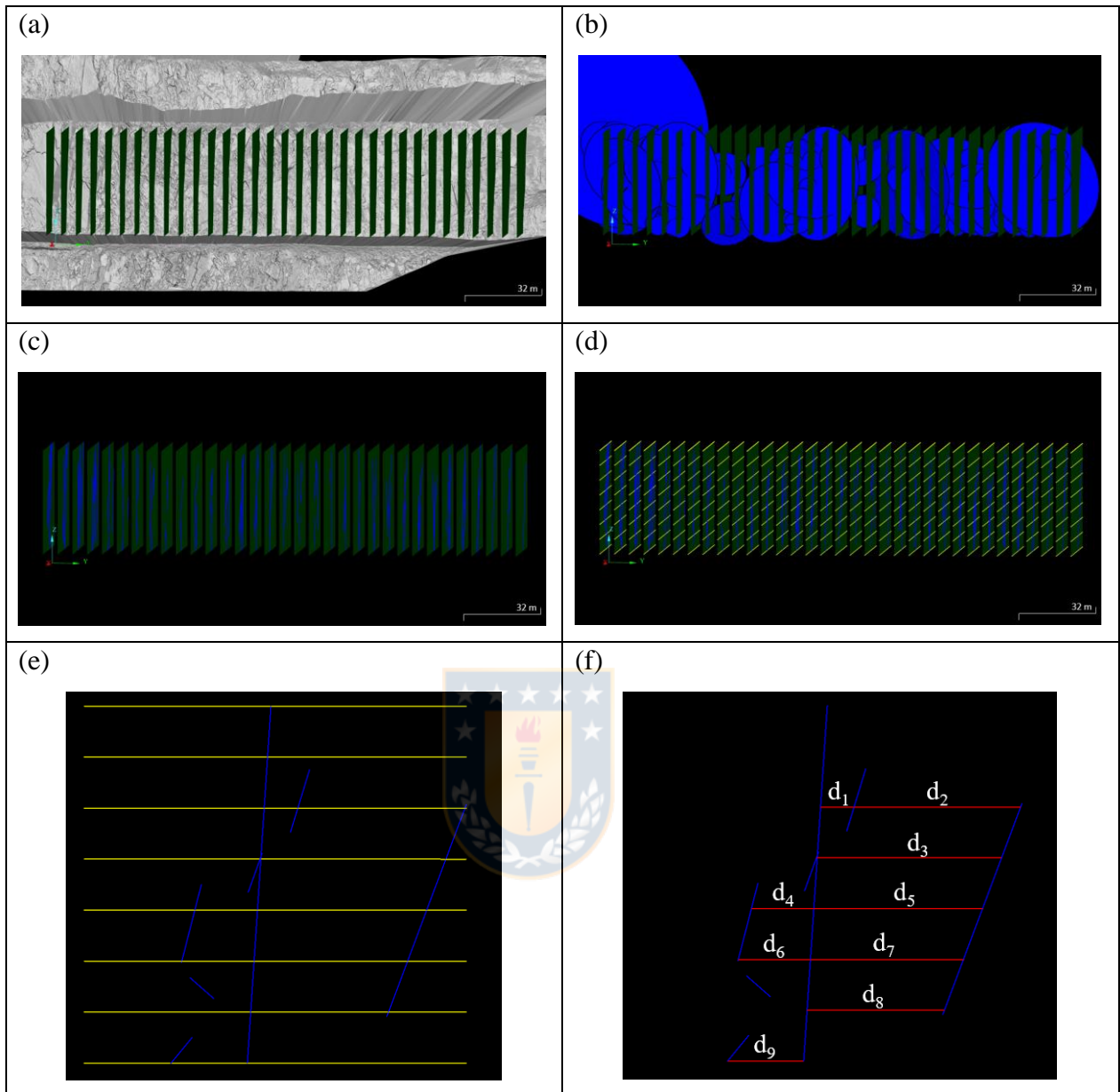
**Figura 4.11: Líneas de detalle para el cálculo de  $P_{10}$  de los ejes X' y Z.** En (a) discontinuidades mapeadas pertenecientes al eje X' y sus líneas de detalle, en (b) discontinuidades mapeadas pertenecientes al eje Y' y sus líneas de detalle.

La intensidad de fracturamiento lineal del eje Y' (Figura 4.12), se logra mediante el método de secciones transversales. El procedimiento consistió en crear planos perpendiculares al eje X' equiespaciados cada 4 m, los cuales fueron intesectados con los discos estructurales de las discontinuidades que pertenecían a este eje. Para realizar el cálculo se necesita medir el espaciamiento entre las trazas dejadas por la intersección, para lo cual se crearon líneas de detalle cada 4 m y las distancias se midieron solo en los pares de estructuras que atravesaban una misma línea de detalle.

El valor de  $P_{10}$  para eje Y', fue calculado como el inverso del espaciamiento promedio, correspondiente al cociente entre el número total de distancias medidas (N) y la sumatoria de estas distancias ( $d_i$ ).

$$P_{10Y} = \frac{N}{\sum_{i=1}^n d_i}$$





**Figura 4.12:** Pasos para el cálculo de  $P_{10}$  del eje  $Y'$  utilizando el método de secciones transversales. En (a) planos transversales, en (b) planos transversales intersectados con los discos estructurales del eje  $Y'$ , en (c) trazas de las intersecciones creadas, en (d) creación de las líneas de detalle, en (e) acercamiento a un plano, en (f) espaciamientos medidos entre pares de trazas a lo largo de cada línea de detalle.

#### 4.4. Construcción de modelos DFN

Los parámetros requeridos para el modelamiento de un DFN se obtuvieron de las discontinuidades que se mapearon del levantamiento tridimensional, de ellas se adquirieron los datos de orientación, longitud e intensidad, información fundamental para la correcta representación de las estructuras.



Estos parámetros se ingresaron a *FracMan* en tres archivos de texto separados por coma (CSV). Cada archivo se ordenó por columnas, la primera de ellas con un código que identificara el eje cual pertenecía el documento, seguido de los datos de orientación (manteo y dirección de manteo) de cada fractura, los largos estructurales y el espaciamiento promedio acumulativo. Este último dato se utilizó para simular la separación que existe entre una estructura y otra en un sondaje, valor que corresponde al inverso de  $P_{10}$ , que se sumó de manera acumulativa para el total de discontinuidades de cada eje.

#### 4.4.1. Creación del espacio de trabajo

Una vez importados los datos de entrada en *FracMan*, se procedió a crear el espacio de trabajo (Figura 4.13). Para ello se formó una región cúbica georeferenciada en el sector de estudio, cuyas dimensiones en este caso fueron de 120 m por lado (Figura 4.13 (a)), dentro de esta región se realizaron todos los conjuntos de fractura, modelos y análisis. Posteriormente, se incluyeron cilindros dentro de la región, a los que se le asignaron radios de 0,10 m con el objetivo de simular líneas de muestreo (sondajes) orientadas en las direcciones de los ejes definidos previamente. De este modo, se construyeron cinco sondajes con un azimut de  $353^\circ$  (eje X'), cinco con una orientación de  $263^\circ$  (eje Y') y cinco ubicados verticalmente (eje Z), procurando que todos tuvieran la misma longitud (100 m en este caso) para no sobreestimar o subestimar ningún eje. Las líneas de muestreo se emplearon para la calibración de los modelos, procedimiento que se explica en el siguiente apartado.

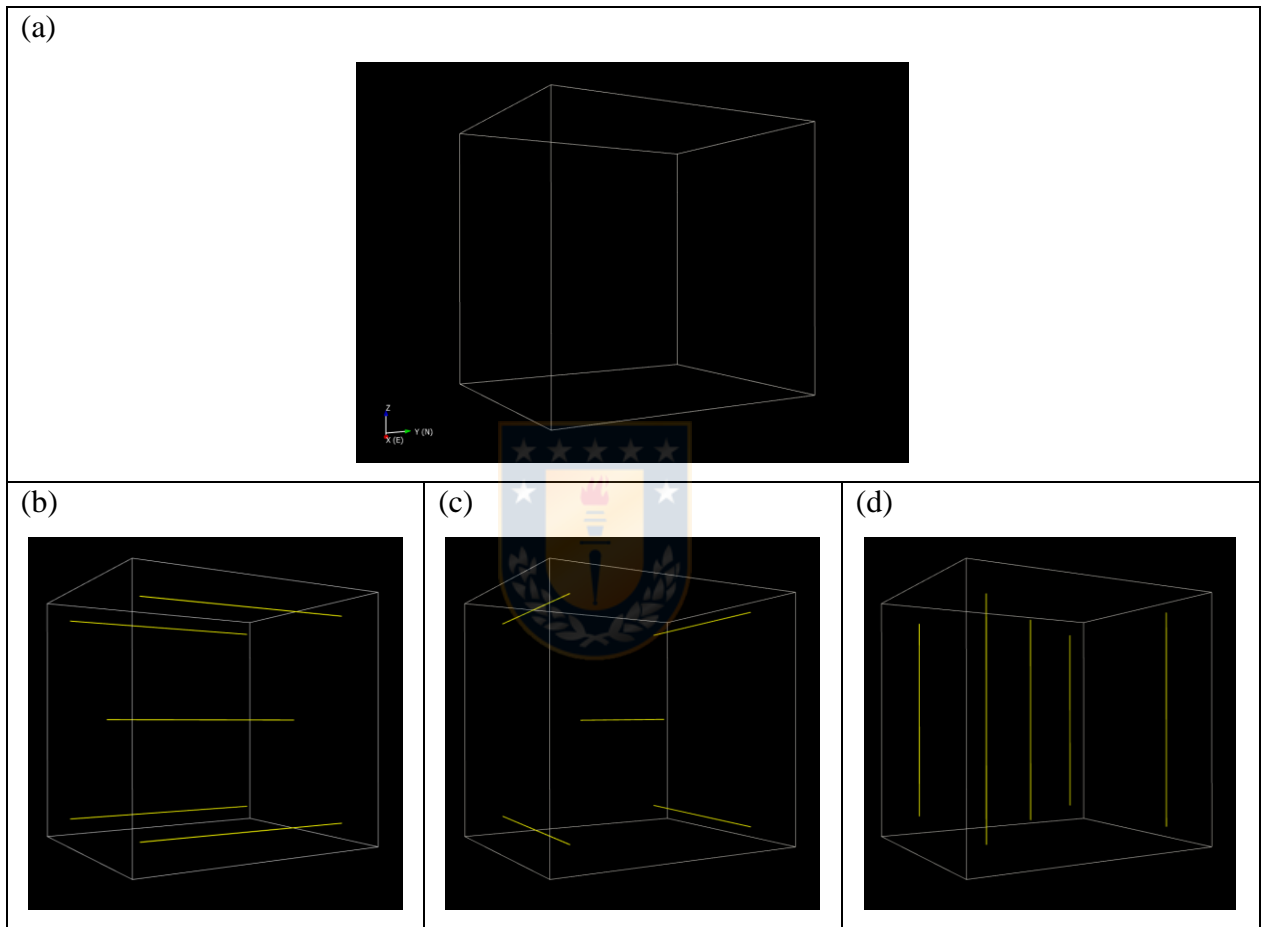
#### 4.4.2. Construcción de los modelos DFN no calibrados

Una vez establecido el espacio de trabajo, se procedió a crear los conjuntos de fractura para cada uno de los ejes coordenados. Los parámetros que se usaron para la construcción se detallan a continuación.

##### 4.4.2.1. Posicionamiento de las discontinuidades

Para el posicionamiento de las fracturas se utilizó el algoritmo *Enhanced Baecher*, basado en un

proceso de *Poisson*, para describir la geometría del arreglo estructural no es geológicamente correcto, ya que los procesos de fracturamiento son determinísticos y se deben a la mecánica y fallamiento de las rocas. No obstante, este proceso distribuyó de manera aleatoria las fracturas en el espacio de trabajo, lo que permitió dar una solución matemática a los arreglos estructurales (Herrera, 2012 en León, 2016).



**Figura 4.13:** Creación del espacio de trabajo en *FracMan*. En (a) creación del *Region Box* de trabajo, en (b) sondajes del eje X', en (c) sondajes del eje Y' y en (d) sondajes del eje Z.

#### 4.4.2.2. Orientación de las discontinuidades

En la simulación de las orientaciones se empleó el método del *bootstrapping*. Esta técnica de remuestreo permitió replicar las orientaciones de las discontinuidades mapeadas por eje, aumentando significativamente el número de estructuras muestreadas.

#### 4.4.2.3. Longitud de las discontinuidades

Para definir las distribuciones de probabilidad a incorporar en la construcción de los modelos DFN, se utilizó *EasyFit 5.6*, este *software* admite más de 50 distribuciones para realizar las pruebas de bondad de ajuste Chi Cuadrado, *Kolmogórov Smirnov* y *Anderson Darling*. El procediendo con el que se evaluaron los datos se describe a continuación.

En primer lugar, se eligieron las distribuciones con las que se hicieron las pruebas de bondad. *FracMan* dispone de siete funciones (*Pareto*, Normal, Log Normal, Exponencial, *Gamma*, *Weibull* y Uniforme) para los modelamientos, por tanto, solo se seleccionaron estas en *EasyFit*. Los ajustes se efectuaron para las pruebas  $X^2$  y K - S ya estas son válidas para tamaños muestrales medios, como los utilizados en este estudio (~190 estructuras). Una vez seleccionadas estas opciones, se ingresaron las 205 longitudes de las discontinuidades mapeadas para este sector.

Para ambas pruebas se estableció la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la alternativa ( $H_1$ ), y se trabajó con un nivel de significancia de 0,02, por tanto, se aceptó un error máximo de 2 %. Posteriormente, se evaluó el ajuste de las distribuciones, proceso que el *software* realiza de manera automatizada.

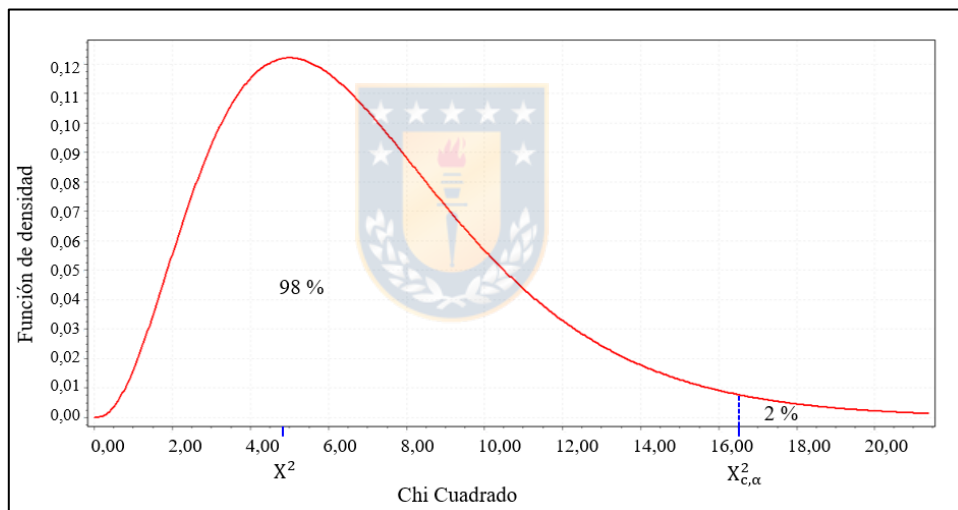
Para la prueba Chi Cuadrado (Tabla 4.1), *EasyFit* creó ocho categorías, es decir, consideró siete grados de libertad, y calculó los valores de los estadísticos  $X^2$  para cada función. De acuerdo con estos, solo la distribución *Pareto* presentó un valor menor que el estadístico crítico  $X_{c,\alpha}^2$  (Gráfico 4.1), es decir, se encuentra dentro del 98 % de los datos que se distribuyen bajo esta función, por tanto, se aprobó la hipótesis nula. Conclusión que corroboró el cálculo del valor p, que solo fue mayor que el nivel de significancia en esta distribución.

El proceso resultó similar al evaluar la prueba K - S (Tabla 4.2), donde solo el estadístico de la distribución *Pareto* fue menor que el valor  $D_{n,\alpha}$ , por tanto, la hipótesis nula fue aceptada para esta función y rechazada para el resto en estudio, lo que fue corroborado por el valor p.

De acuerdo con ambas pruebas de bondad, los datos se ajustaron adecuadamente a la distribución *Pareto*, lo que se puede visualizar en el histograma del Gráfico 4.2.

**Tabla 4.1: Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado para los datos estructurales del sector I.**

Distribución	Chi Cuadrado, $\alpha = 0,02$				
	$X^2$	$c$	$X_{c,\alpha}^2$	Valor p	$H_0$
<b>Pareto</b>	4,97	7	16,62	0,66	Aceptada
<b>Lognormal</b>	26,82	7	16,62	$3,59 \times 10^{-4}$	Rechazada
<b>Weibull</b>	39,30	7	16,62	$1,71 \times 10^{-6}$	Rechazada
<b>Normal</b>	51,36	7	16,62	$7,81 \times 10^{-9}$	Rechazada
<b>Gamma</b>	61,89	7	16,62	$6,32 \times 10^{-11}$	Rechazada
<b>Exponencial</b>	87,87	7	16,62	$3,33 \times 10^{-16}$	Rechazada
<b>Uniforme</b>	-				No aplica



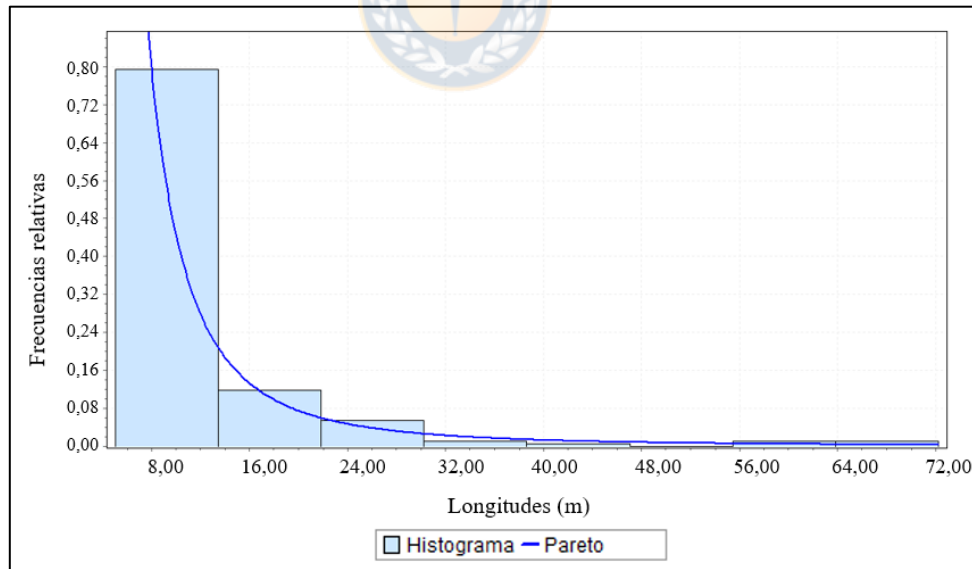
**Gráfico 4.1: Función de densidad de la distribución Chi Cuadrado, sector I.** Con el valor crítico  $X_{c,\alpha}^2$  para un nivel de significancia de 0.02 y con un estadístico para la distribución *Pareto* de 4.97, lo que permite aceptar la hipótesis nula.

Como se mencionó anteriormente, la distribución *Pareto* se conoce en *FracMan* como *Power Law* y se representa mediante los estadísticos  $x_{\min}$  y exponente  $D$  ( $D$ ). Para conocer estos valores se ajustaron las longitudes de todas las estructuras a la curva que describe dicha función, de manera automática el *software* indicó los valores de los parámetros y describió el ajuste de la curva al histograma mediante los valores Chi Cuadrado y significancia, un alto valor de significancia y un bajo valor de Chi Cuadrado indican un mejor ajuste (Gráfico 4.3(a)). Además,

en el Gráfico 4.3(b) la línea de la distribución ajustada (azul) representa la distribución con los parámetros estimados a partir de la muestra y se ilustra que sigue a la línea de distribución empírica, entonces los datos se ajustan adecuadamente.

**Tabla 4.2: Prueba de bondad de ajuste *Kolmogórov Smirnov* para los datos estructurales del sector I.**

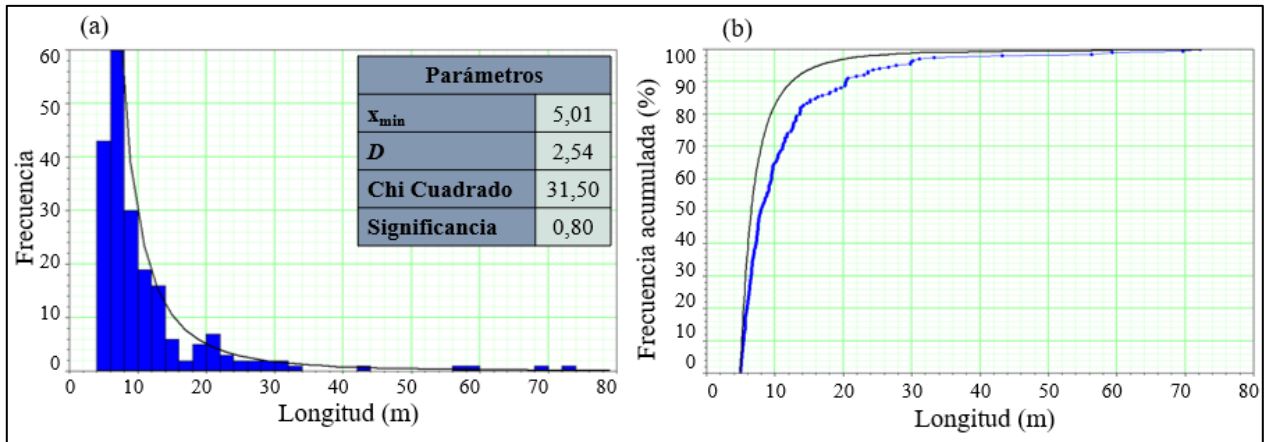
Distribución	Kolmogórov Smirnov, $n = 205$ ; $\alpha = 0,02$			
	$D$	$D_{n,\alpha}$	Valor p	$H_0$
<b>Pareto</b>	0,06	0,11	0,44	Aceptada
<b>Lognormal</b>	0,13		$2,33 \times 10^{-3}$	Rechazada
<b>Weibull</b>	0,18		$4,57 \times 10^{-6}$	Rechazada
<b>Normal</b>	0,26		$2,16 \times 10^{-12}$	Rechazada
<b>Gamma</b>	0,30		$3,12 \times 10^{-16}$	Rechazada
<b>Exponencial</b>	0,36		0	Rechazada
<b>Uniforme</b>	0,31		$5,26 \times 10^{-18}$	Rechazada



**Gráfico 4.2: Función de densidad de probabilidad para la función *Pareto*, sector I.** En el histograma se observa la distribución *Pareto* como una curva continua adecuadamente ajustada según el número de intervalos.

Al formar el conjunto de fracturas se especificó que los largos estructurales se distribuyen mediante

la función *Power Law* y se definieron los valores de los estadísticos, además, la función fue dividida en 2, ya que *FracMan* trabaja con el radio equivalente de las discontinuidades, correspondiente al radio de un círculo con un área igual a la de un polígono.



**Gráfico 4.3: Ajustes de los largos estructurales del sector I a la función *Power Law*.** En (a) función de densidad y sus estadísticos en (b) función de distribución acumulada.

#### 4.4.2.4. Forma de las discontinuidades

Se trabajó con fracturas simuladas por polígonos planos de seis lados, para asemejar la estructura a una geometría de disco, sin aumentar excesivamente el tiempo de procesamiento del modelo.

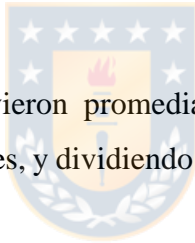
#### 4.4.2.5. Intensidad de las discontinuidades

*FracMan* dispone de distintos parámetros a partir de los cuales se puede definir la intensidad de fracturamiento, estos son  $P_{32}$ ,  $P_{33}$ , el número de fracturas (NF) o la frecuencia de fracturas ( $P_{10}$ ). Para la construcción de los modelos DFN, se propuso utilizar el parámetro  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ) ya que tiene la ventaja de ser independiente de la orientación y distribución del tamaño de las fracturas, mientras que  $P_{10}$  y  $P_{21}$  (datos obtenidos del mapeo) son dependientes de la orientación y formas de las estructuras. Sin embargo y como se mencionó en capítulos anteriores la intensidad de fracturamiento volumétrico no se puede obtener en terreno, por lo que aprovechando la correlación lineal entre  $P_{10}$  y  $P_{32}$  (Dershowitz & Herda, 1992 en León, 2016) se determinaron los valores de cada conjunto de fracturas mediante simulaciones estocásticas.

Al desconocer los valores  $P_{32}$  de cada eje coordenado, los primeros modelos (no calibrados), se crearon usando tres valores arbitrarios de intensidad de fracturamiento volumétrico, considerando que estos datos estuvieran lo suficientemente dispersos para lograr una correcta correlación. Para los casos en estudio se consideraron los valores  $0,01 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$ ,  $0,10 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$  y  $0,50 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$ , con cada uno de ellos se crearon modelos DFN de los ejes horizontal, transversal y vertical (Figura 4.14), usando los parámetros descritos en los apartados anteriores.

#### 4.4.3. Construcción de modelos DFN calibrados

Para calibrar los valores de  $P_{32}$  y construir los modelos DFN finales se calcularon los  $P_{10}$  simulados de cada uno de los conjuntos de fractura no calibrados. El procedimiento consistió en intersectar los *sets* de cada eje con las líneas de muestreo correspondientes. En la Figura 4.15 se tomó como ejemplo el conjunto creado para el eje Z con intensidad de fracturamiento volumétrica igual a  $0,1 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$ .



Los resultados (Tabla 4.3) se obtuvieron promediando el número de estructuras que fueron intersectadas por los sondajes verticales, y dividiendo este valor en el largo de la línea de muestreo.

Este procedimiento se repitió para cada *set*, obteniendo un valor de intensidad de fracturamiento lineal asociado a cada uno de los valores de intensidad de fracturamiento volumétrico (Tabla 4.4).

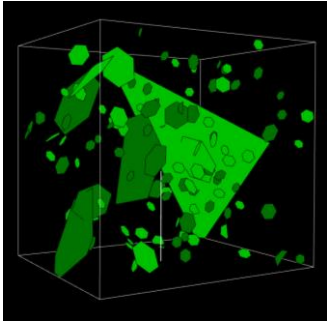
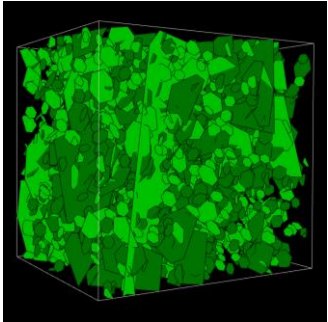
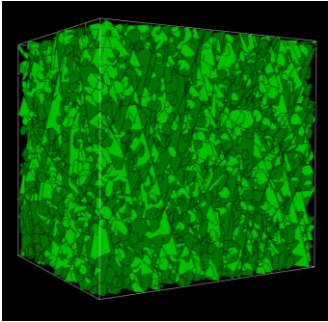
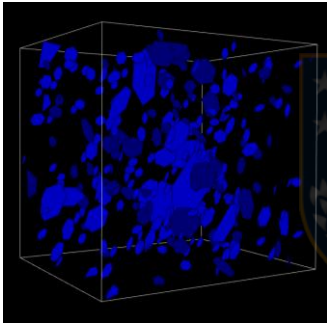
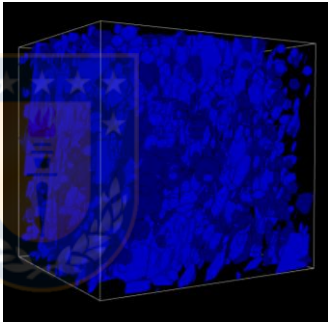
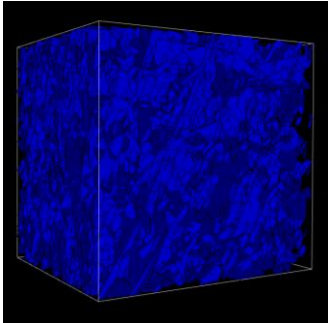
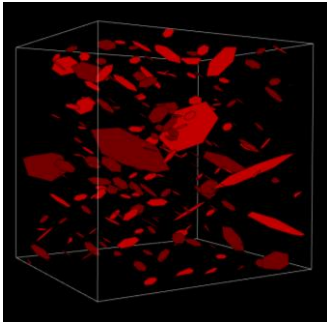
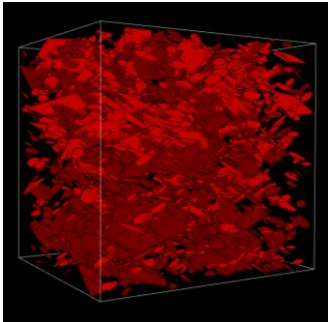
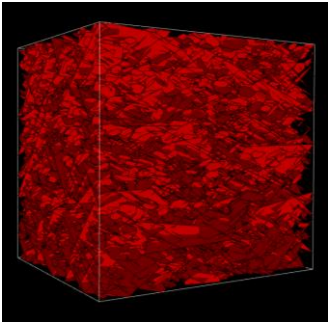
Con estos datos se crearon los Gráficos 4.4, 4.5 y 4.6, para los ejes X', Y' y Z respectivamente. Las líneas de tendencia arrojaron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) con valores cercanos a 1, lo que evidenció la relación lineal existente entre ambos parámetros, por tanto, se utilizaron en el cálculo de los valores de  $P_{32}$  calibrados. Las intensidades de fracturamiento volumétricas calibradas se consiguieron reemplazando los valores de  $P_{10 \text{ MAPEADO}} \text{ (1/m)}$ , en las ecuaciones de las rectas de las líneas de tendencia. Una ecuación de la recta tiene la forma:

$$y = mx + n$$

Donde,  $y$  corresponde al valor de  $P_{10 \text{ MAPEADO}}$ , y  $x$  a  $P_{32 \text{ CALIBRADO}}$ , mientras que  $m$  y  $n$  varían para

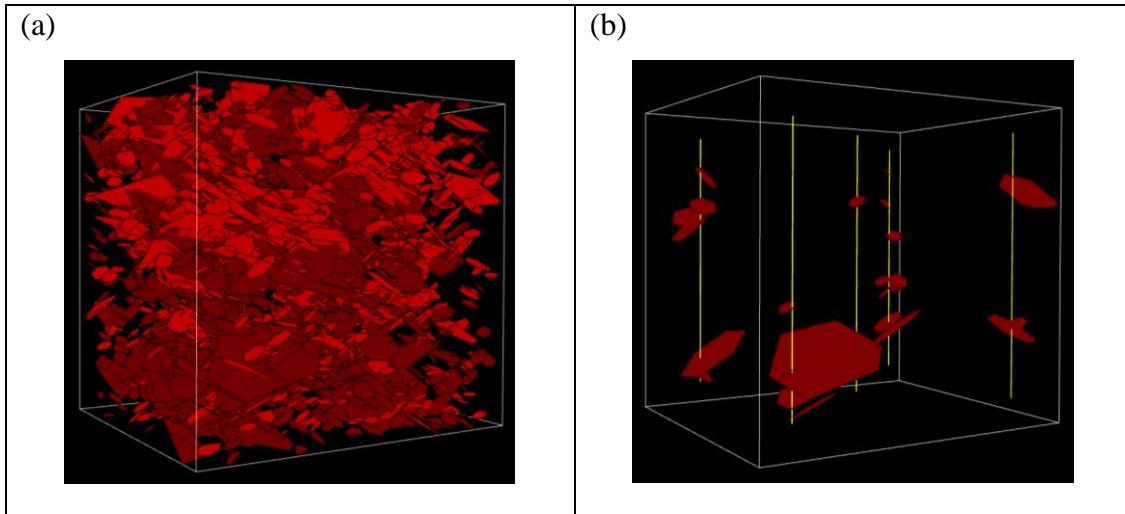


cada caso.

	$P_{32}$ ARBITRARIO ( $m^2/m^3$ )		
	0,01	0,10	0,50
Eje X'	(a) 	(b) 	(c) 
Eje Y'	(d) 	(e) 	(f) 
Eje Z	(g) 	(h) 	(i) 

**Figura 4.14: Modelos DFN no calibrados, sector I.** Modelos creados a partir valores  $P_{32}$  arbitrarios, en (a), (b) y (c) modelos pertenecientes al eje X', en (d), (e), (f) modelos del eje Y' y en (g), (h) e (i) modelos del eje Z.

Los resultados obtenidos para cada eje coordenado se muestran en la Tabla 4.5.



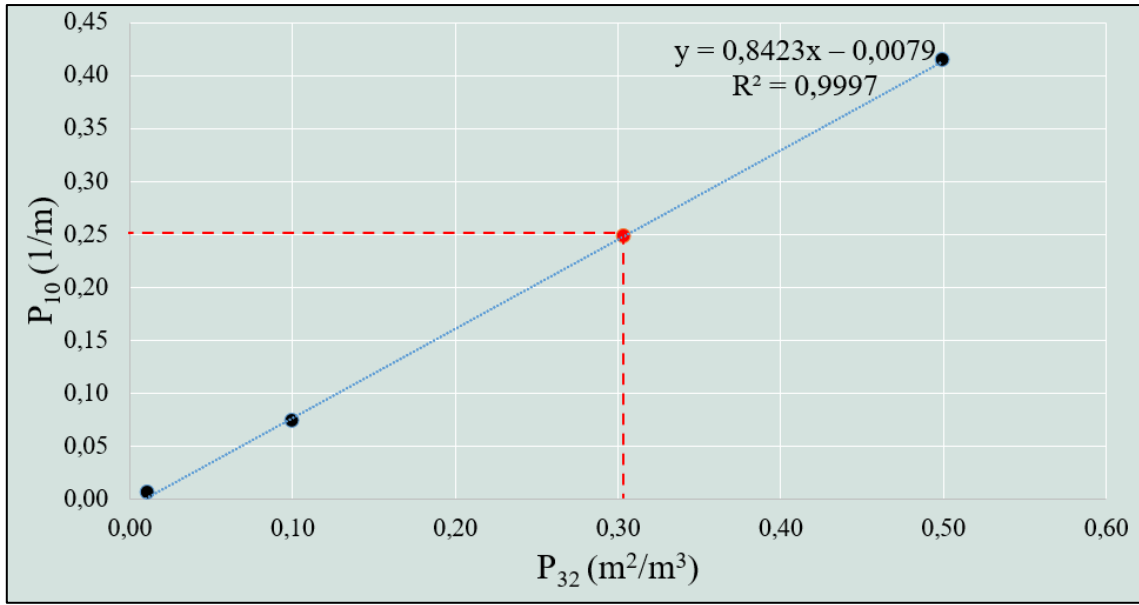
**Figura 4.15: Ejemplo de medición de la frecuencia de fractura en modelos DFN.** En (a) conjunto de fractura y en (b) sondajes pertenecientes al eje Z intersectados con el conjunto de fractura.

**Tabla 4.3: Cálculo de la frecuencia de fractura, sector I.**

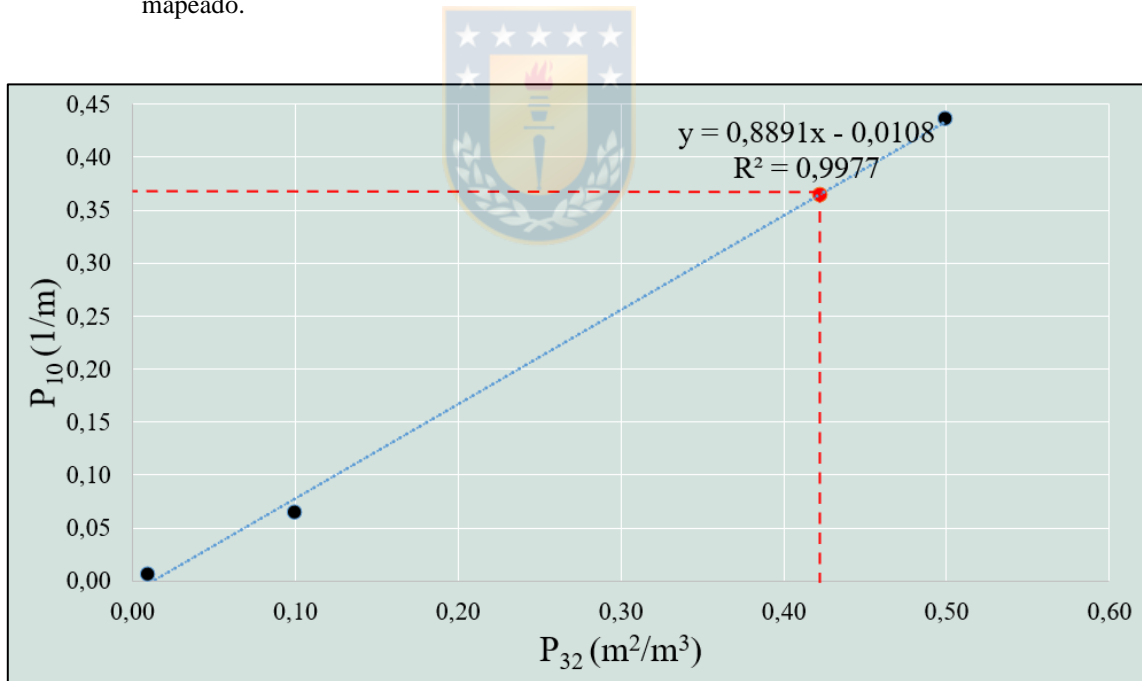
Líneas de muestreo (LM)	Número de discontinuidades
LM 1	6
LM 2	5
LM 3	2
LM 4	9
LM 5	3
<b>Promedio</b>	5
<b>Longitud de LM (m)</b>	100
<b>P<sub>10</sub> SIMULADO (1/m)</b>	0,05

**Tabla 4.4: Valores P<sub>32</sub> y P<sub>10</sub> para cada modelo DFN no calibrado del sector I**

Modelos DFN no calibrados		P <sub>10</sub> SIMULADO (1/m)		
		Eje X'	Eje Y'	Eje Z
P <sub>32</sub> ARBITRARIO s (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	0,01	0,00	0,01	0,01
	0,10	0,07	0,07	0,05
	0,50	0,41	0,44	0,28



**Gráfico 4.4:** Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  para el eje X' del sector I. Cada punto negro corresponde a un valor  $P_{10}$  simulado para cierto valor de  $P_{32}$  elegido arbitrariamente. El punto rojo corresponde al valor ajustado de  $P_{32}$  obtenido del valor de  $P_{10}$  mapeado.



**Gráfico 4.5:** Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  para el eje Y' del sector I.

Una vez ajustados los valores de  $P_{32}$  se crearon los modelos DFN calibrados (Figura 4.16), cambiando los valores de las intensidades según correspondía y conservando los parámetros de posicionamiento, orientación, tamaño y forma de las discontinuidades.

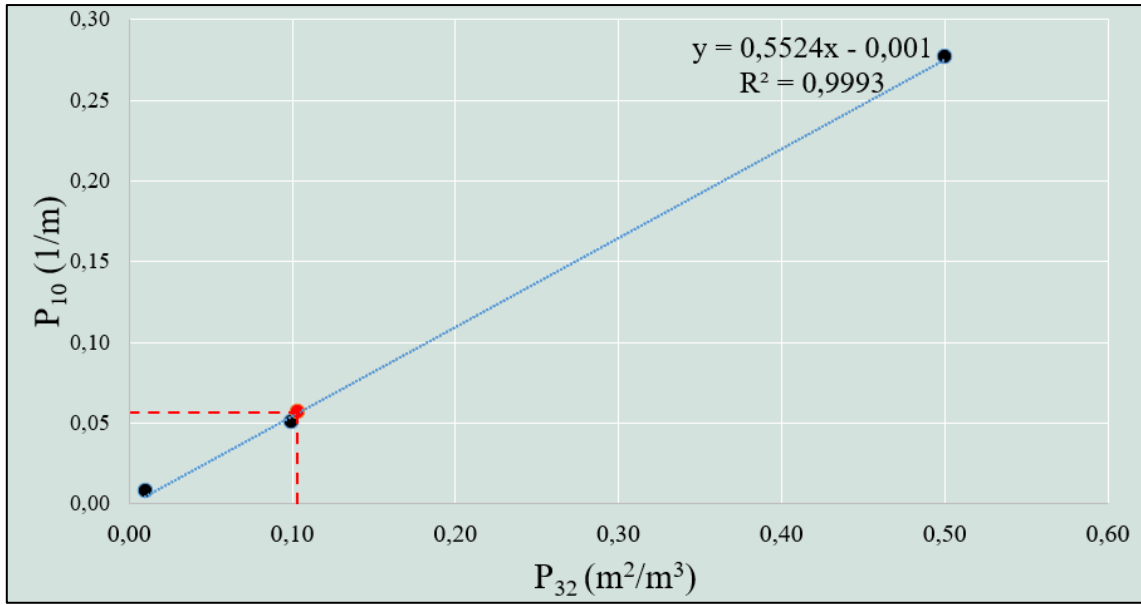


Gráfico 4.6: Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  para el eje Z del sector I.

Tabla 4.5: Resultados de  $P_{32}$  CALIBRADOS por eje, sector I.

	$P_{10}$ MAPEADOS (1/m)	$P_{32}$ CALIBRADOS ( $m^2/m^3$ )
Eje X'	0,25	0,30
Eje Y'	0,36	0,42
Eje Z	0,06	0,10

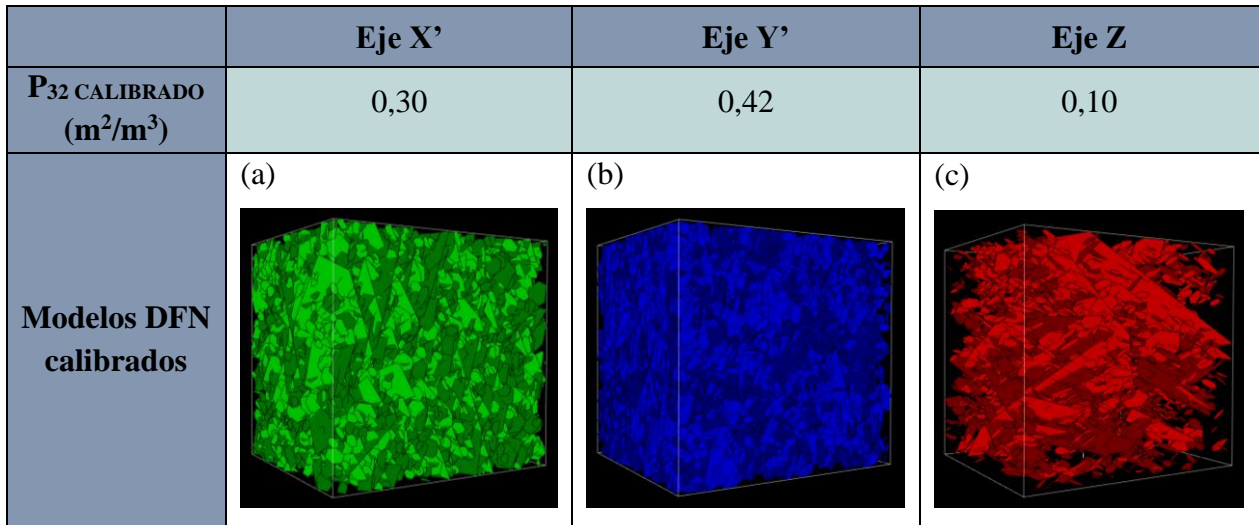


Figura 4.16: Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector I.

Por tanto, el modelo DFN final (Figura 4.17) con el cual se realizaron los análisis de estabilidad se constituyó por los conjuntos de fractura de los tres ejes coordenados, con un  $P_{32 \text{ GLOBAL}}$  de 0,82 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ).

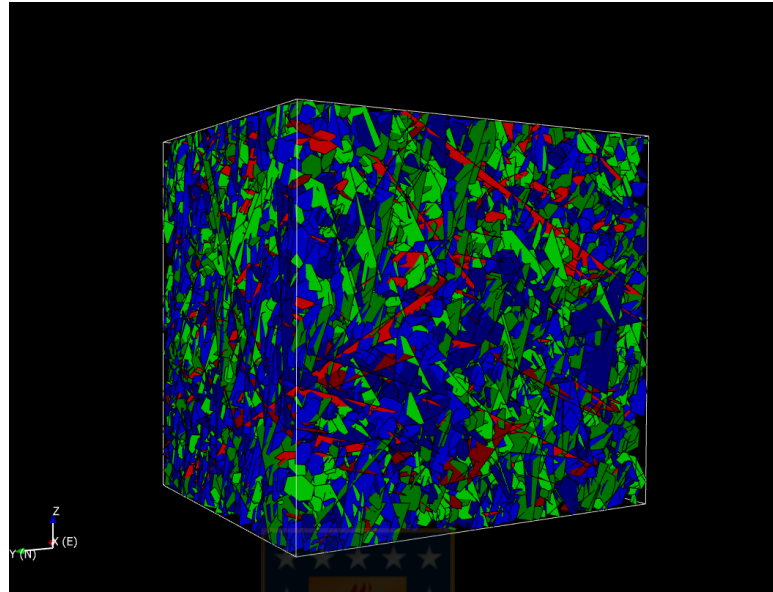


Figura 4.17: Modelo DFN calibrado para el sector I.

#### 4.4.4. Evaluación de los parámetros simulados

El modo de validar que las propiedades simuladas por los modelos DFN fueran representativas del macizo rocoso muestreado, consistió en analizar el *bootstrapping* de las discontinuidades formadas, los errores asociados a los cálculos de  $P_{10}$  y  $P_{21}$ , además, se compararon los histogramas de las trazas formadas en el cálculo de intensidad de fracturamiento areal para las discontinuidades mapeadas y los *sets* de discontinuidades simulados.

##### 4.4.4.1. Orientación de las discontinuidades

La evaluación del método *bootstrapping* consistió en comparar, utilizando diagramas de contornos y rosetas, las orientaciones por eje de las discontinuidades mapeadas con las de estructuras simuladas (Figura 4.18). Para todos los casos, se observó que ambas se distribuyen alrededor de los mismos polos, por tanto, las orientaciones de las fracturas de los modelos simulan

correctamente a las estructuras observadas.

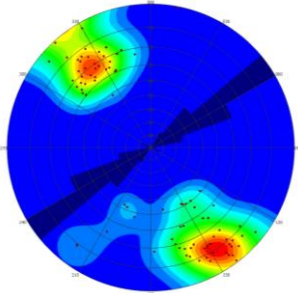
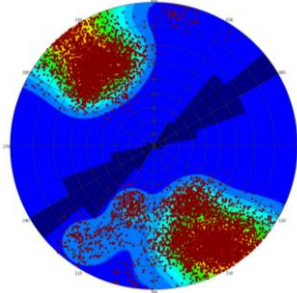
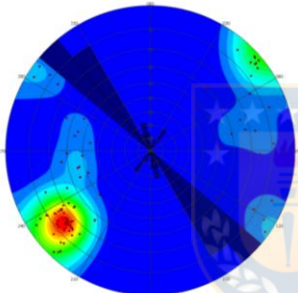
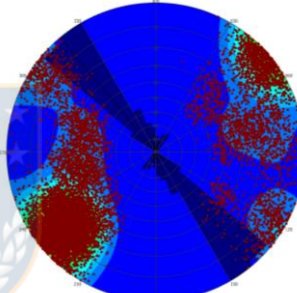
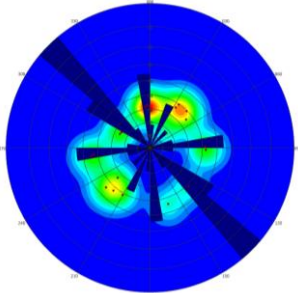
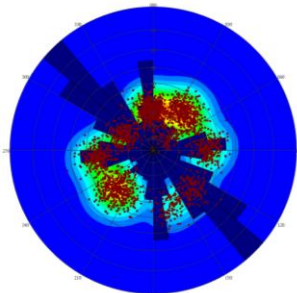
Número de discontinuidades mapeadas	Discontinuidades mapeadas	Discontinuidades simuladas	Número de discontinuidades simuladas
Eje X' 90	(a) 	(b) 	Eje X' 7.927
Eje Y' 94	(c) 	(d) 	Eje Y' 10.679
Eje Z 21	(e) 	(f) 	Eje Z 2.553

Figura 4.18: Validación del método de *bootstrapping* del sector I.

#### 4.4.4.2. Intensidad de las discontinuidades

Para determinar la representatividad de las intensidades ajustadas, se evaluaron cada uno de sus errores. Esto se calculó con la siguiente expresión:



$$\varepsilon = \left| \frac{Xi - Xv}{Xv} \right| * 100\%$$

Donde  $Xi$  corresponde a la medida simulada y  $Xv$  a la medida mapeada. La validación comenzó estimando los valores de  $P_{10 \text{ MODELADOS}}$  en los modelos calibrados, para lo cual se intersectaron las líneas de muestreo de los diferentes ejes, con los DFN correspondientes. Con los resultados (Tabla 4.6) se calcularon los errores de cada eje coordenado.

**Tabla 4.6: Errores del parámetro  $P_{10}$  (1/m) para el sector I.**

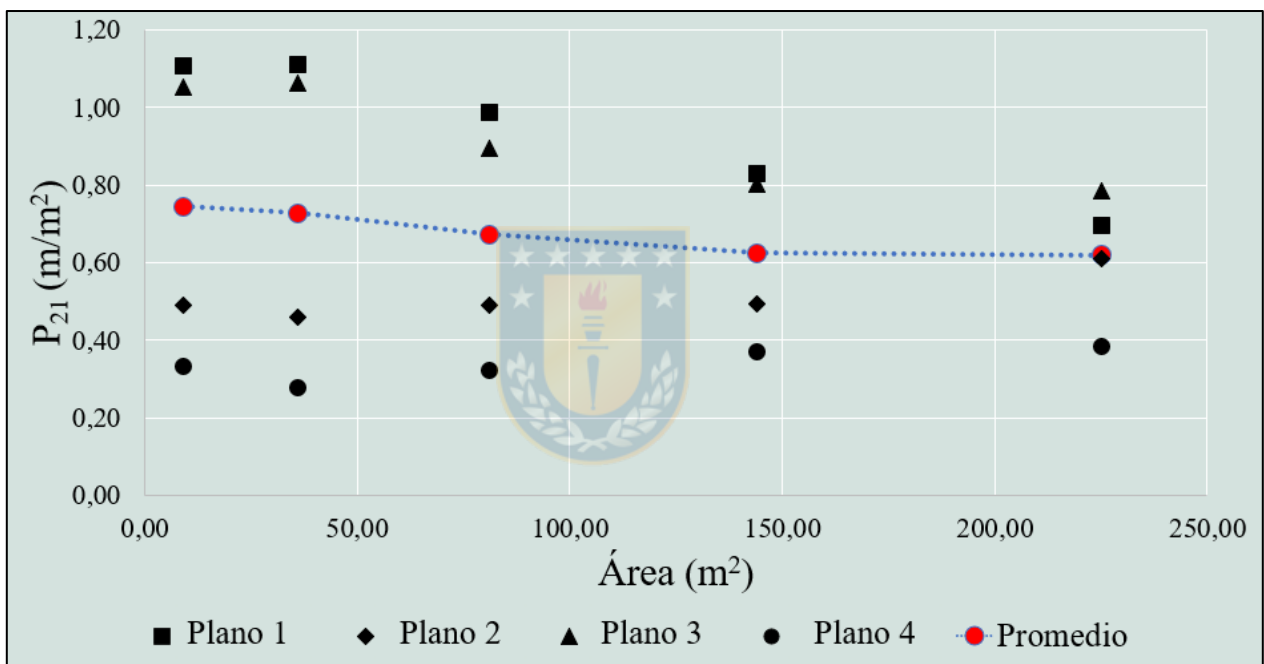
Eje	$P_{10 \text{ MAPEADOS}}$ (1/m)	$P_{10 \text{ MODELADOS}}$ (1/m)	Error (%)
X'	0,25	0,25	2,56
Y'	0,36	0,37	0,34
Z	0,06	0,06	0,49

En el cálculo de los errores asociados a la intensidad de fracturamiento areal ( $P_{21}$ ), se procedió en primera instancia a cuantificar el valor de este parámetro para las estructuras observadas, para esto se cuidó de no incluir zonas sin estructuras mapeadas (podría disminuir el valor de este parámetro y, por tanto, no sería representativo). Por este motivo, no se consideró intersectar las discontinuidades contra un plano de igual área que la ventana de mapeo, sino que se hizo un ejercicio basado en el efecto escala que González de Vallejo *et al.* (2002) describe como la variabilidad de las propiedades físicas de las rocas, consecuencia del carácter heterogéneo y discontinuo de los macizos rocosos, mencionando que en datos experimentales observó que a partir de determinado volumen de muestra los resultados de ciertos ensayos son independientes del tamaño, este volumen es el más pequeño considerado representativo del macizo rocoso para una determinada propiedad. Sobre la base de esta información, se realizó una simulación de un conjunto de fracturas en *FracMan*, dicho conjunto se intersectó con cuatro planos, ubicados aleatoriamente dentro del espacio de trabajo (misma orientación e igual área). Este proceso se repitió cinco veces para tamaños distintos de superficie, con la finalidad de analizar el fenómeno de escala y lograr establecer el área mínima representativa de los planos. Los valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) para cada área de muestreo (Tabla 4.7) y sus promedios fueron graficados (Gráfico 4.7), lo que permitió observar la tendencia del promedio a permanecer constante desde los  $144 \text{ m}^2$ .



Tabla 4.7: Demostración del efecto escala con valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ).

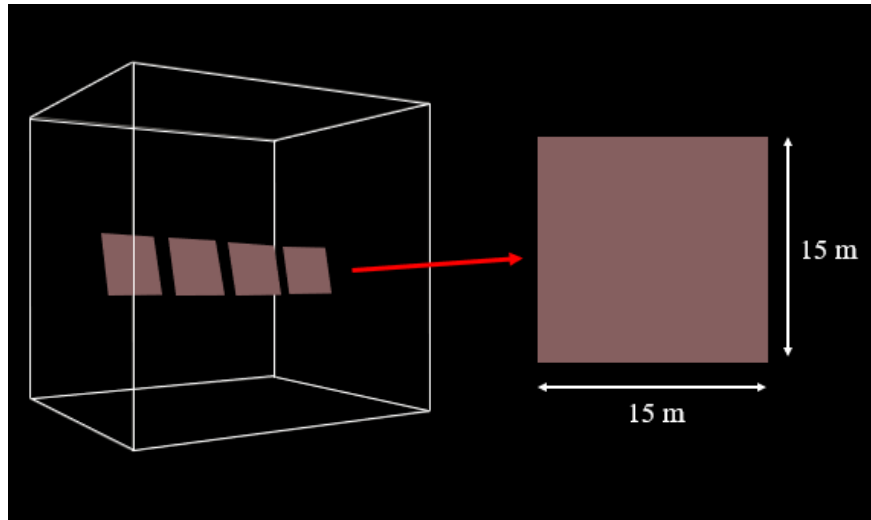
		Área de los planos ( $m^2$ )				
		9	36	81	144	225
$P_{21}$ ( $m/m^2$ )	Plano 1	1,11	1,11	0,99	0,83	0,70
	Plano 2	0,49	0,46	0,49	0,49	0,61
	Plano 3	1,05	1,06	0,89	0,80	0,79
	Plano 4	0,33	0,28	0,32	0,37	0,38
	Promedio	0,75	0,73	0,67	0,62	0,62

Gráfico 4.7: Valores  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) para establecer el área mínima de la superficie de trabajo.

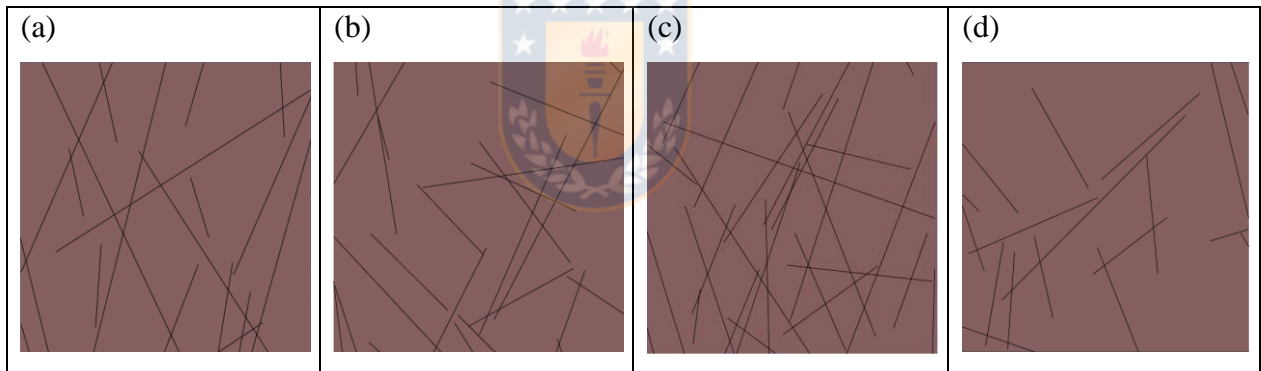
Por tanto, se propuso una superficie de mapeo de 15 x 15 m, algo mayor que el área representativa mínima, con el fin incorporar valores fehacientes de la intensidad de fracturamiento areal. Una vez establecida el área de las celdas, se posicionan los cuatro planos de 225  $m^2$  en la misma orientación e inclinación que el talud en estudio (Figura 4.19) y se importaron los discos estructurales creados en *PointStudio* a *FracMan*.

Al intersectar discos y planos (Figura 4.20), el *software* calculó de manera automática los valores de  $P_{21}$  MAPEADO para cada superficie con las trazas formadas, el promedio de este parámetro resultó

en  $0,63 \text{ (m/m}^2\text{)}$ .



**Figura 4.19: Metodología para el cálculo de  $P_{21} \text{ (m/m}^2\text{)}$ .** Se observan los cuatro planos y un acercamiento de uno de ellos, todos con área de  $225 \text{ m}^2$ .



**Figura 4.20: Trazas creadas por las intersecciones de los discos estructurales del sector I con las superficies, cálculo de  $P_{21} \text{ MAPEADO (m/m}^2\text{)}$ .** En (a) celda 1 con  $0,62 \text{ (m/m}^2\text{)}$ , (b) celda 2 con  $0,59 \text{ (m/m}^2\text{)}$ , (c) celda 3 con  $0,90 \text{ (m/m}^2\text{)}$  y (d) celda 4 con  $0,41 \text{ (m/m}^2\text{)}$ .

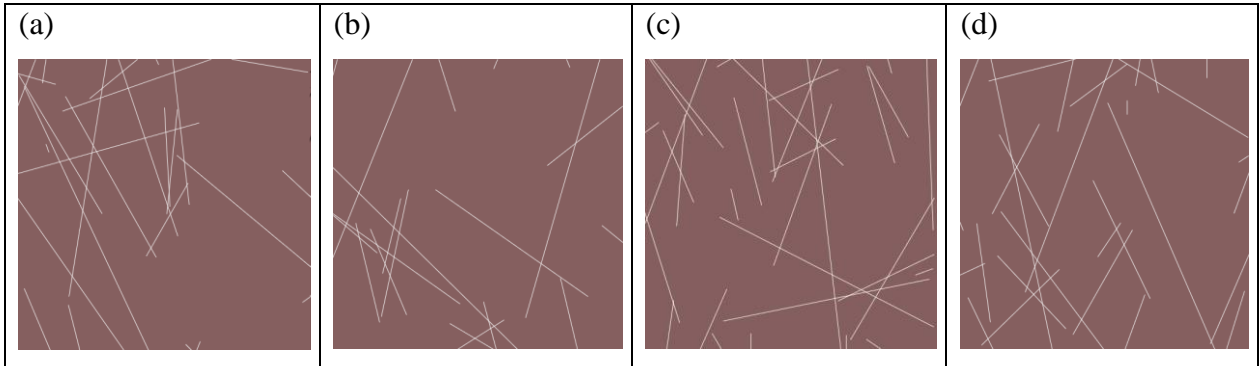
Del mismo modo, se crearon las intersecciones entre los modelos DFN y los planos (Figura 4.21).

El promedio de  $P_{21}$  para las simulaciones fue de  $0,61 \text{ (m/m}^2\text{)}$ .

El error asociado al cálculo de  $P_{21}$  (Tabla 4.8) fue de  $2,95\%$ .

Los errores obtenidos de las intensidades de fracturamiento lineal y areal, para los datos mapeados y simulados fueron menores al  $3\%$  (sector I). En estudios anteriores se consideró como válido el ajuste en caso de obtener errores menores al  $20\%$  (Schulz, 2019), por tanto, las intensidades

obtenidas son representativas del macizo rocoso. Si la calibración no resultara consistente, se deben generar nuevamente modelos DFN con los mismos valores de  $P_{32 \text{ CALIBRADO}}$ , considerando que cada modelo por ser estocástico es único y, por tanto, existen variaciones en los valores de  $P_{10}$  y  $P_{21}$ .



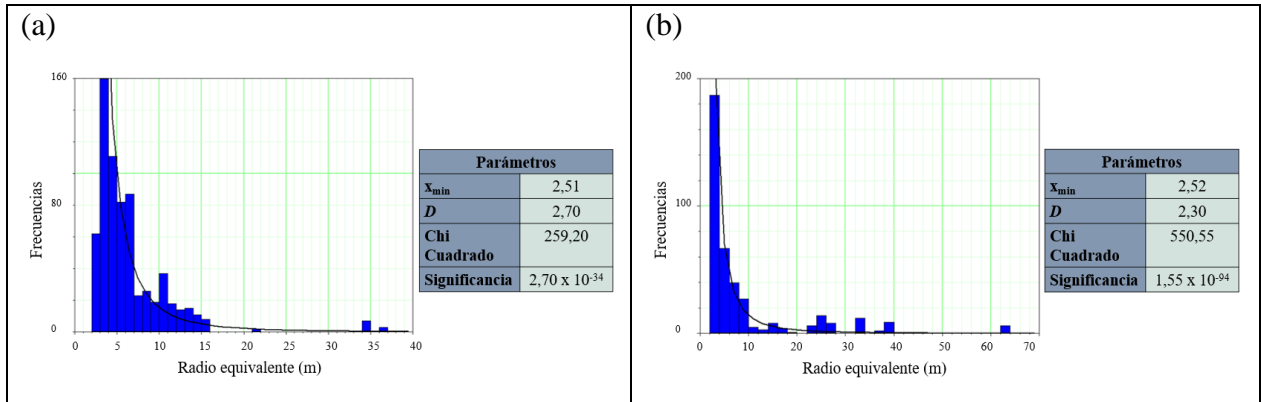
**Figura 4.21:** Trazas creadas por las intersecciones de los conjuntos de fractura simulados del sector I con las superficies, cálculo de  $P_{21 \text{ MODELADO}}$  ( $\text{m}/\text{m}^2$ ). En (a) celda 1 con  $0,63$  ( $\text{m}/\text{m}^2$ ), (b) celda 2 con  $0,46$  ( $\text{m}/\text{m}^2$ ), (c) celda 3 con  $0,73$  ( $\text{m}/\text{m}^2$ ) y (d) celda 4 con  $0,63$  ( $\text{m}/\text{m}^2$ ).

**Tabla 4.8:** Error del parámetro  $P_{21}$  ( $\text{m}/\text{m}^2$ ) para el sector I.

$P_{21 \text{ MAPEADO}}$ ( $\text{m}/\text{m}^2$ )	$P_{21 \text{ MODELADO}}$ ( $\text{m}/\text{m}^2$ )	Error (%)
0,63	0,61	2,95

#### 4.4.4.3. Longitud de las discontinuidades

Para confirmar que las longitudes modeladas fueran concordantes con las observadas, se generaron los histogramas asociados a las trazas formadas por la intersección de las estructuras mapeadas (Gráfico 4.8 (a)) y simuladas (Gráfico 4.8 (b)). Las frecuencias de los radios equivalentes de ambas trazas muestran una fuerte tendencia a ajustarse a la curva que describe la función *Power Law*, misma que se utilizó para definir las distribuciones de los tamaños de fractura.



**Gráfico 4.8: Ajuste del radio equivalentes de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector I a la función *Power Law*.** En (a) radios equivalentes de las trazas de las discontinuidades mapeadas y en (b) radios equivalentes de las trazas de las discontinuidades simuladas.

## 4.5. Análisis de modelos de estabilidad cinemática

### 4.5.1. Análisis de cuña

El primer modelo de estabilidad evaluado fue el Análisis de cuñas de roca, el que permitió identificar la geometría de los bloques potencialmente inestables y de cuñas formadas por los conjuntos de sub - bloques, definidos por la intersección del modelo DFN con el diseño de los bancos evaluados.

La geometría de los taludes de Fase 5 DS se ilustró en la Figura 4.22, y los valores de los parámetros se encuentran en la Tabla 4.9.

El diseño del talud se realizó en *FracMan*, usando los valores de los parámetros antes descritos, para este sector se crearon dos bancos dobles (32 m) y uno simple (16 m), con un ancho de 120 m. Los bancos se orientaron de acuerdo con el azimut del afloramiento ( $353^\circ$ ) y fueron georreferenciados. Una vez creado el talud se intersectó con el modelo DFN calibrado final, y posteriormente se cortó el modelo utilizando la superficie, dejando únicamente la porción de DFN que representa al macizo rocoso (Figura 4.23).

La herramienta de análisis de cuña del *software* proporcionó un cuadro de dialogo donde se especificaron las propiedades de las fracturas. Para todos los conjuntos de fracturas, se utilizó el

criterio de *Mohr - Coulomb* y se trabajó con cohesiones de 15 kPa y ángulos de fricción de  $30^\circ$  (SGEOM, 2019a), con una densidad de roca de  $2.700 \text{ kg/m}^3$  y no se consideraron cargas adicionales (hidráulicas ni sísmicas). El resultado de esta evaluación se observa en la Figura 4.24.

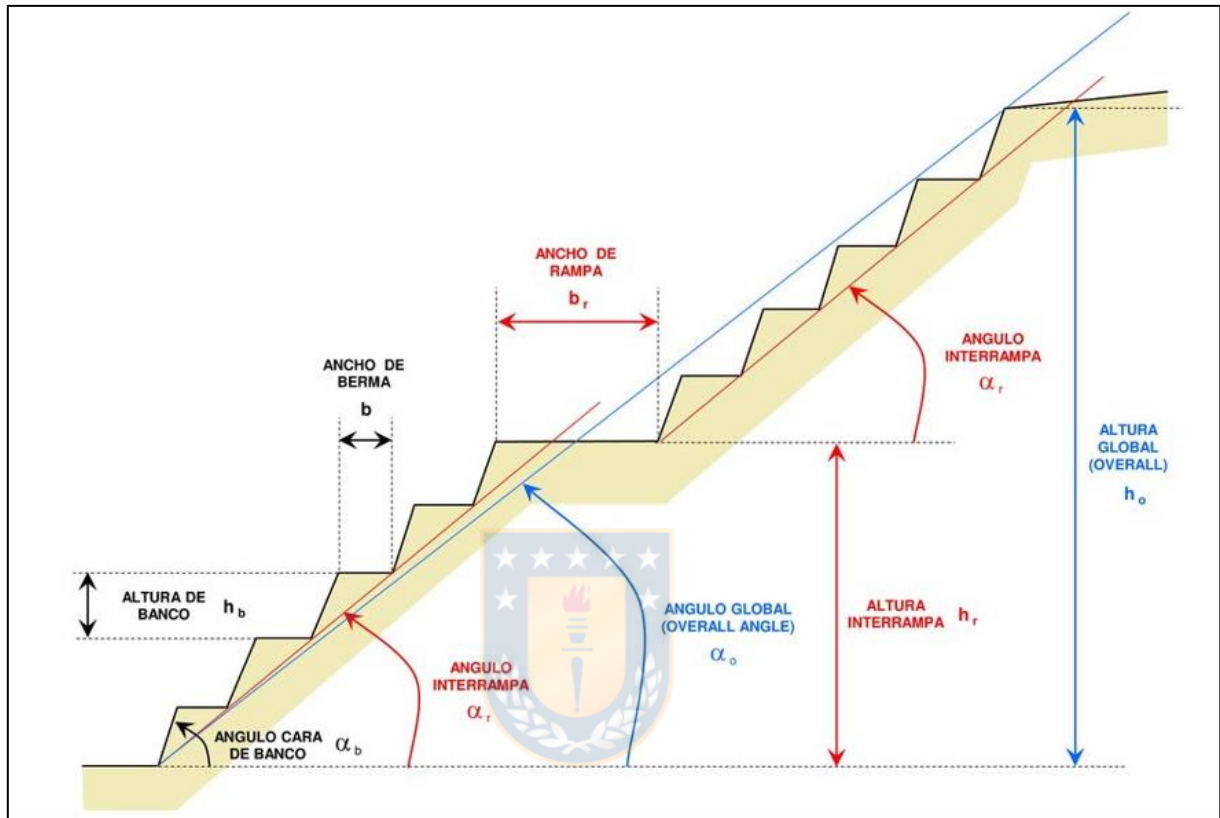
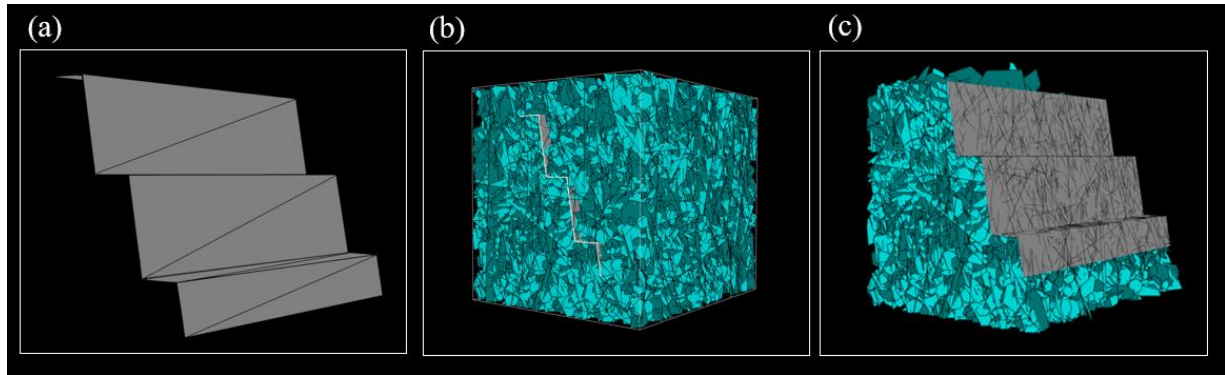


Figura 4.22: Parámetros para definir la geometría de un talud minero. Tomado de Morales (2009).

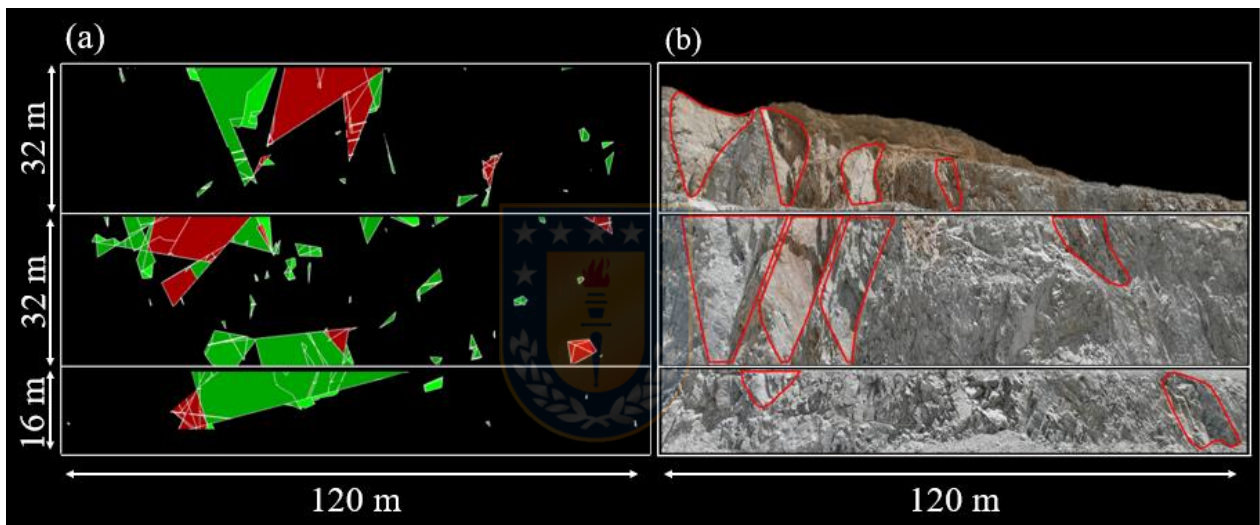
Tabla 4.9: Parámetros de diseño de Fase 5 DS. Tomado de SGEOM, 2019b.

Banco - Berma			Interrampa			Global	
H <sub>b</sub> (m)	α <sub>b</sub> (°)	b (m)	α <sub>r</sub> (°)	h <sub>r</sub> (m)	b <sub>r</sub> (m)	α <sub>o</sub> (°)	h <sub>o</sub> (m)
32	80	14,40	58	96 - 214	52	39 - 45	500 - 600

El Análisis de cuña para el sector I dio origen a un total de 729 bloques, de los cuales 166 fueron inestables. En la Tabla 4.10 se incorporaron datos de la estadística correspondiente a este modelo de estabilidad cinemática.



**Figura 4.23: Pasos previos al análisis de cuña, sector I.** En (a) Creación del diseño del talud, en (b) se intersecaron el talud con el modelo DFN calibrado final, y en (c) se cortó el modelo dejando únicamente el sector que representa el macizo rocoso.



**Figura 4.24: Análisis de cuña del sector I.** En (a) Análisis de cuña y en (b) fotografía del afloramiento, en rojo se observan los moldes de las inestabilidades formadas.

**Tabla 4.10: Estadística del Análisis de cuña del sector I.**

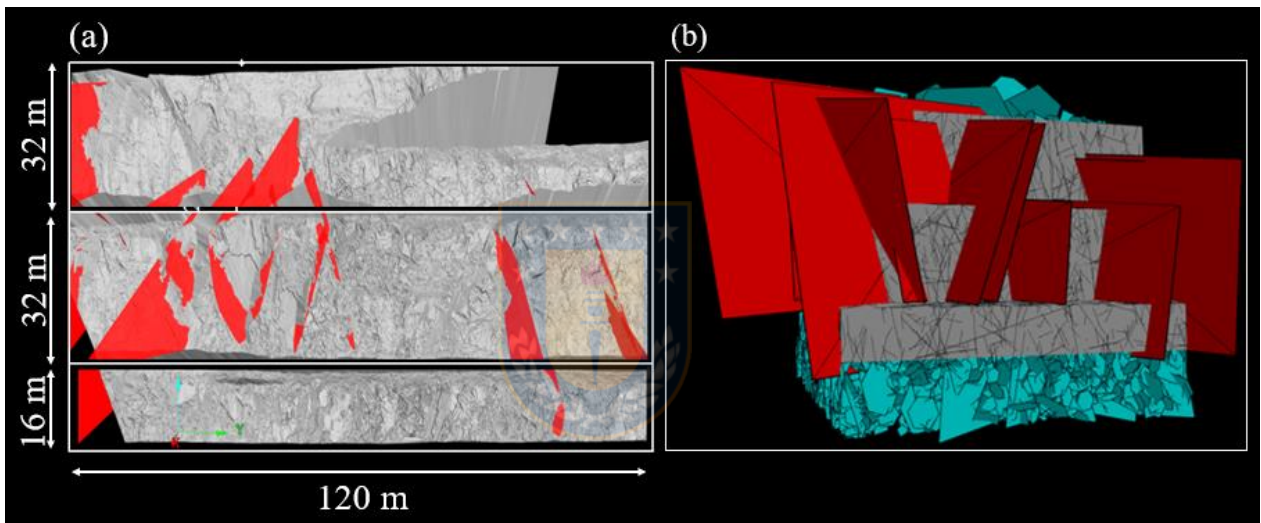
Bloques totales (Bt)	Bloques estables (Be)	Bloques inestables (Bi)	Volumen total Be (m <sup>3</sup> )	Volumen total Bi (m <sup>3</sup> )	Peso total Be (t)	Peso total Bi (t)
729	563	166	6.266,16	2.107,64	16.918,63	5.690,63

#### 4.5.2. Modelos híbridos

DAND incorporó a las evaluaciones de estabilidad los modelos híbridos, producido a partir de la combinación de las estructuras creadas estocásticamente de los modelos DFN y las fallas mayores

explícitas mapeadas, su uso ha demostrado mejorar la concordancia en geometría, ubicación y volumen entre los bloques inestables del modelo y los vistos en terreno (Divasto, 2018; Schulz, 2019).

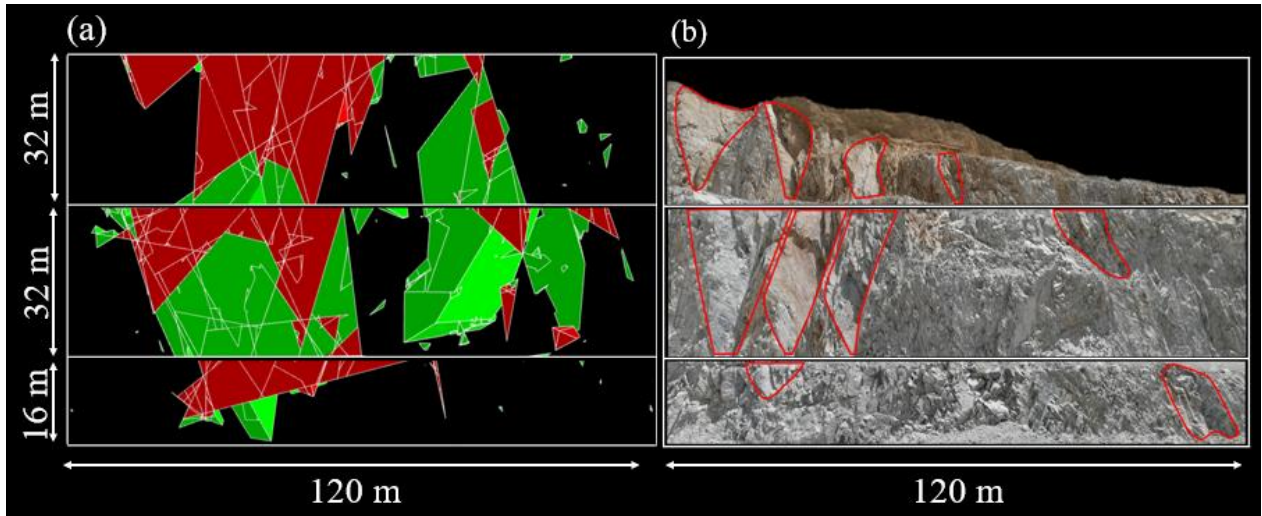
Las fallas explícitas vistas en terreno se mapearon en *PointStudio* (Figura 4.25) siguiendo los pasos mencionados en el apartado 4.3.2., una vez formadas, se extendieron creando polígonos de cuatro lados. Se procuró que las estructuras cortaran el diseño de los bancos, utilizando formas simplificadas que facilitarían el análisis al *software*. Para las fallas también se empleó el criterio de *Mohr - Coulomb*, y se definió para ellas una cohesión de 20 kPa y un ángulo de fricción de 25°.



**Figura 4.25: Fallas explícitas mapeadas para el sector I.** En (a) se encuentran las fallas creadas en *PointStudio* y en (b) las fallas proyectadas como polígonos de cuatro lados en *FracMan*.

Finalmente, la herramienta de Análisis de cuña se ejecutó incorporando además del modelo DFN calibrado final (con los parámetros previamente definidos), las fallas mapeadas. El resultado se visualiza en la Figura 4.26 y la comparación de las imágenes mostró similitudes en geometrías, ubicaciones y proporciones entre los bloques inestables modelados y vistos. Además, en la Tabla 4.11 se detallaron los resultados obtenidos.





**Figura 4.26: Modelo híbrido del sector I.** En (a) resultado al incorporar las fallas explícitas al modelamiento, y en (b) moldes de inestabilidades vistas en terreno.

**Tabla 4.11: Estadística del Modelo híbrido del sector I.**

Bloques totales (Bt)	Bloques estables (Be)	Bloques inestables (Bi)	Volumen total Be (m <sup>3</sup> )	Volumen total Bi (m <sup>3</sup> )	Peso total Be (t)	Peso total Bi (t)
2.618	1.800	818	58.186,47	11.948,20	157.103,46	32.260,13

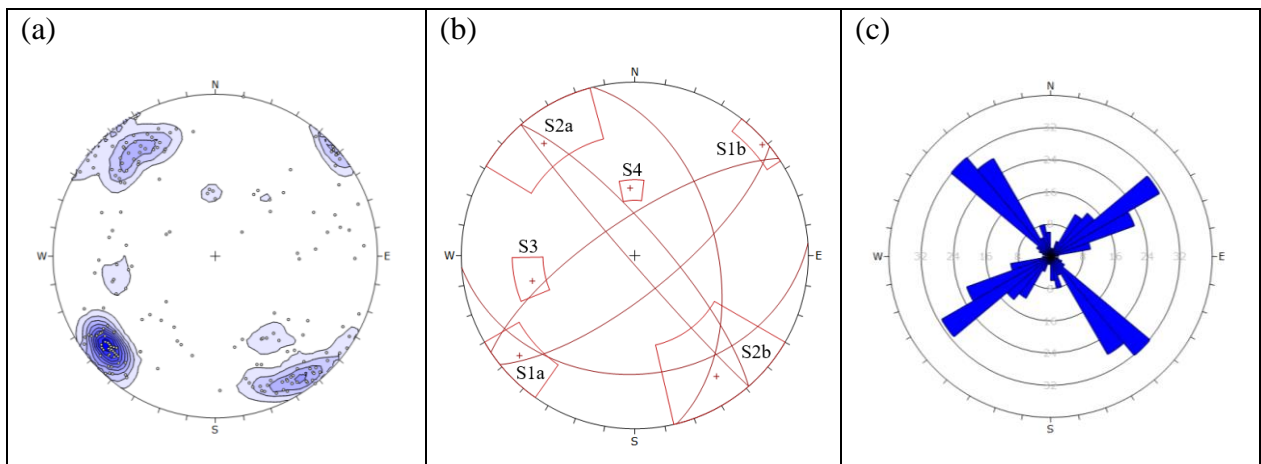
## 5. RESULTADOS

Los resultados de la metodología aplicada a todos los sectores en estudio son expuestos a continuación.

### 5.1. Orientación de las discontinuidades

Las orientaciones de las discontinuidades mapeadas fueron trabajadas en el *software Dips 6.0* de *Rocscience*, donde se hicieron diagramas de contornos con los polos de las estructuras usando una red estereográfica de igual área, en la cual se formaron los sistemas estructurales (S) asociados a las concentraciones de datos observados. Además, se realizaron rosetas para definir las orientaciones preferenciales de las fracturas, considerando a las estructuras que mantenían entre  $20^\circ$  y  $90^\circ$ , formando compartimentos de  $10^\circ$ .

Para el sector I, se definieron los sistemas estructurales (Figura 5.1) principales S1 y S2 (ambos divididos en dos subsistemas con rumbos similares, pero buzamientos en sentidos opuestos, y que se identificaron con los subíndices a y b). El primero de ellos tiene un total de 58 fracturas (Tabla 5.1) con orientación preferencial NW - SE, el segundo sistema con 87 estructuras con rumbos NE - SW. Los *sets* 3 y 4 (cantidad inferior de polos) poseen rumbos NNW - SSE y ~E - W, este último manteniendo al sur con bajo ángulo.



**Figura 5.1: Análisis de orientaciones del sector I.** Discontinuidades truncadas en 5 m, en (a) diagramas de contornos y polos para 205 estructuras (b) sistemas estructurales y (c) rosetas para 204 estructuras.

Tabla 5.1: Sistemas estructurales definidos para el sector I.

Sistema	Dip y Dip Direction (D/DD (°))						
	N° de estructuras	D promedio	DD promedio	D Mínimo	DD mínimo	D máximo	DD máximo
S1a	49	76	50	66	37	88	58
S1b	9	86	229	82	221	88	233
S2a	40	72	142	60	122	89	163
S2b	47	73	327	44	301	89	347
S3	6	51	77	45	69	55	86
S4	4	32	177	29	173	33	181
Sin sistema	50						
Total	205						

Adicionalmente, se realizaron diagramas de contornos para las discontinuidades truncadas en 7 m, 10 m y 15 m (Figura 5.2). Se observó que las distribuciones de las densidades de polos no variaron significativamente respecto al diagrama original que consideraba las 205 estructuras mapeadas de longitud mayor o igual a 5 m. Los sistemas se mantuvieron, demostrando para este caso que no existe dependencia entre la orientación de las discontinuidades respecto de los largos truncados.

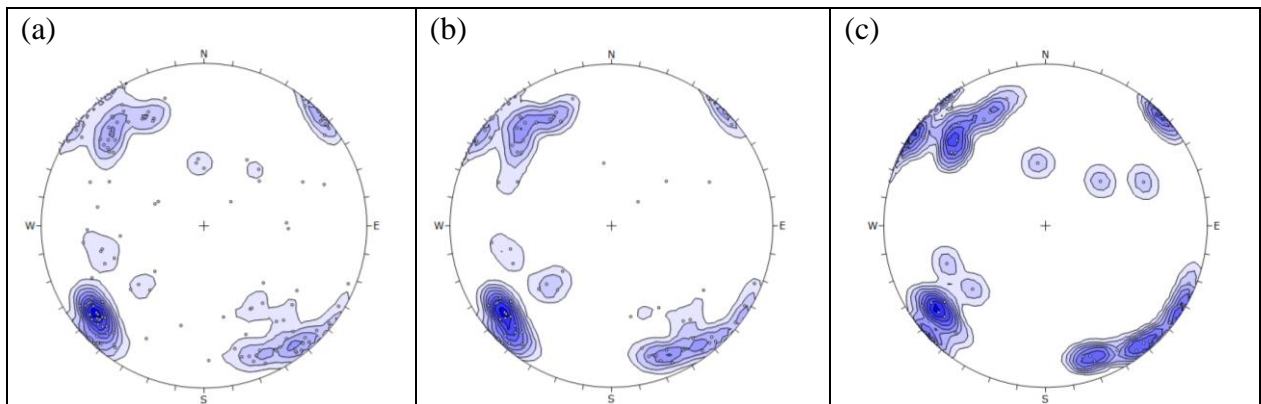
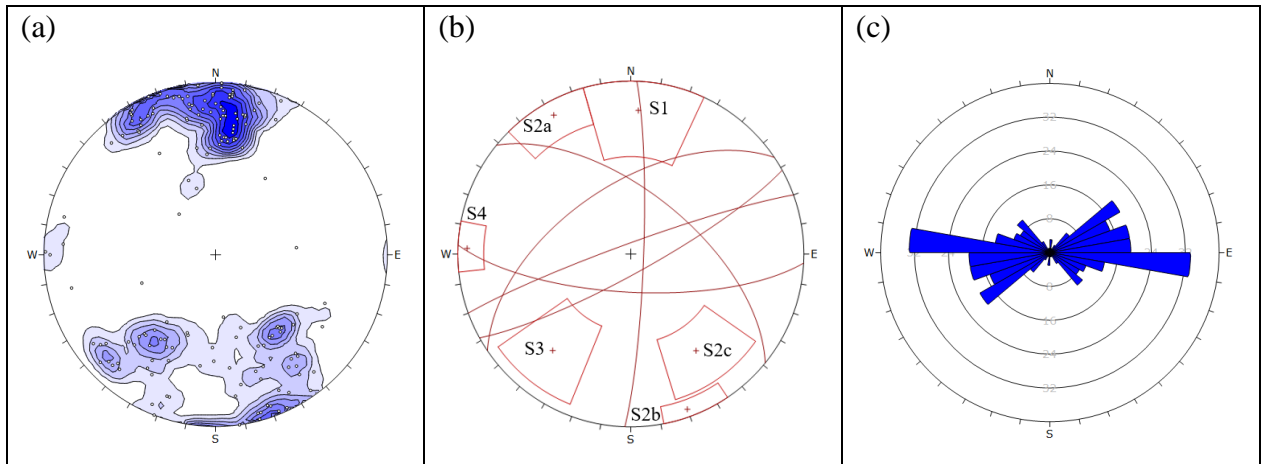


Figura 5.2: Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector I. Las estructuras fueron truncadas en 7 m (a), 10 m (b) y 15 m (c) y cada diagrama considero 129, 72 y 34 polos respectivamente.

En el sector II, se encontró un sistema principal (Figura 5.3) de orientación WNW - ESE con 62 estructuras y un manto promedio de  $71^\circ$  al SSW (Tabla 5.2). Un segundo conjunto de 46 fracturas

presentó tres subsistemas con un rumbo NE - SW y manteos que varían entre los  $45^\circ$  a  $89^\circ$ . El tercer *set* con 24 discontinuidades mostró orientaciones NW - SE.

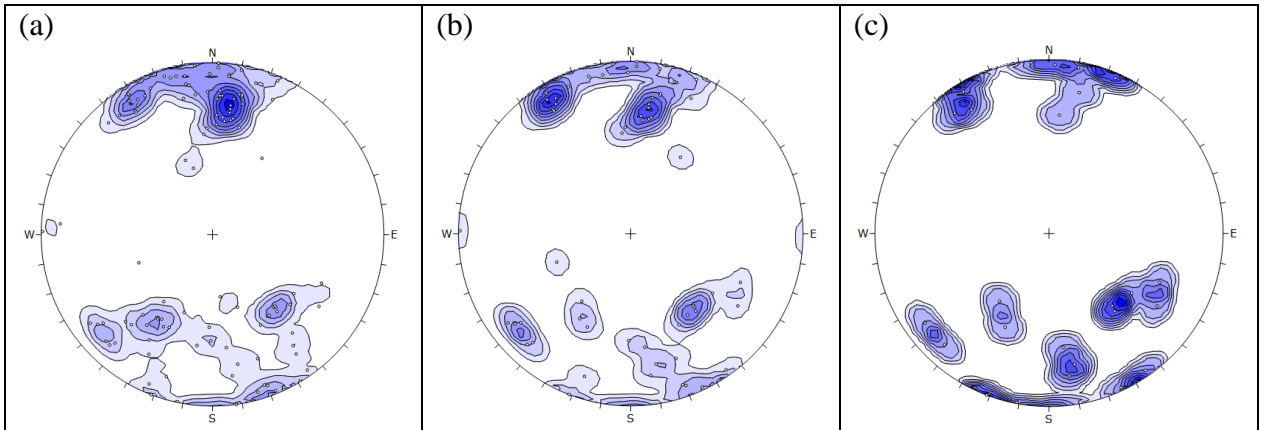


**Figura 5.3:** Análisis de orientaciones del sector II. Discontinuidades truncadas en 5 m, en (a) diagramas de contornos y polos para 164 estructuras (b) sistemas estructurales y (c) rosetas para el total de estructuras.

**Tabla 5.2:** Sistemas estructurales definidos para el sector II.

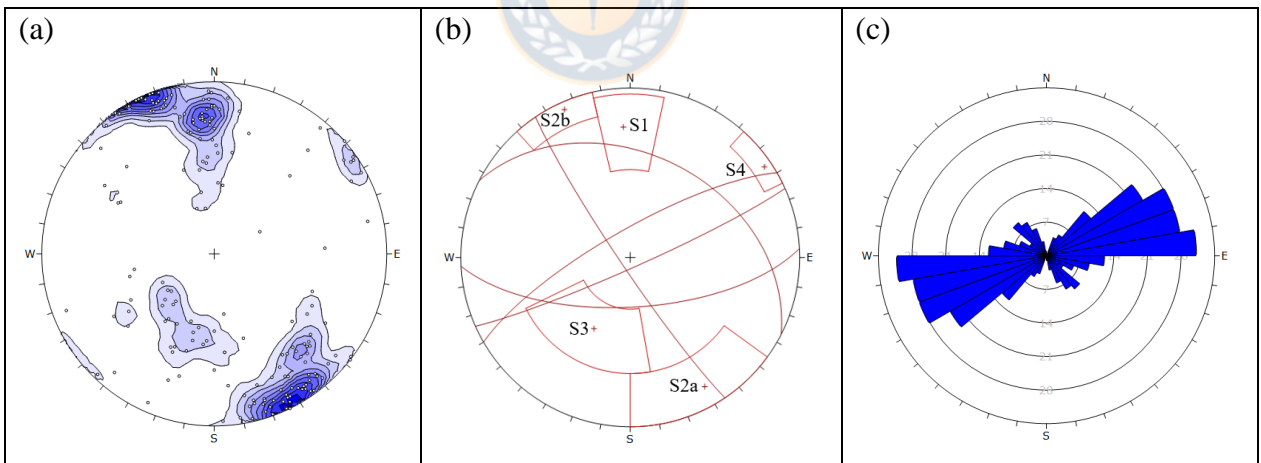
Sistema	Dip y Dip Direction (D/DD (°))						
	N° de estructuras	D promedio	DD promedio	D Mínimo	DD mínimo	D máximo	DD máximo
S1	62	71	183	49	166	89	204
S2a	17	81	152	73	138	89	64
S2b	8	84	341	80	333	88	346
S2c	21	56	326	45	307	75	341
S3	24	61	39	40	25	80	55
S4	3	83	92	77	90	88	94
Sin sistema	29						
<b>Total</b>	164						

Los diagramas de contornos para las discontinuidades truncadas ilustradas en la Figura 5.4, mostraron que las distribuciones de las densidades de polos no variaron significativamente respecto al diagrama original que consideraba las 164 estructuras.



**Figura 5.4:** Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector II. Las estructuras fueron truncadas en 7 m (a), 10 m (b) y 15 m (c) y cada diagrama considero 110, 60 y 24 polos respectivamente.

En el tercer sector se reconocieron cuatro *sets* estructurales (Figura 5.5). El primer conjunto, de 35 estructuras (Tabla 5.3) de orientación preferencial ENE - WSW con manteo al SSE. El segundo conjunto, de 84 discontinuidades, se divide en dos subconjuntos de rumbos aproximados NE - SW y manteos al NW y al SE (S2a y S2b respectivamente). El tercer sistema de orientación NW - SE, se caracterizó para un total de 29 fracturas.



**Figura 5.5:** Análisis de orientaciones del sector III. Discontinuidades truncadas en 5 m, en (a) diagramas de contornos y polos para 189 estructuras (b) sistemas estructurales y (c) rosetas para el total de estructuras.

Para las longitudes truncadas (Figura 5.6) los sistemas se mantuvieron, demostrando para este caso que no hay dependencia entre la orientación de las discontinuidades respecto de los largos truncados.

Tabla 5.3: Sistemas estructurales definidos para el sector III.

Sistema	Dip y Dip Direction (D/DD (°))						
	N° de estructuras	D promedio	DD promedio	D Mínimo	DD mínimo	D máximo	DD máximo
S1	35	65	177	43	168	83	190
S2a	59	77	329	59	303	90	358
S2b	25	85	157	74	140	90	166
S3	29	41	28	26	0	58	355
S4	7	85	237	78	229	89	242
Sin sistema	34						
Total	189						

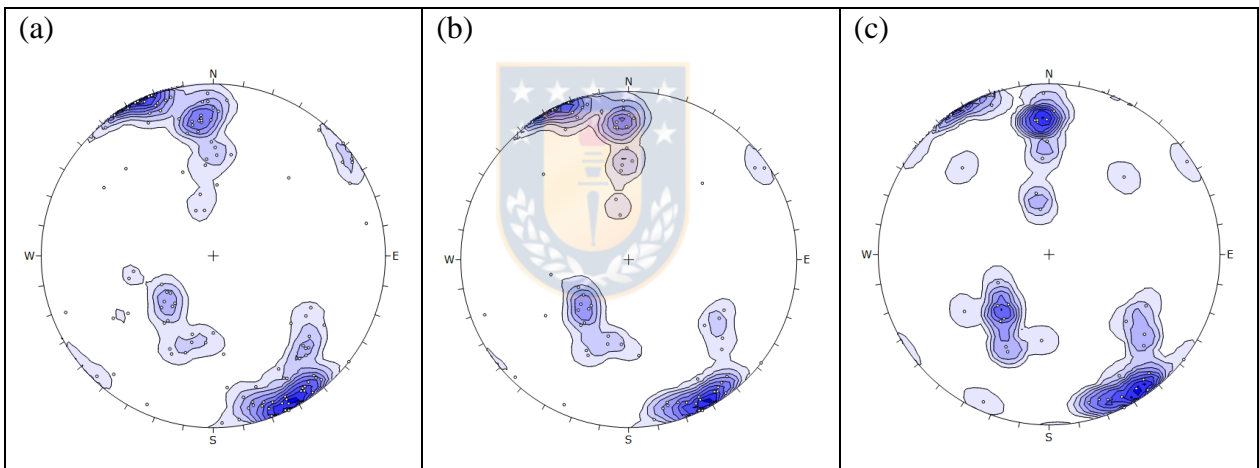
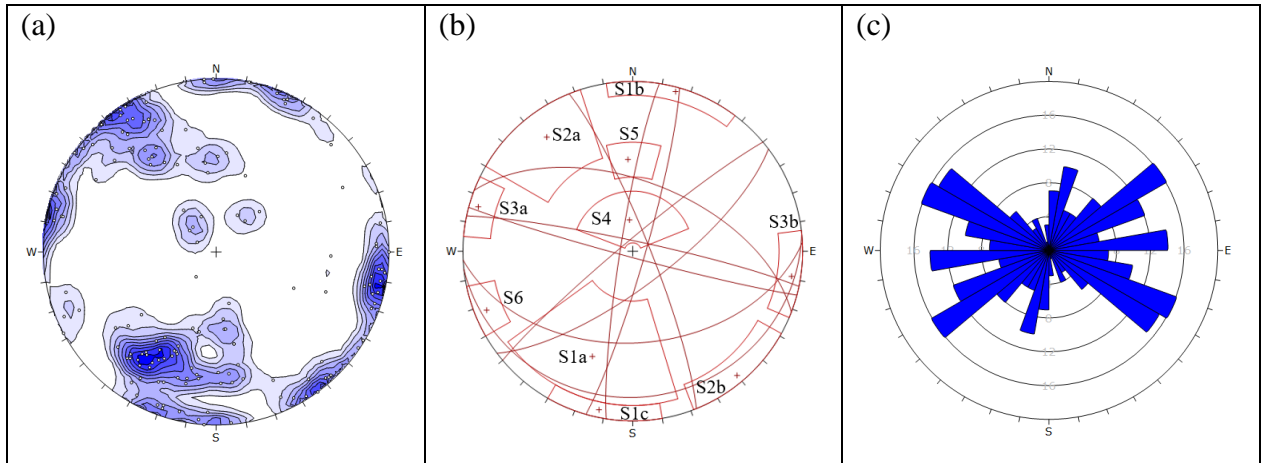


Figura 5.6: Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector III. Las estructuras fueron truncadas en 7 m (a), 10 m (b) y 15 m (c) y cada diagrama considero 122, 71 y 40 polos respectivamente.

Para el sector IV se establecieron numerosos sistemas o conjuntos (Figura 5.7), el primero con tres subconjuntos de orientación NW - SE. Seguido de un sistema con dos subconjuntos NE - SW. Un tercer conjunto mostró orientaciones NNE - SSW con 21 estructuras (Tabla 5.4). Y un cuarto sistema con orientación ENE - WSW y con bajo ángulo de manto.

No se registraron cambios significativos en los diagramas de la Figura 5.8, para los largos truncados de este sector.



**Figura 5.7:** Análisis de orientaciones del sector IV. Discontinuidades truncadas en 5 m, en (a) diagramas de contornos y polos para 153 estructuras (b) sistemas estructurales y (c) rosetas para un total de 148 estructuras.

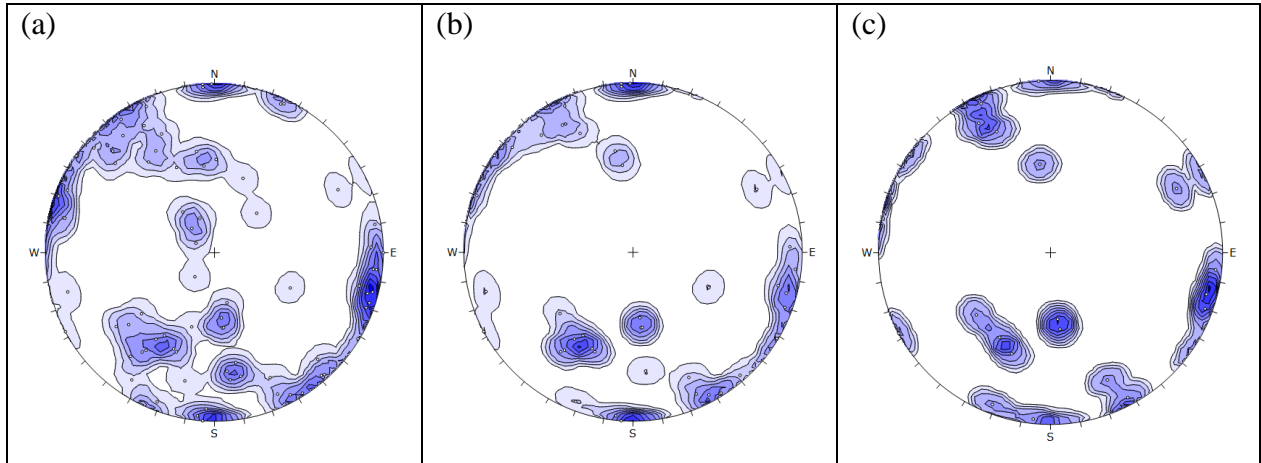
**Tabla 5.4:** Sistemas estructurales definidos para el sector IV.

Sistema	Dip y Dip Direction (D/DD (°))						
	N° de estructuras	D promedio	DD promedio	D Mínimo	DD mínimo	D máximo	DD máximo
S1a	48	57	20	25	9	78	360
S1b	9	87	195	83	176	90	216
S1c	9	85	12	81	4	89	355
S2a	27	73	144	50	121	90	156
S2b	11	85	321	77	302	90	337
S3a	6	83	106	80	102	87	113
S3b	15	84	279	77	267	89	290
S4	8	19	168	10	117	28	227
S5	5	45	177	37	170	51	187
S6	4	82	68	74	62	90	75
Sin sistema	11						
<b>Total</b>	<b>153</b>						

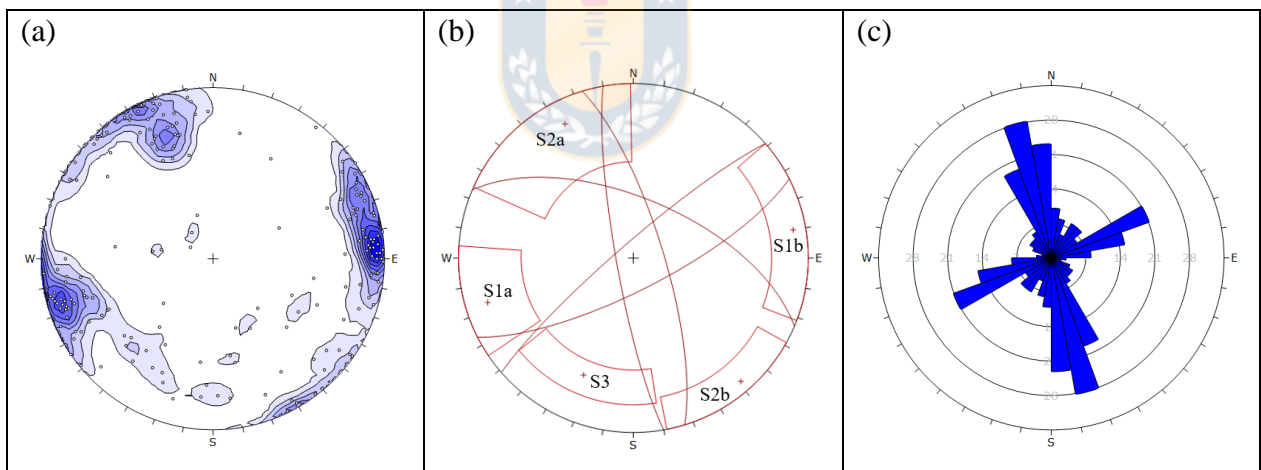
El quinto sector posee tres *sets* de discontinuidades (Figura 5.9). El primero de ellos dividido en dos subconjuntos (Tabla 5.5) de orientación NNW - SSE y con mantos entre 56 y 90° al ENE y



al WSW. El segundo también tiene dos subconjuntos, de orientación aproximada  $N57^{\circ}E$ . Finalmente, el tercer sistema mostró un rumbo promedio de  $N65^{\circ}W$  y manteo promedio de  $63^{\circ}$  al NE.



**Figura 5.8:** Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector IV. Las estructuras fueron truncadas en 7 m (a), 10 m (b) y 15 m (c) y cada diagrama considero 78, 41 y 20 polos respectivamente.



**Figura 5.9:** Análisis de orientaciones del sector V. Discontinuidades truncadas en 5 m, en (a) diagramas de contornos y polos para 186 estructuras (b) sistemas estructurales y (c) rosetas para un total de 184 estructuras.

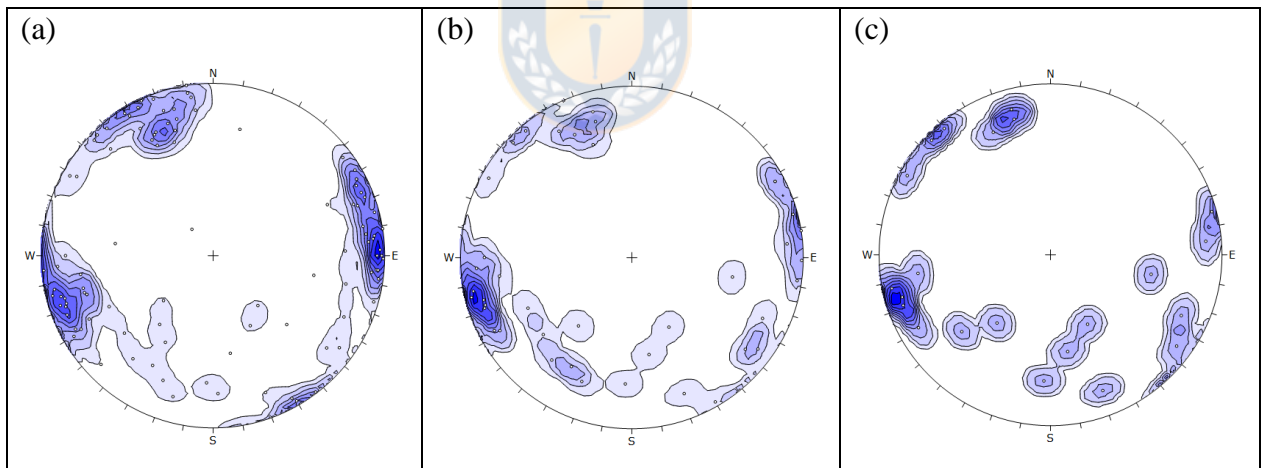
Los *sets* estructurales de las discontinuidades truncadas de la Figura 5.10. se mantienen similares a los vistos para las 186 estructuras mapeadas.

Para el último sector en estudio, se observaron cuatro sistemas estructurales (Figura 5.11),

existiendo dos *sets* principales de dos subconjuntos cada uno. Las orientaciones preferenciales del primero fueron NE - SW y las del segundo *set* NW - SE, considerando sus 103 estructuras (Tabla 5.6). El tercer conjunto formado para 22 fracturas exhibió rumbos WNW - ESE.

**Tabla 5.5: Sistemas estructurales definidos para el sector V.**

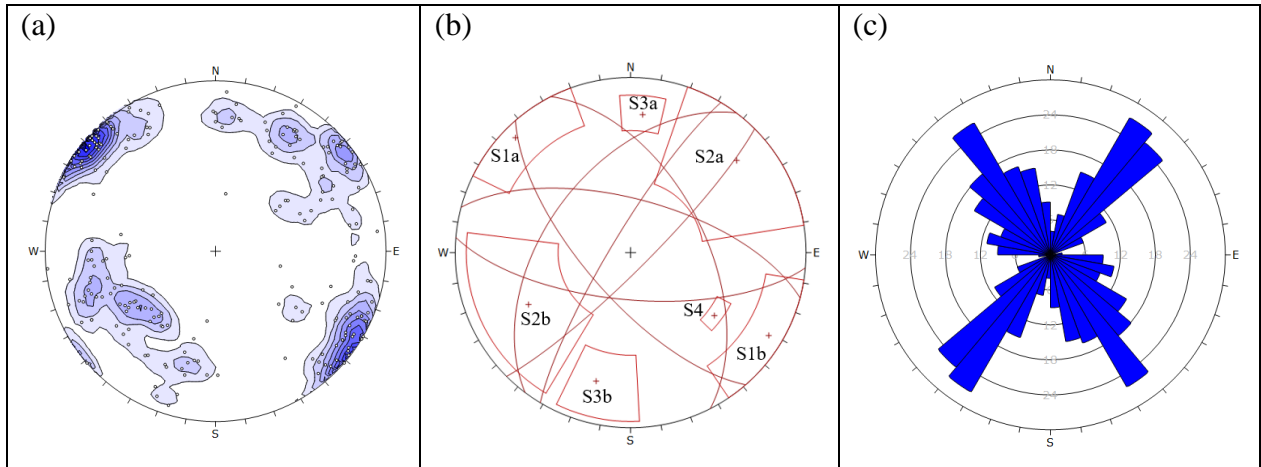
Sistema	Dip y Dip Direction (D/DD (°))						
	N° de estructuras	D promedio	DD promedio	D Mínimo	DD mínimo	D máximo	DD máximo
S1a	35	76	73	56	57	90	90
S1b	50	82	261	68	233	89	290
S2a	45	75	153	52	119	89	179
S2b	12	83	320	72	306	89	340
S3	12	63	25	55	3	71	358
Sin sistema	32						
<b>Total</b>	<b>186</b>						



**Figura 5.10: Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector V.** Las estructuras fueron truncadas en 7 m (a), 10 m (b) y 15 m (c) y cada diagrama considero 101, 40 y 22 polos respectivamente.

Los diagramas de polos truncados (Figura 5.12) mostraron las mismas agrupaciones de discontinuidades que para las 225 fracturas mapeadas.

Además, la validación de la técnica del método de *bootstrapping* aplicado a las estructuras mapeadas de todos los sectores se adjuntó en el Anexo 2, para todos los sectores en estudio.



**Figura 5.11: Análisis de orientaciones del sector VI.** Discontinuidades truncadas en 5 m, en (a) diagramas de contornos y polos para 225 estructuras (b) sistemas estructurales y (c) rosetas para el total de discontinuidades.

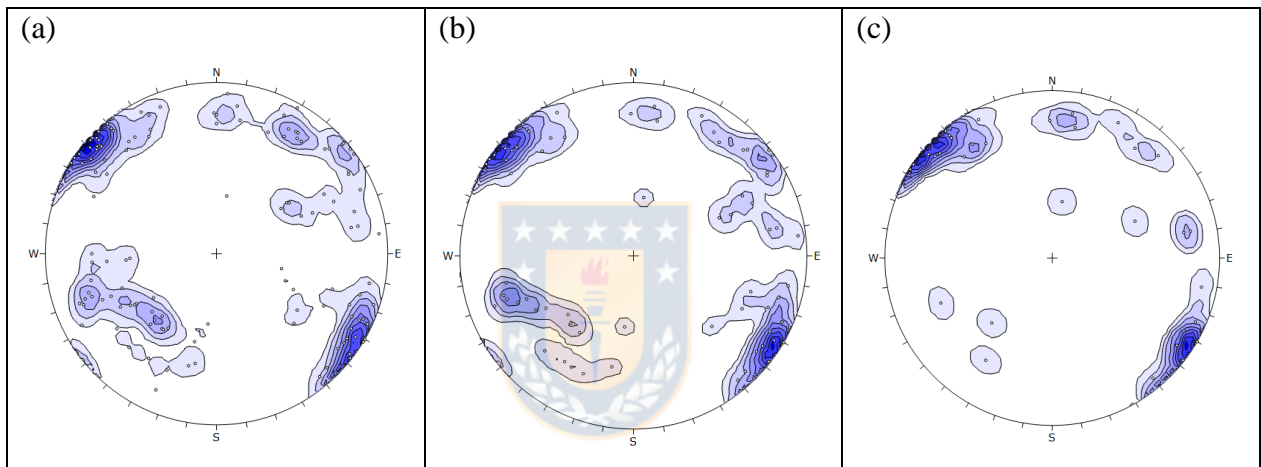
**Tabla 5.6: Sistemas estructurales definidos para el sector VI.**

Sistema	Dip y Dip Direction (D/DD (°))						
	N° de estructuras	D promedio	DD promedio	D Mínimo	DD mínimo	D máximo	DD máximo
S1a	44	82	135	67	117	90	159
S1b	36	81	302	70	281	90	321
S2a	51	69	230	35	201	88	259
S2b	52	56	63	36	33	81	96
S3a	8	68	185	61	180	76	191
S3b	14	64	15	51	5	83	360
S4	3	50	308	47	305	51	313
Sin sistema	17						
Total	225						

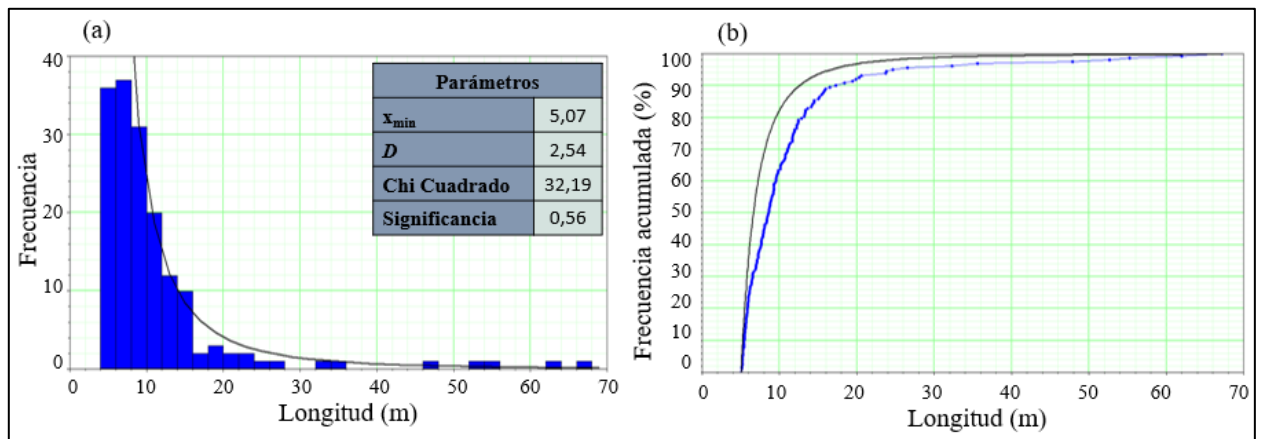
## 5.2. Longitud de las discontinuidades

Utilizando las pruebas de bondad de ajuste Chi Cuadrado y *Kolmogórov Smirnov*, se demostró que los largos estructurales de las discontinuidades de todos los sectores tienen una distribución *Power Law*. Los datos de los estadísticos recabados en *EasyFit* se encuentran en las Tablas del Anexo 3.

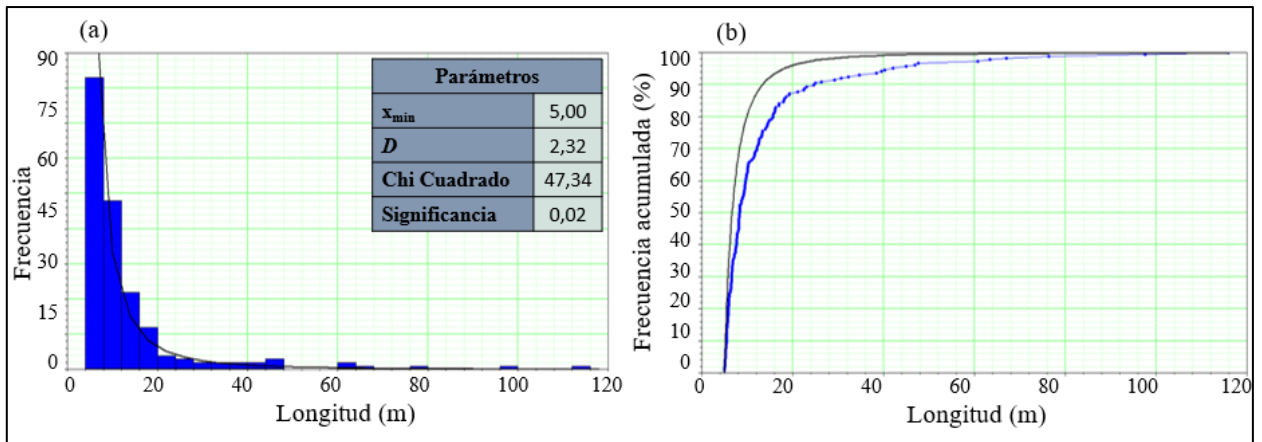
En los Gráficos 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 (a) se pueden ver las funciones de densidad de probabilidad para los histogramas de los largos estructurales mapeados de los distintos sectores (excluyendo al sector I, ya que fueron expuestas en la metodología). Como se mencionó anteriormente la distribución *Power Law* presentó el mejor ajuste, para las funciones creadas en *FracMan* utilizando la prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado, cuyos parámetros calculados por el *software* se encuentran en las figuras. Mientras que en los Gráficos 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 (b) se presentaron las funciones de distribución acumuladas que exhibieron el ajuste de los datos (líneas azules) a la distribución empírica (líneas negras), mostrando las tendencias similares de ambas curvas para todos los casos.



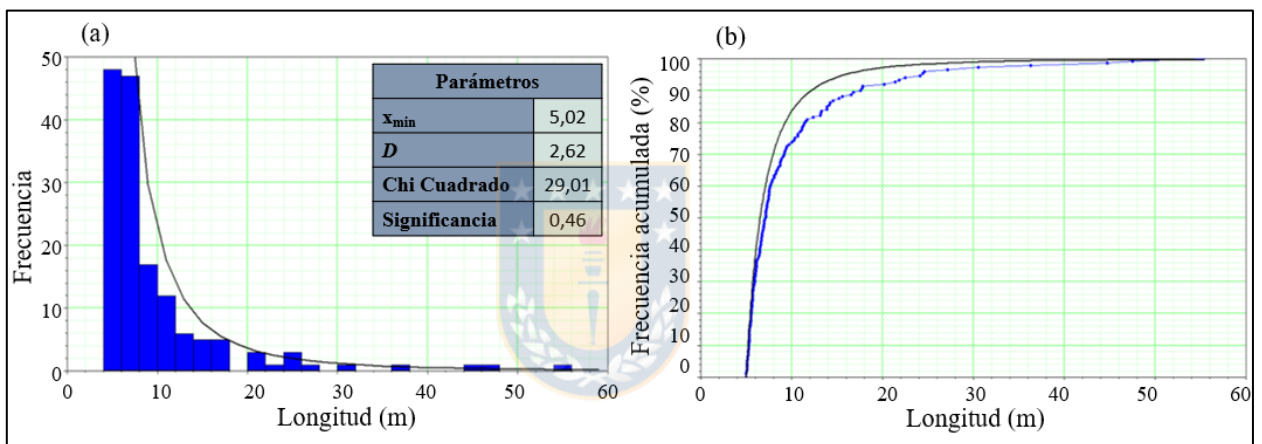
**Figura 5.12: Diagramas de contorno para largos de fractura truncados del sector VI.** Las estructuras fueron truncadas en 7 m (a), 10 m (b) y 15 m (c) y cada diagrama considero 131, 69 y 33 polos respectivamente.



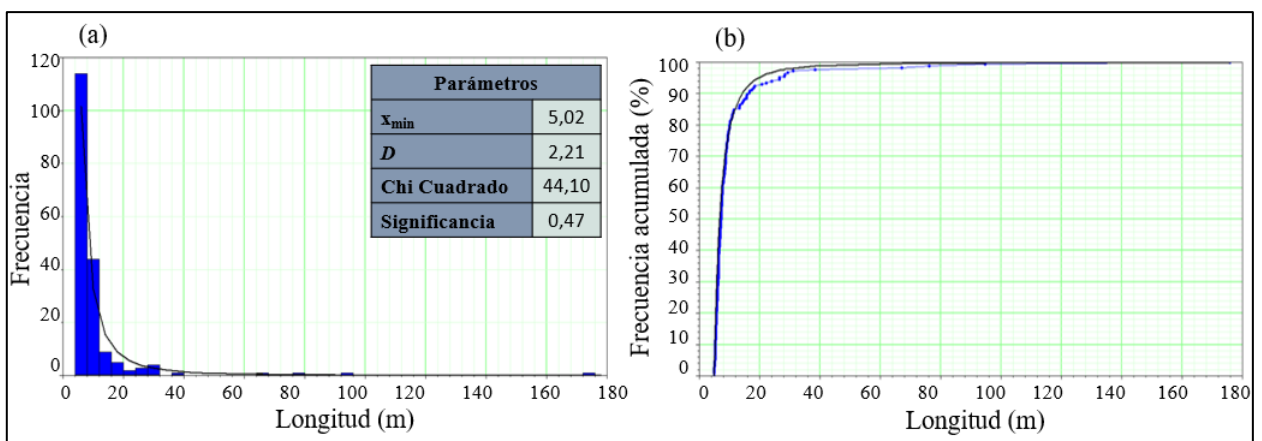
**Gráfico 5.1: Ajustes de los largos estructurales del sector II a la función *Power Law*.** En (a) función de densidad de probabilidad y el valor de sus estadísticos, y en (b) función de distribución acumulada.



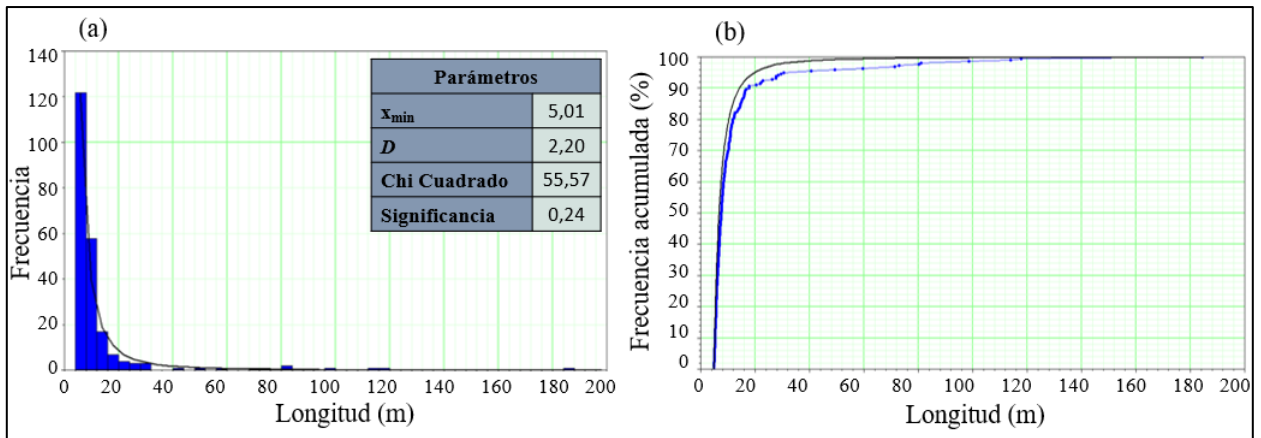
**Gráfico 5.2: Ajustes de los largos estructurales del sector III a la función *Power Law*.** En (a) función de densidad de probabilidad y el valor de sus estadísticos, y en (b) función de distribución acumulada.



**Gráfico 5.3: Ajustes de los largos estructurales del sector IV a la función *Power Law*.** En (a) función de densidad de probabilidad y el valor de sus estadísticos, y en (b) función de distribución acumulada.

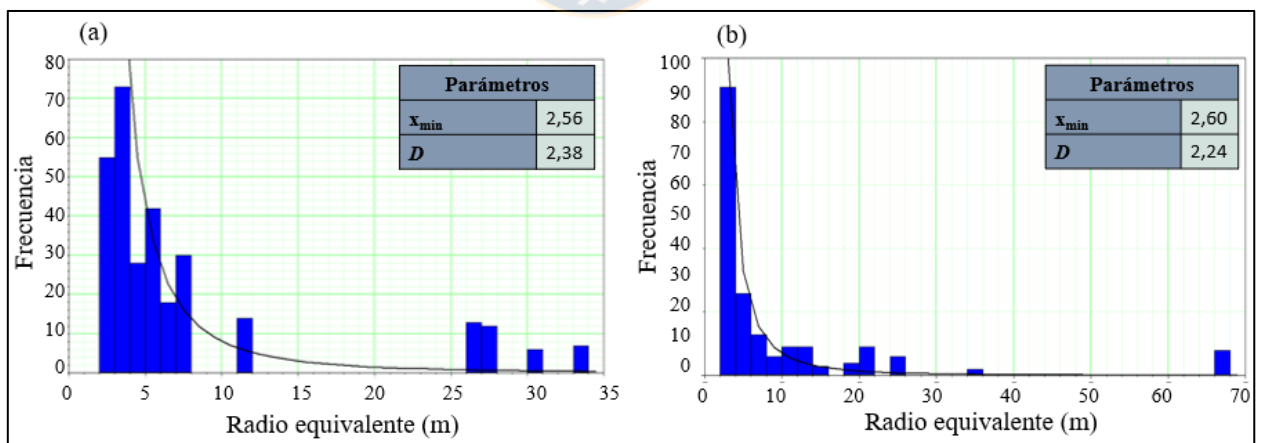


**Gráfico 5.4: Ajustes de los largos estructurales del sector V a la función *Power Law*.** En (a) función de densidad de probabilidad y el valor de sus estadísticos, y en (b) función de distribución acumulada.



**Gráfico 5.5: Ajustes de los largos estructurales del sector VI a la función *Power Law*.** En (a) función de densidad de probabilidad y el valor de sus estadísticos, y en (b) función de distribución acumulada.

Los resultados de los histogramas para los radios equivalentes de las trazas formadas durante el cálculo del parámetro  $P_{21}$ , por la intersección de los planos con los discos estructurales mapeados (Gráficos 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 (a)) y los *sets* de fracturas calibrados de cada sector (sección (b) de los Gráficos), presentaron mayor variabilidad de los datos respecto de la curva que describe la función *Power Law*, sin embargo, sigue siendo esta la distribución óptima en el ajuste de los radios estructurales.

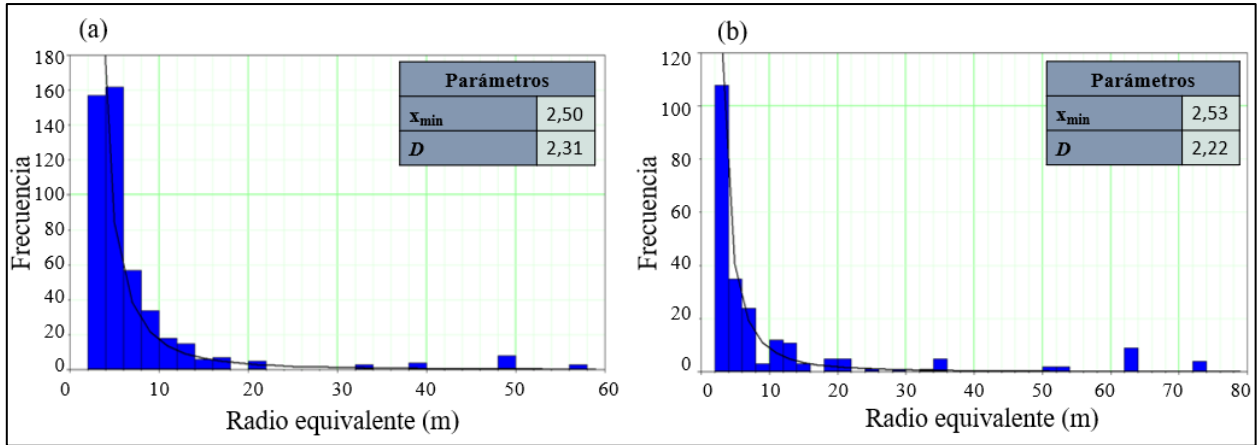


**Gráfico 5.6: Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector II.** En (a) función de densidad de probabilidad para las trazas de las fracturas mapeadas, en (b) simuladas.

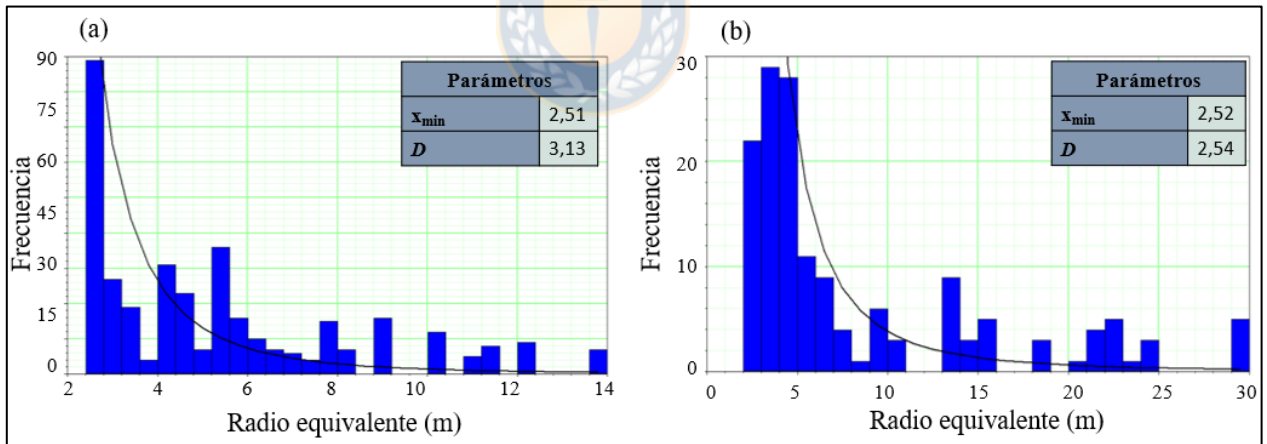
### 5.3. Intensidad de las discontinuidades

Para el cálculo de las intensidades de fracturamiento se comenzó analizando los valores de  $P_{10}$

(1/m) de los conjuntos de discontinuidades mapeados de cada sector. Proceso que demandó la separación de las estructuras de acuerdo con el eje al que pertenecían, como se mencionó en apartados anteriores, esto se realizó considerando la orientación de los taludes en estudio, los resultados se encuentran en la Tabla 5.7.



**Gráfico 5.7: Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector III.** (a) Función de densidad de probabilidad para las trazas de las fracturas mapeadas, en (b) simuladas.

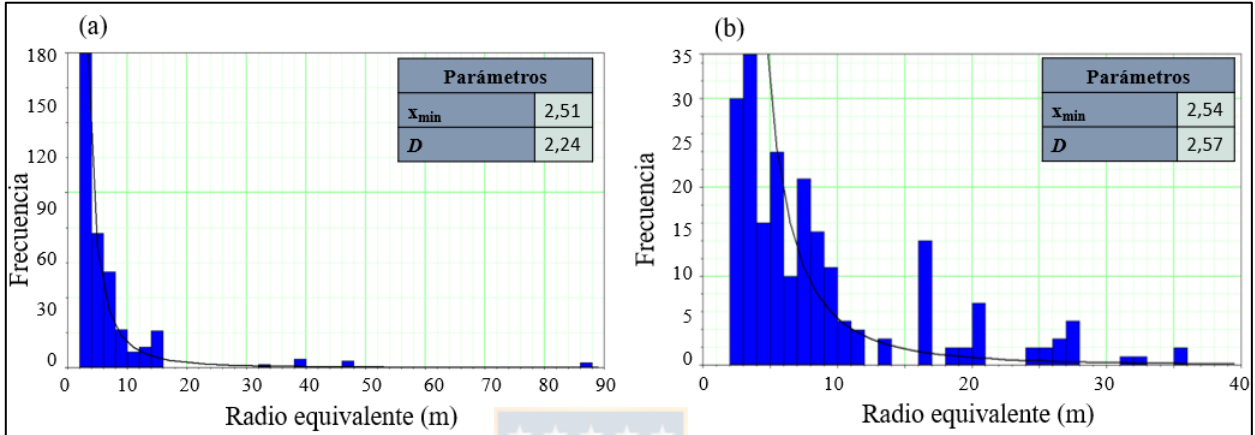


**Gráfico 5.8: Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector IV.** (a) Función de densidad de probabilidad para las trazas de las fracturas mapeadas, en (b) simuladas.

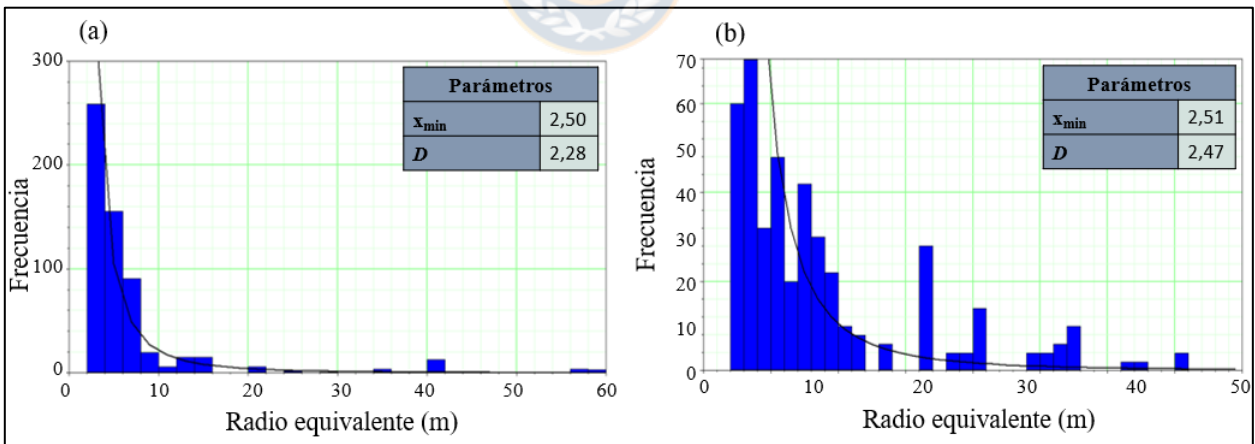
Teniendo separadas las discontinuidades se procedió a realizar el cálculo de la frecuencia de fracturas por eje coordinado. Posteriormente, utilizando estos datos se obtuvieron los valores de  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ) calibrados, considerando la relación lineal entre las intensidades de fracturamiento volumétrica y lineal  $P_{10}$  (1/m), corroboradas por los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que para todos los casos en estudio arrojó valores cercanos a 1. Con estos datos se construyeron los Gráficos



5.11, 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 correspondientes a los sectores estudiados. En estos cada círculo negro se creó a partir de un valor  $P_{32}$  ARBITRARIO y  $P_{10}$  SIMULADO fue calculado en el *set* de fracturas generado con dicha intensidad, con tres pares de datos se estableció la ecuación de la recta, de la cual se despejó el valor buscado (círculo rojo). Los valores exactos de los ajustes y los modelos calibrados para cada eje se encuentran en las Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17.



**Gráfico 5.9: Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector V.** En (a) función de densidad de probabilidad para las trazas de las fracturas mapeadas, en (b) simuladas.

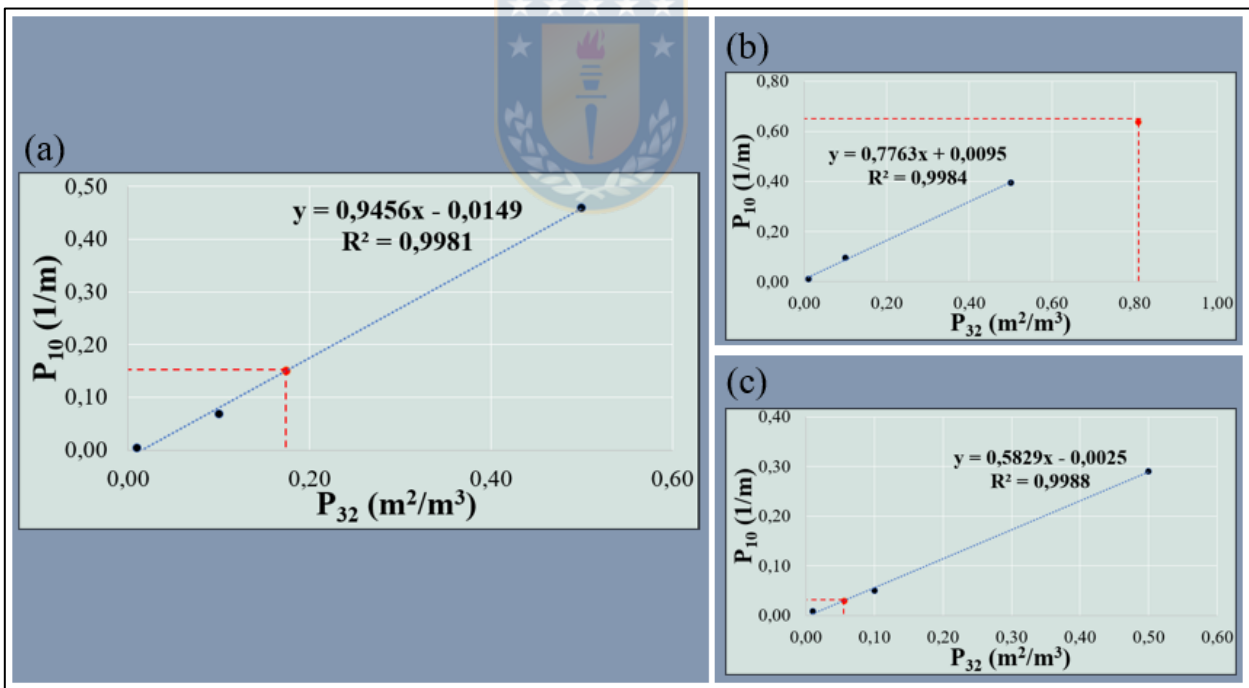


**Gráfico 5.10: Ajuste del radio equivalente de las trazas de las discontinuidades mapeadas y simuladas del sector VI.** (a) Función de densidad de probabilidad para las trazas de las fracturas mapeadas, en (b) simuladas.

La calibración de los modelos requirió analizar los errores asociados a las frecuencias de fractura mapeadas y simuladas (Tablas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13), estos resultados permitieron validar las simulaciones. Para todos los casos en estudio se registraron errores inferiores al 5%.

**Tabla 5.7: Datos de las discontinuidades de todos los sectores separadas por eje.** Las medidas azimutales corresponden a las orientaciones entre las cuales las discontinuidades de los sectores II, III, IV, V y VI pertenecen a los ejes X', Y' y Z (las medidas del sector I se excluyeron al ser parte de la metodología), además se encuentra el número de discontinuidades que se asignaron a cada eje.

	Sector II	Sector III	Sector IV	Sector V	Sector VI
<b>Azimut del talud</b>	294°	278°	241°	209°	182°
<b>Eje X' (rumbo)</b>	$\geq 339^\circ$ y $< 69^\circ$	$\geq 323^\circ$ y $< 53^\circ$	$\geq 286^\circ$ y $< 16^\circ$	$\geq 74^\circ$ y $< 164^\circ$	$\geq 47^\circ$ y $< 137^\circ$
	$\geq 159^\circ$ y $< 249^\circ$	$\geq 143^\circ$ y $< 233^\circ$	$\geq 106^\circ$ y $< 196^\circ$	$\geq 254^\circ$ y $< 344^\circ$	$\geq 227^\circ$ y $< 317^\circ$
	47 fracturas	41 fracturas	63 fracturas	69 fracturas	65 fracturas
<b>Eje Y' (rumbo)</b>	$\geq 249^\circ$ y $< 39^\circ$	$\geq 53^\circ$ y $< 143^\circ$	$\geq 16^\circ$ y $< 106^\circ$	$\geq 344^\circ$ y $< 74^\circ$	$\geq 317^\circ$ y $< 47^\circ$
	$\geq 69^\circ$ y $< 159^\circ$	$\geq 233^\circ$ y $< 323^\circ$	$\geq 196^\circ$ y $< 286^\circ$	$\geq 164^\circ$ y $< 254^\circ$	$\geq 137^\circ$ y $< 227^\circ$
	104 fracturas	117 fracturas	69 fracturas	105 fracturas	137 fracturas
<b>EJE Z</b>	Manteo $< 45^\circ$				
	13 fracturas	31 fracturas	21 fracturas	12 fracturas	23 fracturas



**Gráfico 5.11: Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  del sector II.** En (a) eje X' en (b) eje Y' y en (c) eje Z.

Una vez creados los modelos DFN calibrados finales se procedió a comparar los resultados de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) de las trazas formadas por las intersecciones de los discos estructurales (mapeadas) y de las

simulaciones estocásticas (modeladas). Dependiendo de los tamaños de las ventanas de mapeo se generaron dos o cuatro planos de intersección en los diferentes sectores. Los detalles de las intensidades de fracturamiento areal para cada superficie se encuentran en el Anexo 4, mientras que el resumen de los valores de  $P_{21}$  global de cada sector están en la Tabla 5.14, donde además se obtuvieron los errores, que al igual que en el cálculo de  $P_{10}$  resultaron inferiores al 5%.

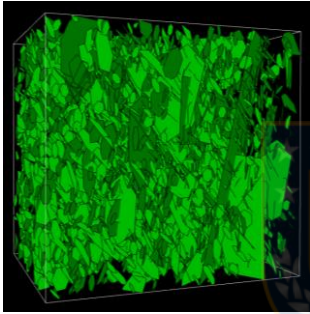
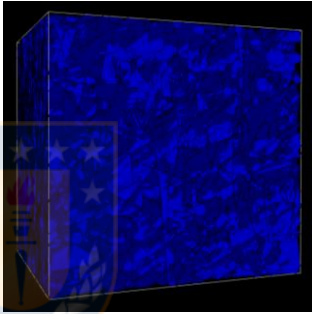
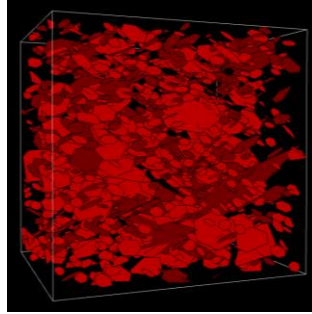
	Eje X'	Eje Y'	Eje Z
<b>P<sub>10</sub> MAPEADO (1/m)</b>	0,15	0,64	0,03
<b>P<sub>32</sub> CALIBRADO (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,17	0,81	0,06
<b>Modelos DFN calibrados</b>	(a)	(b)	(c)
			

Figura 5.13: Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector II

Dado que los errores asociados a las intensidades de fracturamiento resultaron menores a 5%, los modelos DFN de todos los sectores se consideraron calibrados y, por tanto, aptos para su uso en análisis de estabildades.

#### 5.4. Modelos de estabilidad cinemática

Los resultados de los modelos de estabilidad fueron expuestos en cinco imágenes para cada sector (Figuras 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 y 5.23), las Figuras (a) corresponden a los análisis de cuña que se crearon con los modelos DFN calibrados y los taludes. Las propiedades de las fracturas fueron las mismas para todos los conjuntos, datos que se especificaron en la metodología. Los taludes utilizados fueron una representación simplificada (polígonos simples) de los vistos en terreno, respetando las características geométricas de F5 DS.

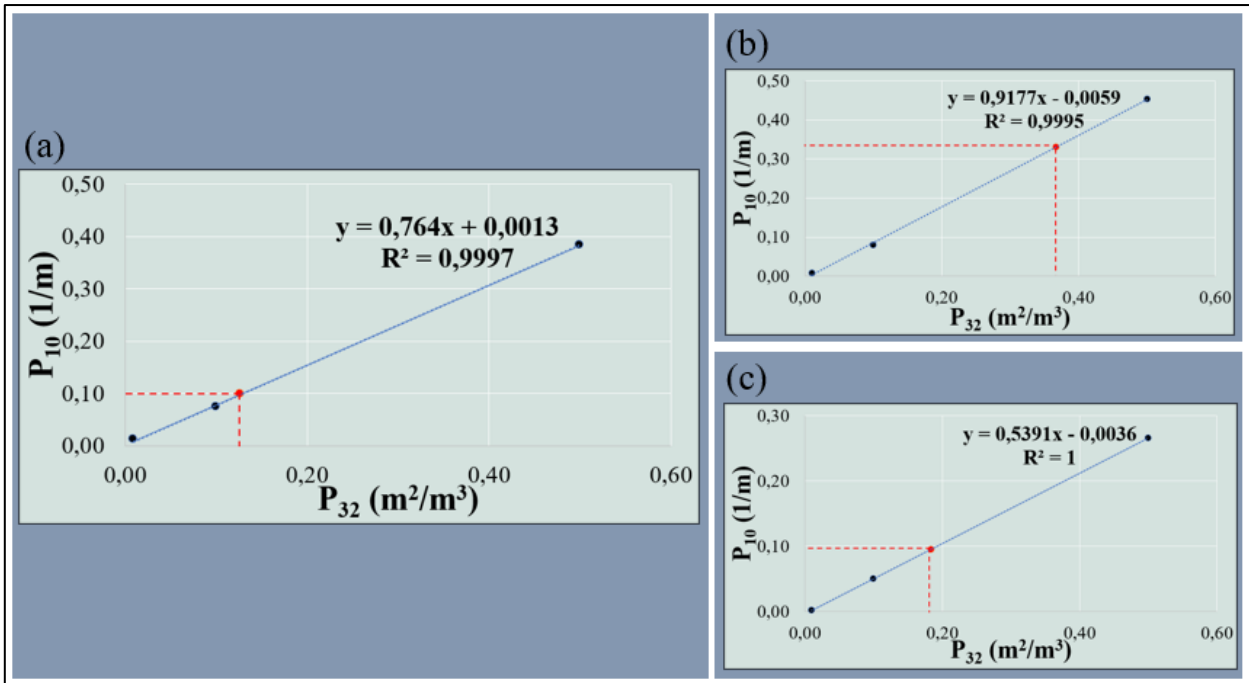


Gráfico 5.12: Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  del sector III. En (a) eje X' en (b) eje Y' y en (c) eje Z.

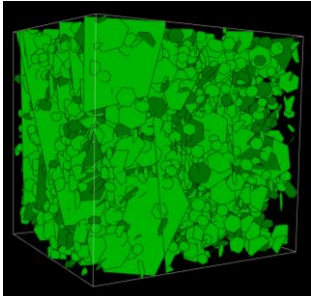
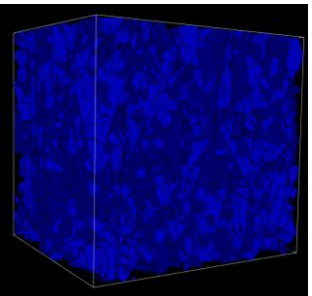
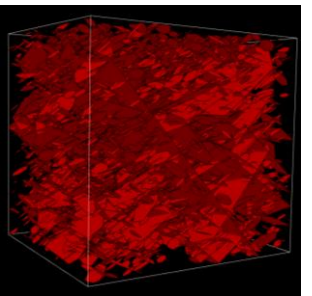
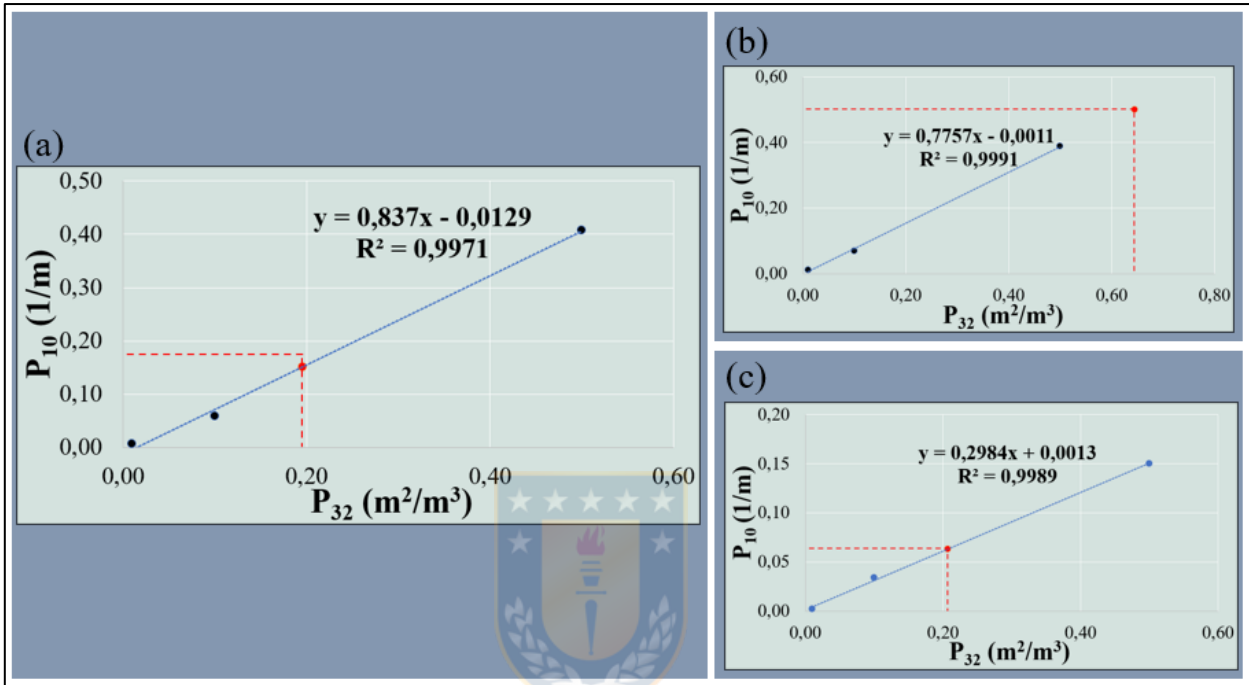
	Eje X'	Eje Y'	Eje Z
$P_{10}$ MAPEADO (1/m)	0,10	0,33	0,10
$P_{32}$ CALIBRADO ( $m^2/m^3$ )	0,13	0,37	0,18
Modelos DFN calibrados	(a) 	(b) 	(c) 

Figura 5.14: Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector III.

En las Figuras (b) se encuentran las fallas explícitas, que se incorporaron a *FracMan* como polígonos de cuatro lados, numerados para poder visualizarlos en las Figuras (c), que corresponden a las mismas estructuras identificadas en los levantamientos de *PointStudio*. En dicho *software*

fueron mapeadas y extendidas. A *FracMan* se añadieron aquellas fallas que resultaron de mayor continuidad y/o controlaban la formación de inestabilidades, esto a modo de facilitar el análisis computacional al *software*. Además, las propiedades que se les dio a estas estructuras fueron distintas que a los conjuntos de fractura.



**Gráfico 5.13: Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  del sector IV.** En (a) eje X' en (b) eje Y' y en (c) eje Z.

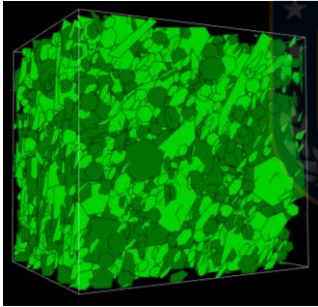
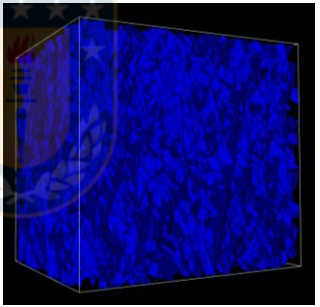
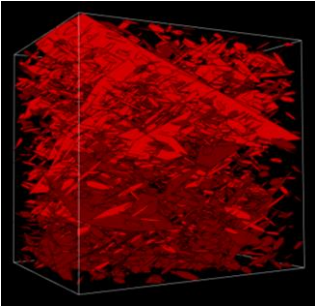
Los modelos híbridos se encuentran en las Figuras (d), y son el resultado de incorporar al análisis de cuña las fallas explícitas mapeadas y los modelos DFN calibrados.

Finalmente, una fotografía o triangulación de los levantamientos tridimensionales con los moldes de las inestabilidades se ilustran en las Figuras (e), estas imágenes permitieron comparar los análisis de cuñas y los modelos híbridos, con los moldes vistos en terreno.

Además, se incorporó para cada sector la estadística de los bloques formados, la cantidad de bloques estables (verdes), inestables (rojos), con los volúmenes y pesos asociados a ambas.

El Análisis de cuña del sector I (Figura 5.18), mostró inestabilidades de un volumen considerable

(algunos bloques inestables presentaron longitudes de un banco simple), ocasionando decreste en los dos bancos superiores, comparado con los moldes vistos en terreno, se observaron similitudes geométricas y espaciales en la formación de las inestabilidades, sin embargo, el volumen no resultó similar. Las fallas incorporadas en el Modelo híbrido mejoraron este aspecto, además aclararon la geometría de las cuñas. Este último modelo simuló mejor el macizo rocoso, representando las inestabilidades que abarcaron hasta dos bancos dobles y la pérdida de berma, produciendo un total 818 bloques inestables (Tabla 5.15).

	Eje X'	Eje Y'	Eje Z
<b>P<sub>10</sub> MAPEADO (1/m)</b>	0,15	0,50	0,06
<b>P<sub>32</sub> CALIBRADO (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,20	0,65	0,21
<b>Modelos DFN calibrados</b>	(a) 	(b) 	(c) 

**Figura 5.15: Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector IV.**

En el Análisis del caso II (Figura 5.19) se generó una cuña de gran volumen, que creó una pérdida de berma en el banco superior, similar a la del banco intermedio vista en terreno. Al incorporar las fallas mapeadas, se formó la cuña con la misma geometría y ubicación del molde en el banco medio. Sin embargo, el volumen de los bloques inestables en Modelo híbrido resultó bastante mayor al realizar la comparación con los moldes, un posible causante pudo ser la gran simplificación del diseño del talud, ya que este sector se ubicaba en una curva del rajo. En el Análisis de cuña se contabilizaron 406 bloques inestables, mientras que para el Modelo híbrido 1.940 (Tabla 5.16).

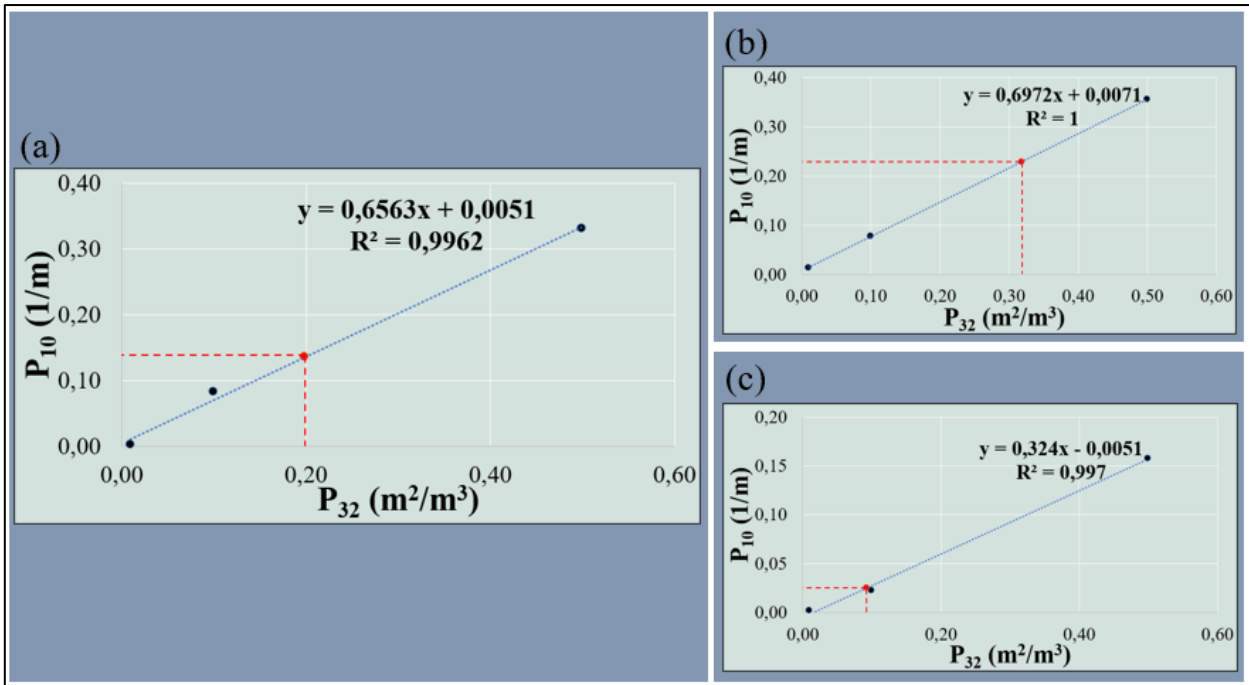


Gráfico 5.14: Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  del sector V. En (a) eje X' en (b) eje Y' y en (c) eje Z.

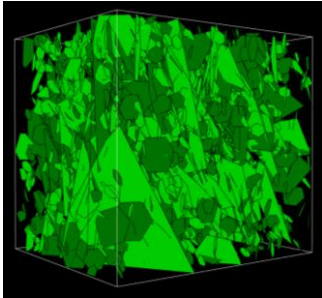
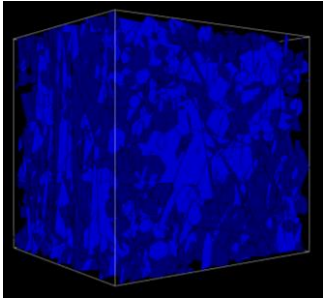
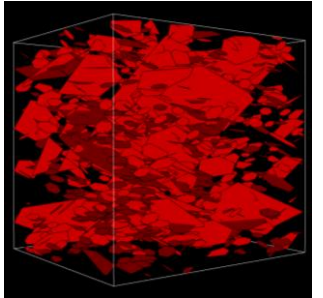
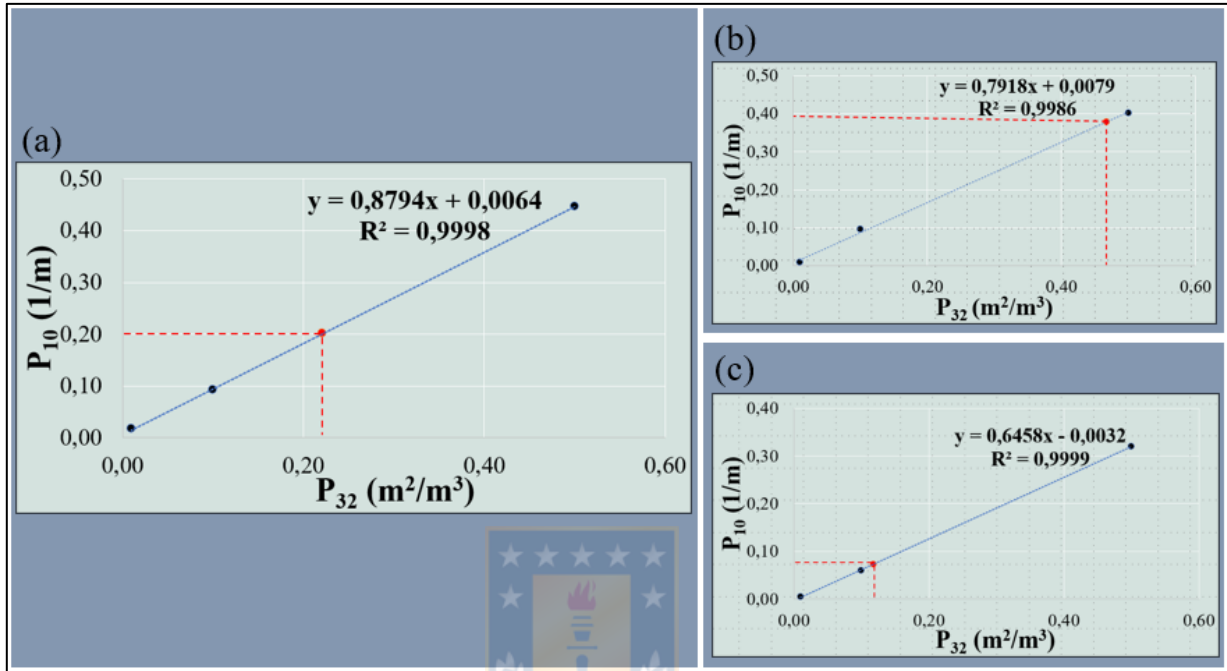
	Eje X'	Eje Y'	Eje Z
$P_{10}$ MAPEADO (1/m)	0,14	0,23	0,03
$P_{32}$ CALIBRADO ( $m^2/m^3$ )	0,20	0,32	0,10
Modelos DFN calibrados	(a) 	(b) 	(c) 

Figura 5.16: Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector V.

El Análisis de cuña del sector III (Figura 5.20) no resultó similar a lo visto en terreno, presentando una baja cantidad de bloques inestables (Tabla 5.17) y, además, poco voluminosos. Las fallas



agregadas generaron cuñas de geometrías, ubicaciones y volúmenes similares a los moldes, formando bloques de gran volumen y amplitud horizontal desde la cresta de los bancos, muy parecidas a las inestabilidades reales.



**Gráfico 5.15: Relación lineal entre los parámetros de intensidad  $P_{32}$  y  $P_{10}$  del sector VI.** En (a) eje X' en (b) eje Y' y en (c) eje Z.

En terreno se observaron escasas inestabilidades en el sector IV (Figura 5.21) y de poco volumen, además se mapearon fallas de poca continuidad. El análisis mostró poca cantidad de cuñas, de bajos volúmenes y varias de ellas en sectores intermedios de los bancos, situación semejante a la real. Al incorporar las fallas solo se crearon 67 bloques inestables más (Tabla 5.18), manteniendo las características del Análisis de cuña.

Al igual que el sector anterior, el análisis del sector V (Figura 5.22) mostró muy pocas inestabilidades, y de pequeño volumen. Con las fallas incorporadas al Modelo híbrido se generaron cuñas, pero las geometrías y los volúmenes no reflejaron lo visto en terreno, aunque la ubicación de estas en la cresta de los bancos resultó similar. El Modelo híbrido de este sector fue el que menos reflejó las características del macizo rocoso. Una posible explicación a la baja representatividad del modelo para este sector puede relacionarse con la simplificación de los datos de cohesión y

ángulo de fricción asignadas a las estructuras. Los datos de los bloques creados se encuentran en la Tabla 5.19.

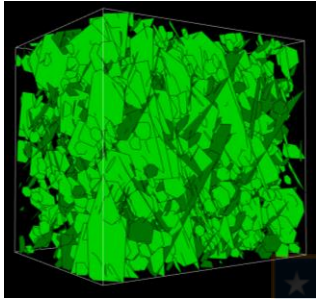
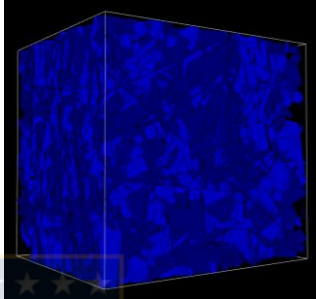
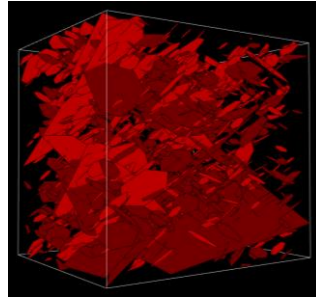
	Eje X'	Eje Y'	Eje Z
<b>P<sub>10</sub> MAPEADO (1/m)</b>	0,20	0,38	0,07
<b>P<sub>32</sub> CALIBRADO (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,22	0,47	0,12
<b>Modelos DFN calibrados</b>	(a) 	(b) 	(c) 

Figura 5.17: Modelos DFN calibrados para cada eje coordenado, sector VI.

Tabla 5.8: Errores del parámetro P<sub>10</sub> (1/m) para el sector I.

Eje	P <sub>10</sub> MAPEADOS (1/m)	P <sub>10</sub> MODELADOS (1/m)	Error (%)
X'	0,25	0,25	2,56
Y'	0,36	0,37	0,34
Z	0,06	0,06	0,49

Tabla 5.9: Errores del parámetro P<sub>10</sub> (1/m) para el sector II.

Eje	P <sub>10</sub> MAPEADOS (1/m)	P <sub>10</sub> MODELADOS (1/m)	Error (%)
X'	0,15	0,15	1,21
Y'	0,64	0,67	4,80
Z	0,03	0,03	3,68

El Análisis de cuña del modelo del último sector (Figura 5.23) creó un gran número de inestabilidades, en su mayoría desde la cresta de los bancos, pero también se aprecian algunas en

la parte media, lo que geométrica y espacialmente resultó representativo. El Modelo híbrido incorporó dos fallas continuas que dieron origen a cuñas de mayor volumen que los moldes, sin embargo, mejoraron sus ubicaciones. En los dos bancos superiores se formaron inestabilidades con pérdida de berma en el mismo sector visto en terreno y de geometrías similares. Los datos de los bloques se encuentran en la Tabla 5.20.

**Tabla 5.10: Errores del parámetro  $P_{10}$  (1/m) para el sector III.**

Eje	$P_{10}$ MAPEADOS (1/m)	$P_{10}$ MODELADOS (1/m)	Error (%)
X'	0,10	0,10	1,56
Y'	0,33	0,33	0,81
Z	0,10	0,09	3,56

**Tabla 5.11: Errores del parámetro  $P_{10}$  (1/m) para el sector IV.**

Eje	$P_{10}$ MAPEADOS (1/m)	$P_{10}$ MODELADOS (1/m)	Error (%)
X'	0,15	0,15	0,64
Y'	0,50	0,48	3,11
Z	0,06	0,06	1,43

**Tabla 5.12: Errores del parámetro  $P_{10}$  (1/m) para el sector V.**

Eje	$P_{10}$ MAPEADOS (1/m)	$P_{10}$ MODELADOS (1/m)	Error (%)
X'	0,14	0,14	3,28
Y'	0,23	0,22	3,88
Z	0,03	0,02	2,22

**Tabla 5.13: Errores del parámetro  $P_{10}$  (1/m) para el sector VI.**

Eje	$P_{10}$ MAPEADOS (1/m)	$P_{10}$ MODELADOS (1/m)	Error (%)
X'	0,20	0,21	3,96
Y'	0,38	0,36	4,80
Z	0,07	0,07	0,24

Tabla 5.14: Errores del parámetro  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) de todos los sectores en estudio.

	$P_{21}$ MAPEADO ( $m/m^2$ )	$P_{21}$ MODELADO ( $m/m^2$ )	Error (%)
Sector I	0,63	0,61	2,95
Sector II	0,64	0,66	3,98
Sector III	0,61	0,59	2,33
Sector IV	0,75	0,73	2,81
Sector V	0,42	0,41	3,79
Sector VI	0,68	0,70	2,98

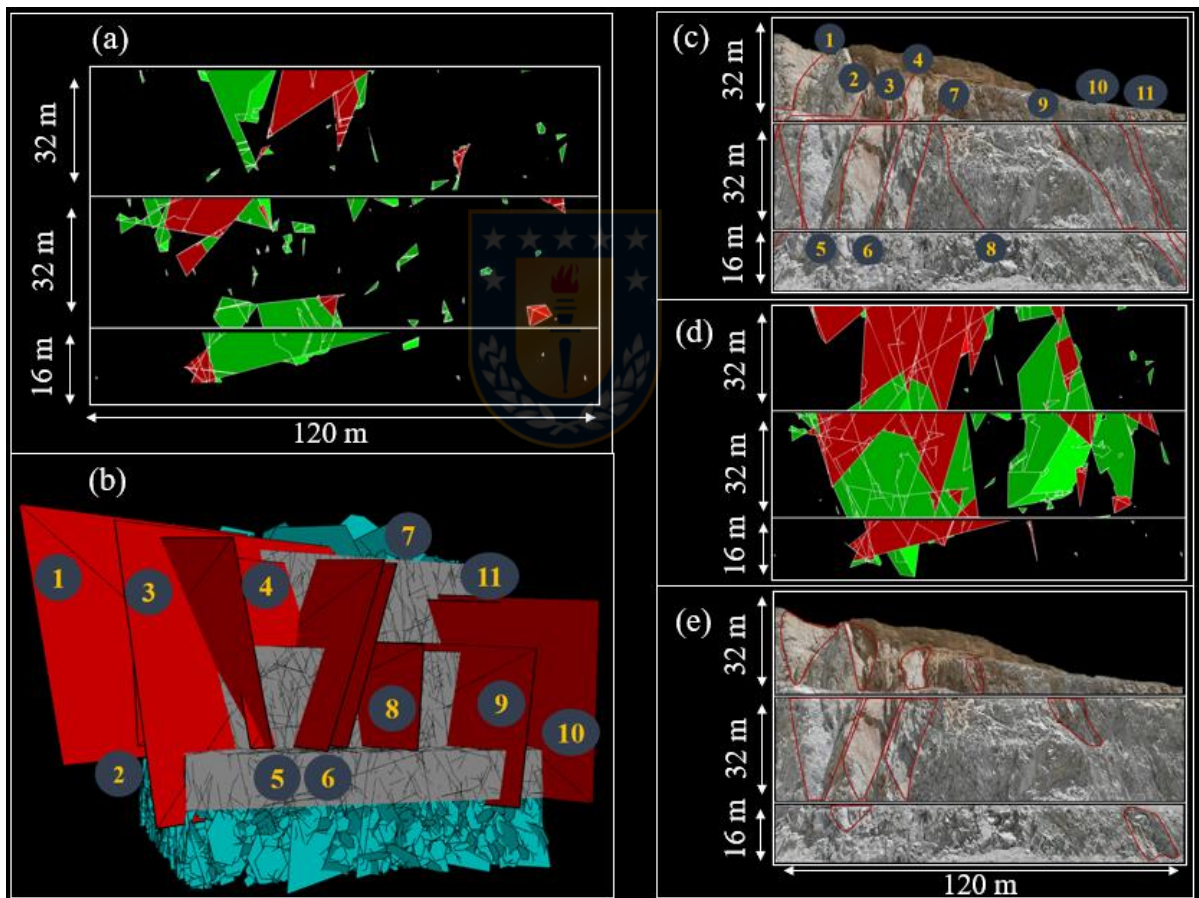
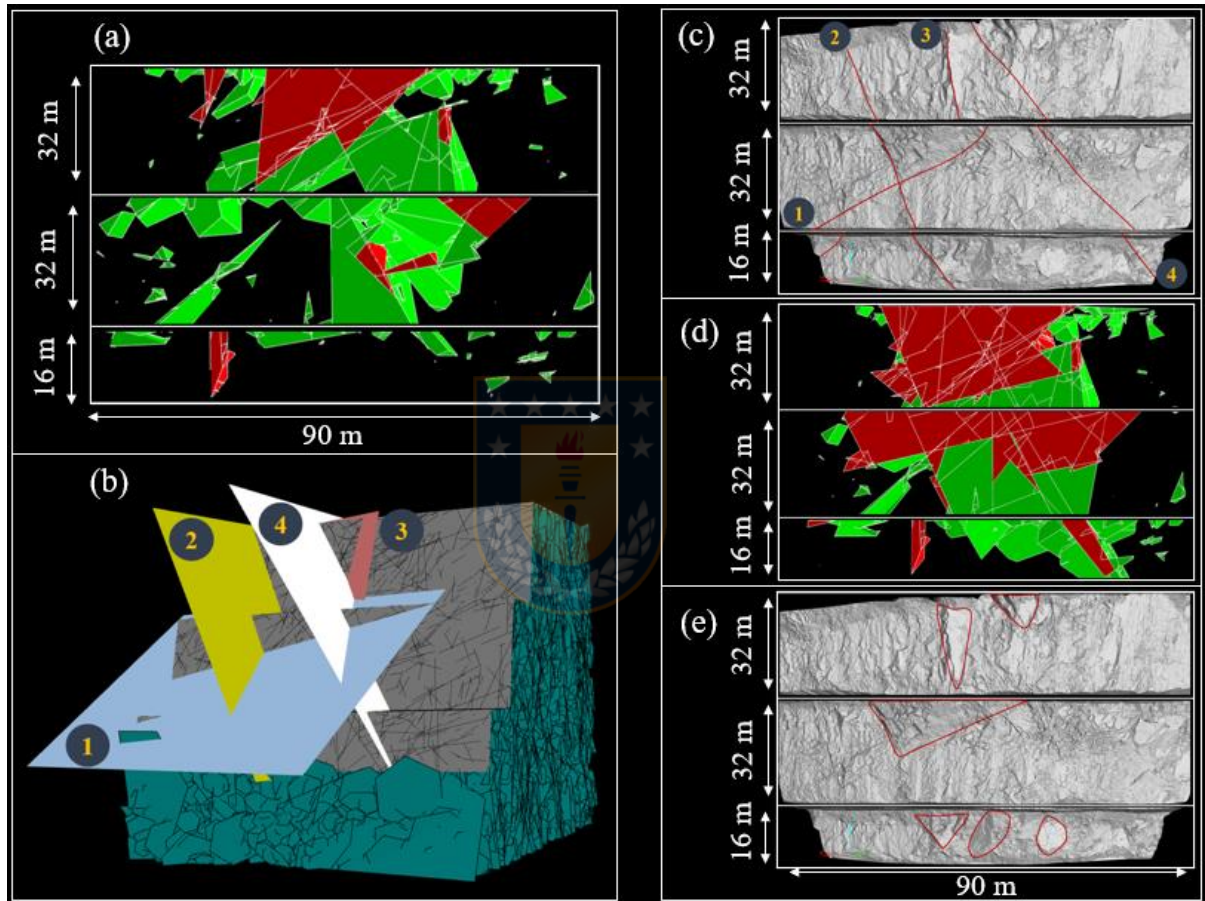


Figura 5.18: Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector I. El sector I presenta una orientación de  $353^\circ$ . En (a) el Análisis de cuña, en (b) fallas simplificadas incorporadas a *FracMan*, en (c) fallas mapeadas, en (d) Modelo híbrido y en (e) moldes de cuñas vistas en terreno. En los modelos de estabilidad cinemática los bloques verdes corresponden a bloques estables, los bloques rojos a inestabilidades y el fondo negro corresponde a macizo rocoso no fracturado.

**Tabla 5.15: Estadísticas de modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector I.** Donde AC corresponde a los datos de los análisis de cuña y MH a los a los modelos híbridos.

	Bloques totales (Bt)	Bloques estables (Be)	Bloques inestables (Bi)	Volumen total Be (m <sup>3</sup> )	Volumen total Bi (m <sup>3</sup> )	Peso total Be (t)	Peso total Bi (t)
AC	729	563	166	6.266,16	2.107,64	16.918,63	5.690,63
MH	2.618	1.800	818	58.186,47	11.948,20	157.103,46	32.260,13

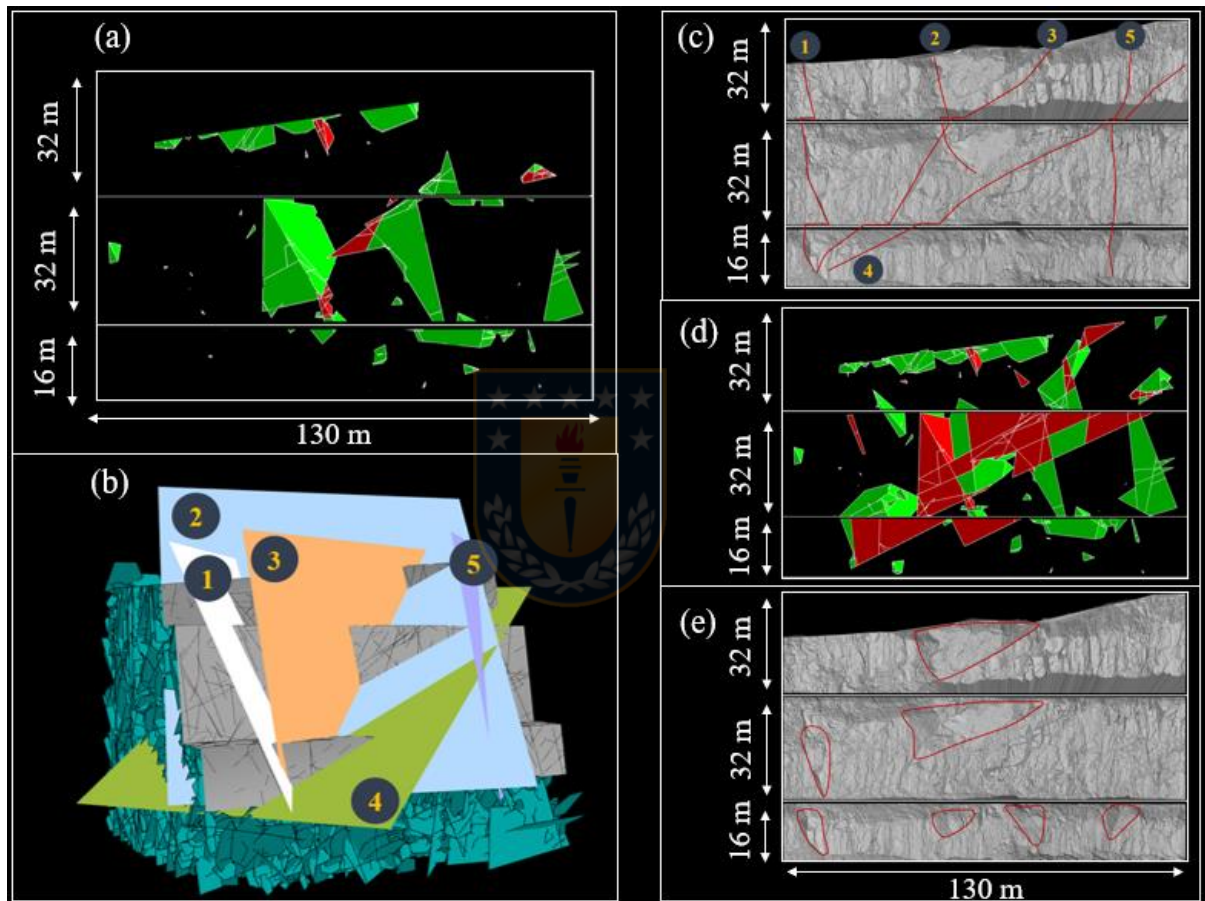


**Figura 5.19: Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector II.** El sector II presenta una orientación de 294°. En (a) el Análisis de cuña, en (b) fallas simplificadas incorporadas a *FracMan*, en (c) fallas mapeadas, en (d) Modelo híbrido y en (e) moldes de cuñas vistas en terreno. En los modelos de estabilidad cinemática los bloques verdes corresponden a bloques estables, los bloques rojos a inestabilidades y el fondo negro corresponde a macizo rocoso no fracturado.



**Tabla 5.16: Estadísticas de modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector II.** Donde AC corresponde a los datos de los análisis de cuña y MH a los a los modelos híbridos.

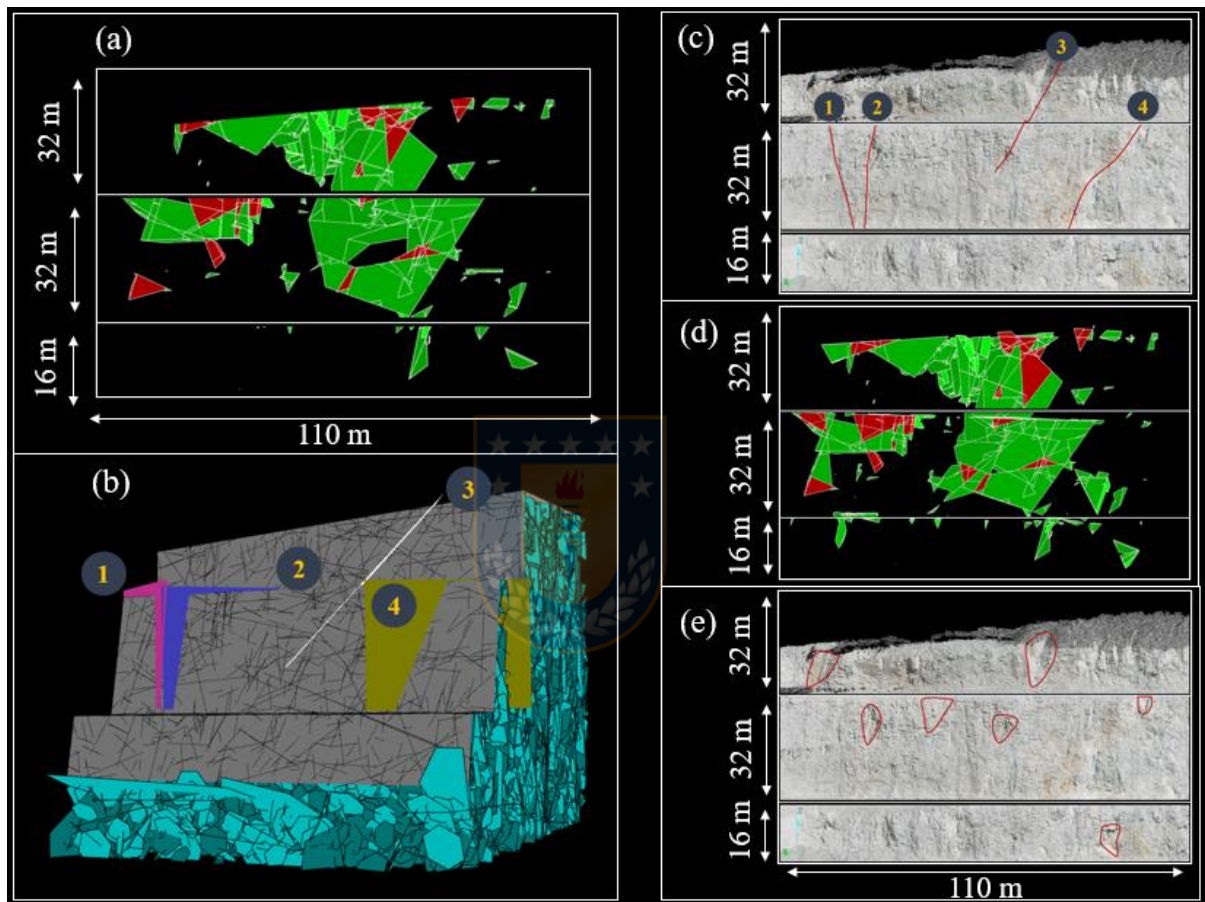
	Bloques totales (Bt)	Bloques estables (Be)	Bloques inestables (Bi)	Volumen total Be (m <sup>3</sup> )	Volumen total Bi (m <sup>3</sup> )	Peso total Be (t)	Peso total Bi (t)
<b>AC</b>	2.191	1.785	406	22.755,87	61.440,86	3.742,53	10.104,82
<b>MH</b>	5.647	3.707	1.940	77.711,54	209.821,16	24.363,39	65.781,14



**Figura 5.20: Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector III.** El sector III presenta una orientación de 278°. En (a) el Análisis de cuña, en (b) fallas simplificadas incorporadas a *FracMan*, en (c) fallas mapeadas, en (d) Modelo híbrido y en (e) moldes de cuñas vistas en terreno. En los modelos de estabilidad cinemática los bloques verdes corresponden a bloques estables, los bloques rojos a inestabilidades y el fondo negro corresponde a macizo rocoso no fracturado.

**Tabla 5.17: Estadísticas de modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector III.** Donde AC corresponde a los datos de los análisis de cuña y MH a los a los modelos híbridos.

	Bloques totales (Bt)	Bloques estables (Be)	Bloques inestables (Bi)	Volumen total Be (m <sup>3</sup> )	Volumen total Bi (m <sup>3</sup> )	Peso total Be (t)	Peso total Bi (t)
AC	529	477	52	7.142,93	19.285,91	77,55	209,37
MH	1.109	787	322	17.413,45	47.016,30	6.675,04	18.022,61

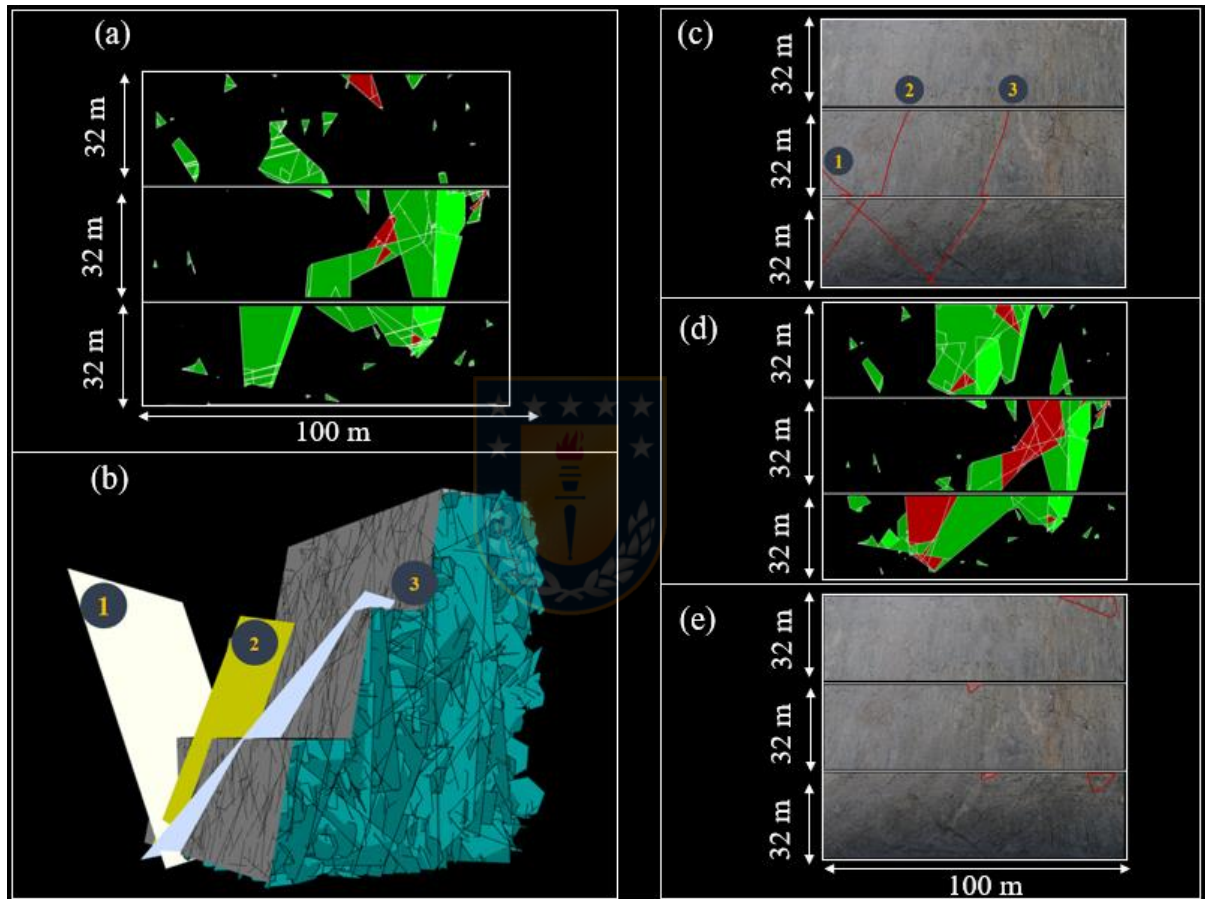


**Figura 5.21: Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector IV.** El sector IV presenta una orientación de 241°. En (a) el Análisis de cuña, en (b) fallas simplificadas incorporadas a *FracMan*, en (c) fallas mapeadas, en (d) Modelo híbrido y en (e) moldes de cuñas vistas en terreno. En los modelos de estabilidad cinemática los bloques verdes corresponden a bloques estables, los bloques rojos a inestabilidades y el fondo negro corresponde a macizo rocoso no fracturado.



**Tabla 5.18: Estadísticas de modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector IV.** Donde AC corresponde a los datos de los análisis de cuña y MH a los a los modelos híbridos.

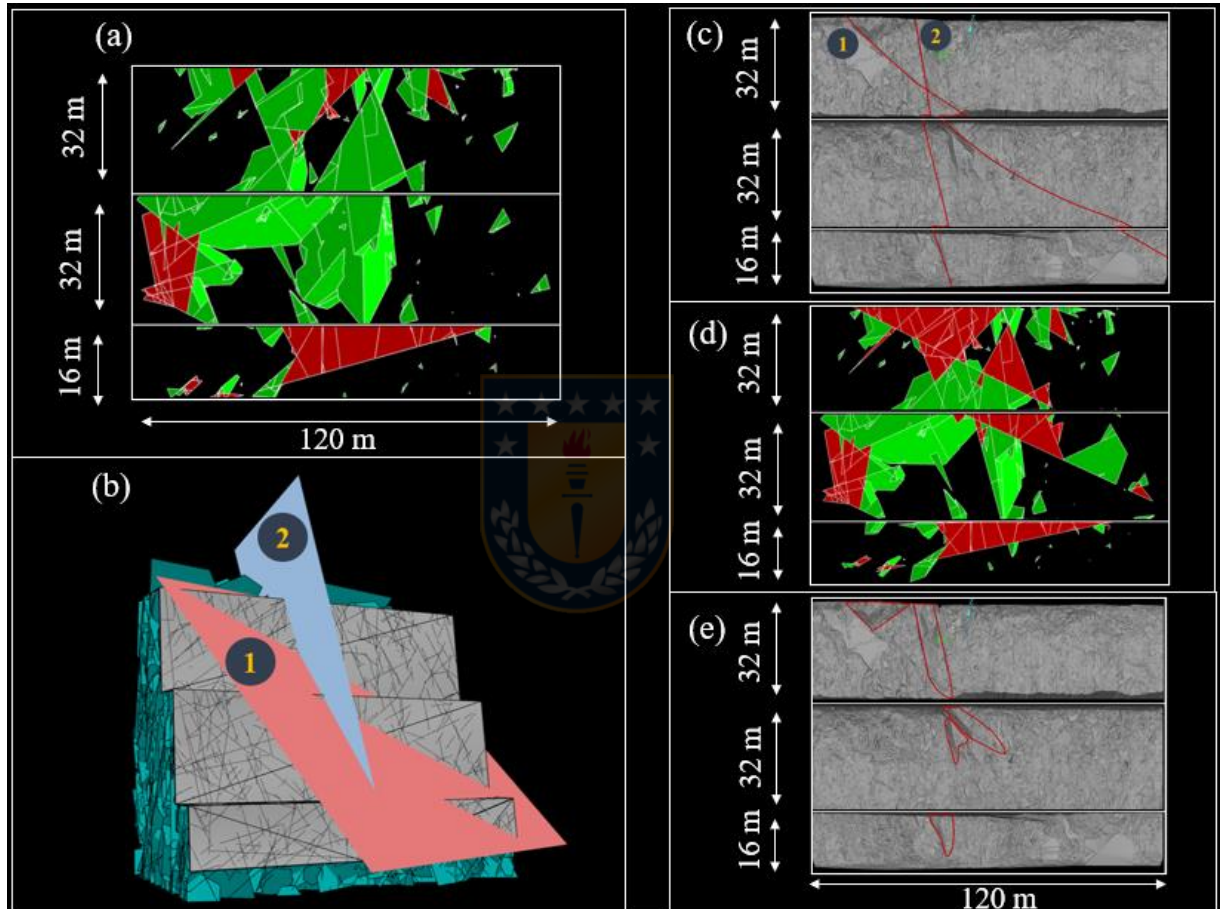
	Bloques totales (Bt)	Bloques estables (Be)	Bloques inestables (Bi)	Volumen total Be (m <sup>3</sup> )	Volumen total Bi (m <sup>3</sup> )	Peso total Be (t)	Peso total Bi (t)
AC	1.618	1.332	286	18.765,78	50.667,61	413,98	1.117,75
MH	2.345	1.992	353	22.255,64	60.090,24	680,85	1.838,30



**Figura 5.22: Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector V.** El sector V presenta una orientación de 209°. En (a) el Análisis de cuña, en (b) fallas simplificadas incorporadas a *FracMan*, en (c) fallas mapeadas, en (d) Modelo híbrido y en (e) moldes de cuñas vistas en terreno. En los modelos de estabilidad cinemática los bloques verdes corresponden a bloques estables, los bloques rojos a inestabilidades y el fondo negro corresponde a macizo rocoso no fracturado.

**Tabla 5.19: Estadísticas de modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector V.** Donde AC corresponde a los datos de los análisis de cuña y MH a los a los modelos híbridos.

	Bloques totales (Bt)	Bloques estables (Be)	Bloques inestables (Bi)	Volumen total Be (m <sup>3</sup> )	Volumen total Bi (m <sup>3</sup> )	Peso total Be (t)	Peso total Bi (t)
AC	303	257	46	8.989,90	24.272,74	146,81	396,39
MH	584	427	157	23.553,29	63.593,89	2.393,86	6.463,41



**Figura 5.23: Modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector VI.** El sector VI presenta una orientación de 182°. En (a) el Análisis de cuña, en (b) fallas simplificadas incorporadas a *FracMan*, en (c) fallas mapeadas, en (d) Modelo híbrido y en (e) moldes de cuñas vistas en terreno. En los modelos de estabilidad cinemática los bloques verdes corresponden a bloques estables, los bloques rojos a inestabilidades y el fondo negro corresponde a macizo rocoso no fracturado.

**Tabla 5.20: Estadísticas de modelos de análisis de estabilidad cinemática del sector VI.** Donde AC corresponde a los datos de los análisis de cuña y MH a los a los modelos híbridos.

	<b>Bloques totales (Bt)</b>	<b>Bloques estables (Be)</b>	<b>Bloques inestables (Bi)</b>	<b>Volumen total Be (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen total Bi (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso total Be (t)</b>	<b>Peso total Bi (t)</b>
<b>AC</b>	988	705	283	19.307,13	52.129,24	2.224,14	6.005,19
<b>MH</b>	1.349	798	551	17.025,05	45.967,64	6.216,85	16.785,50



## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para su mejor ordenamiento se entregan la discusión y conclusiones divididas en subcapítulos de orientaciones, longitudes, intensidades, modelos DFN, modelos de estabilidad cinemática, limitaciones y recomendaciones.

### 6.1. Orientaciones

Los sistemas estructurales definidos a partir de las discontinuidades mapeadas por sector coinciden con estudios previos realizados en DAND (SGEOM, 2017; SGEOM, 2019b):

- El sistema NE - SW se presenta en todos los sectores de Fase 5 DS en mina Don Luis.
- Los sectores I y II, de las paredes W y SW muestran conjuntos de fracturas en orientaciones preferenciales NW - SE y NE - SW, ambos con manteos promedios subverticales.
- Las estructuras de rumbo aproximado E - W se formaron tardíamente, cortando a una de las unidades más jóvenes del área de estudio (Pórfido Don Luis), en esta unidad se emplaza el sector II con un sistema dominante WNW - ESE. Estas orientaciones siguen siendo preferenciales en el sector III.
- En el sector IV en la pared SE del rajo, se conjugan los sistemas NE - SW y los NW - SE.
- Hacia el este, en el sector V se registra el sistema preferencial NNW - SSE de manteos subverticales y para los sectores V y VI se presentan sistemas NE - SW, seguidos por NW - SE.

Ningún caso en estudio muestra sistemas asociados a ciertos largos estructurales en particular, esto se comprueba truncando las longitudes. Los resultados concluyen que no existe necesidad de construir modelos DFN para representar casos particulares. Se corrobora también que la creación de los seis sectores de trabajo fue óptima para definir dominios, ya que cada sector presenta asociaciones de sistemas estructurales específicos.

El método del *bootstrapping* modela la distribución de las orientaciones de manera correcta para todos los sectores en estudio.

## 6.2. Longitudes

Para encontrar la función que se ajusta a los largos estructurales, se mapean un mínimo de 150 discontinuidades por sector. Esta cantidad resulta adecuada para definir la distribución de las redes de fractura.

Las longitudes de las discontinuidades mapeadas ( $\geq 5$  m) para todos los sectores se ajustan a la distribución *Power Law*. Lo que coincide con estudios previos de DAND, donde se determina que para largos truncados las funciones con mejor ajuste son *Gamma*, *Weibull* y *Pareto* (Schulz, 2019). Los histogramas de los radios equivalentes de las trazas indican que las simulaciones resultan representativas de las longitudes mapeadas.



## 6.3. Intensidades

Errores inferiores al 5% se calculan de las frecuencias de fracturas ( $P_{10}$ ) para los distintos ejes coordenados de cada sector, lo que refleja la validez de las simulaciones de los valores de  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ) obtenidas de la relación lineal con dicho parámetro.

$P_{21}$  ( $m/m^2$ ) también muestra errores menores a 5%, lo que asegura que el modelo replica lo observado en terreno.

Por tanto, la propuesta de utilizar la correlación lineal existente entre  $P_{10}$  y  $P_{32}$  funciona de buena manera. Lo que permite optimizar la metodología al minimizar los errores asociados a la construcción de modelos DFN.

## 6.4. Modelos DFN

Las orientaciones, longitudes e intensidades de fracturamiento simulados representan las

características de las estructuras mapeadas. La calibración resulta eficaz, tomando en cuenta que los errores obtenidos no superan el 5% y en estudios previos se consideran válidos errores inferiores a 20% (Schulz, 2019), por tanto, se admiten las calibraciones de todos los modelos. Esto demuestra la validez de la metodología, al representar estocásticamente lo observado en Fase 5 DS.

## 6.5. Modelos de estabilidad cinemática

Los análisis de cuña se utilizan para investigar la estabilidad cinemática de los bloques creados por los modelos estocásticos intersectados con los diseños de los taludes. Para los sectores vistos, estos estudios geomecánicos exhiben inestabilidades de geometrías y ubicaciones consistentes con lo observado en terreno, siendo común la formación de bloques que provocan el descreste de los bancos, escenario reflejado en los análisis de cuña. Por su naturaleza probabilística este tipo de simulación no predice la ubicación exacta de una inestabilidad, es por esto, que se crean los modelos híbridos, que incorporan las fallas explícitas mapeadas de gran continuidad, registrando optimizaciones en la predicción de la ubicación, volumen y geometría de las inestabilidades.

Las representaciones generadas en *FracMan* se comparan con los moldes vistos en terreno. Para los casos de los sectores I, II, III y VI los modelos retrataron cuñas de gran volumen, que afectan a uno o dos bancos dobles, ocasionado pérdidas de bermas. Por lo que se considera que estos análisis simulan de manera correcta la arquitectura interna de los macizos rocosos. Para los sectores IV y V la comparación resulta más compleja, al no existir moldes de inestabilidades de gran tamaño, aun así, en el sector IV ambos modelos exhiben bloques inestables de bajo volumen, en varias ubicaciones dentro del banco y con geometrías similares a las vistas, por tanto, esta simulación también es representativa. Mientras que en el sector V se forman inestabilidades con geometrías y volúmenes poco característicos.

La calibración final de los modelos DFN se da por terminada y exitosa, al considerar que los modelos híbridos son representativos de los macizos rocosos. Este último ajuste resulta fundamental, ya que las validaciones previas de las orientaciones, longitudes e intensidades de las discontinuidades son correctas, pero respecto de los datos que ingresa el usuario. Si las medidas presentan errores sistemáticos y/o accidentales significativos, los modelos pudiesen no ser

característicos de las redes de fractura y esta comparación final confirma que de existir esta clase de errores no afecta a los modelos en mayor medida.

Como se menciona en capítulos anteriores, cada modelo DFN es representativo dentro del dominio definido por los límites del sector, que corresponde a un área mayor a la creada en los análisis de estabilidad. Al validar los modelos se aprueba su uso para ser utilizados en proyecciones a fases futuras del rajo, pudiendo predecir la geometría de las inestabilidades que se formaran, y con bastante precisión su volumen y ubicación, para lo cual es necesario incorporar las fallas explícitas de mayor persistencia de manera proyectada. Estos modelos permiten modificar los diseños considerando las características que tendrán los bloques y/o anticipar las medidas de saneamiento a considerar.

## 6.6. Limitaciones

Los levantamientos tridimensionales con láser *I -Site* resultan efectivos como herramienta de obtención de datos para el desarrollo de modelos de arreglos estructurales. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones. Dentro las que tienen más relevancia en la captura de información se encuentran:

- No permite realizar seguimientos de estructuras en la vertical.
- Pierde información de las partes bajas de los bancos superiores por efectos de la sombra de las crestas de los bancos inferiores.
- Pierde información de las bermas.
- Disminuye la calidad de la nube de puntos hacia los costados del levantamiento.

Otras limitaciones en la construcción de los modelos se relacionan con asumir condiciones y realizar simplificaciones que permitan al *software* procesar la información de manera correcta, las que se nombran a continuación:



- Forma de las estructuras: para los conjuntos de fracturas creados estocásticamente por *FracMan* se utilizan polígonos de seis lados, mientras que las fallas que se ingresan para realizar los modelos híbridos, deben ser polígonos de cuatro lados. En ambos casos, se asumen formas y eliminan sinuosidades de las estructuras.
- Diseño del talud: se crean polígonos de cuatro lados, cuyo rumbo corresponde al promedio de las orientaciones del afloramiento.
- Parámetros de las estructuras: para todos los conjuntos de fractura se utilizan las mismas cohesiones, ángulos de fricción y densidades de las rocas. Además, todas las fallas poseen propiedades iguales, aunque distintas a las de los *sets*.
- No se consideran cargas adicionales: ni hidráulicas, ni sísmicas.

Todas estas simplificaciones causan que los bloques creados por modelos híbridos no sean iguales a los moldes vistos en terreno. Además, es importante mencionar que existen sesgos asociados a la captura de datos, aun así, la metodología intenta reducirlos.

## 6.7. Recomendaciones

Se sugiere incorporar el uso de nuevas tecnologías que permitan la creación de Modelos Digitales de Terreno (*Digital Terrain Model*), construidos mediante fotogrametría utilizando drones para la captura de las imágenes. El uso de drones minimizaría la pérdida de información que ocurre con los levantamientos de *I - Site*. Además, la construcción de DTM optimizaría el tiempo invertido en el mapeo digital.

Asociado a la toma de datos en terreno se sugiere que las nubes de puntos sean tomadas con el equipo en máxima resolución, escaneos que al contener mayor concentración de información mejoran la visualización de los planos de las discontinuidades y sus extensiones. También, se debe contemplar el levantamiento de al menos tres bancos, de tal manera que las ventanas de mapeo se restrinjan al banco intermedio. Respecto a esto, se propone crear la celda alejada de las patas y

crestas de los bancos (a uno o dos metros de distancia), ya que en estos sectores suele faltar información (en patas por caída o deslizamiento de rocas y en crestas porque usualmente se encuentran biseladas). Esta recomendación intenta disminuir el sesgo por censura de Tipo I, al procurar observar lo más continuamente posible (hacia el banco de arriba y abajo) la persistencia de las estructuras. Además, se debe ver la posibilidad de construir la ventana de mapeo en un sector sin cambios de orientación, para facilitar la posterior comparación con los modelos de estabilidad cinemática que utilizan taludes rectos.

Respecto del mapeo se recomienda que los planos pertenecientes a una misma discontinuidad se agrupen en *PointStudio* como una superficie compleja 3D y no como una combinación de planos, ya que se observa una variación en los rumbos y manteos obtenidos, siendo más representativos de la realidad los conseguidos con la formación de la superficie. Igualmente, se sugiere continuar trabajando con discos estructurales, que al crearse deben ser triangulados también como superficie compleja 3D, lo que permite que estos se intersecten con los taludes creados en *FracMan* para el cálculo de  $P_{21}$ .

El cálculo de  $P_{10 \text{ EJE } Y}$  debe realizarse con discos estructurales, y se aconseja establecer un ancho de los planos transversales con los cuales se intersectan, debido a que un plano más ancho de lo necesario causa una subestimación del valor del parámetro.

Referido a la construcción de los modelos DFN se recomienda seguir usando el algoritmo *Enhanced Baecher* para definir el posicionamiento de las fracturas y el *bootstrapping* para las orientaciones, debido a que su utilidad ha sido validada en este trabajo y en estudios previos. Asimismo, y debido a los bajos errores obtenidos y la buena representatividad de los modelos, se sugiere seguir utilizando la metodología de calibración basada en la correlación lineal de los parámetros  $P_{10}$  y  $P_{32}$ .

Finalmente, asociado a los modelos de estabilidad cinemática, se plantea que los taludes pueden ser construidos en otro *software* e importados a *FracMan*, sin embargo, se sugiere crearlos con la herramienta que el programa dispone, lo que simplifica a la superficie y facilita el procesamiento de los análisis. Además, se propone calcular los volúmenes de los moldes de cuñas vistos en

terreno, para compararlos con los bloques inestables creados en *FracMan*, contraste interesante que permitiría evaluar cuantitativamente la representatividad de los modelos.



## 7. REFERENCIAS

- AGUILERA, M. 2007. Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la Región del Maule. Memoria para optar al título de Ingeniera Forestal. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal: 148 pp. Talca.
- AGUIRRE, L. 1960. Geología de los Andes de Chile central, provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas: 70 pp. Santiago.
- ARAUNA, C. & MIRANDA, F. 2000. Recopilación y análisis de estudios y proyectos realizados de la cuenca del río Aconcagua. Memoria para optar al título de Ingeniero Constructor. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería en Construcción: 173 pp. Valparaíso.
- ASTABURUAGA, D.; FARÍAS, M.; CHARRIER, R. & TAPIA, F. 2012. Geología y estructuras del límite Mesozoico - Cenozoico de la cordillera Principal entre 35°30'S, Región del Maule, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 13: 250 - 252. Antofagasta.
- BAROS, M. 2010. Río Blanco y Andina visión de chilenos. Oligrafic Ltda.: 191 pp. Los Andes.
- BLANCO, B. 2013. Análisis de sismicidad inducida período 2012 - 2013 en mina subterránea Río Blanco áreas 17 - 18 y proyecciones para sistema de monitoreo microsísmico en proyecto minería continua en CODELCO, División Andina. Memoria para optar al título de Geofísica. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geofísica: 185 pp. Concepción.
- BOYCE, D. 2015. Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile central durante el Cretácico medio - tardío: el registro estructural y sedimentario en la Formación Las Chilcas. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología: 296 pp. Santiago.
- CASTILLO, E.; KARADI, G. & KRISEK, R. 1972. Unconfined flow through jointed rock. *Water Resources Bulletin*. Vol. 8, (2): 266 - 281.
- CELEDÓN, M. 2016. Formación de la depresión Central en la Región Metropolitana: ¿erosión o tectónica? Punto de vista desde modelos numéricos. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología: 73 pp. Santiago.
- DAVIDSON, P.; KAMENSKY, V.; COOKE, D.; FRIKKEN, P.; HOLLINGS, P.; RYAN, C.; ACHTERBERGH, E. v.; MERNAGH, T.; SKARMETA, J.; SERRANO, L. & VARGAS, R. 2005. Magmatic precursors of hydrothermal fluids at the Río Blanco Cu - Mo deposit, Chile: links to silicate magmas and metal transport. *Society of Economic Geologist*. Vol.

100: 963 - 978.

- DECKART, K.; CLARK, A.; AGUILA, C.; VARGAS, R.; BERTENS, A.; MORTENSEN, J. & FANNING, M. 2005. Magmatic and hydrothermal chronology of the giant Río Blanco porphyry copper deposit, central Chile: implications of an integrated U/Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  database. *Society of Economic Geologist*. Vol. **100**: 905 - 934.
- DERSHOWITZ, W. & EINSTEIN, H. 1988. Characterizing rock joint geometry with joint system models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. **21**: 21 - 51.
- DERSHOWITZ, W. & HERDA, H. 1992. Interpretation of fracture spacing and intensity. Symposium on rock mechanics (USRMS) N° 33, American Rock Mechanics Association. 757 - 766. Rotterdam.
- DERSHOWITZ, W.; HOSSEINPOUR, H. & ROGERS, S. 2019. Kinematic rock slope stability near major facilities. US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium N° 53, American Rock Mechanics Association. 2205 - 2214. New York.
- DIVASTO, C. 2018. Metodología para construcción de modelos de fracturas en minería a rajo abierto, CODELCO, División Andina, Región de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. Departamento Ciencias Geológicas (Inédito): 93 pp. Antofagasta.
- ELMO, D.; ROGERS, S.; STEAD, D. & EBERHARDT, E. 2014. Discrete fracture network approach to characterize rock mass fragmentation and implications for geomechanical upscaling. *Mining Technology*. Vol. **123**, (3): 149 - 161.
- FARÍAS, M.; COMTE, D.; CHARRIER, R.; MARTINOD.; DAVID, C.; TASSARA, A.; TAPIA, F. & FOCK, A. 2010. Crustal - scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: implications for Andean mountain building. *Tectonics*. Vol. **29**, (3): 1 - 22.
- FOCK, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Escuela de Postgrado. Escuela de Ingeniería y Ciencias: 179 pp. Santiago.
- FOCK, A.; CHARRIER, R.; MAKSAEV, V.; FARÍAS, M. & ÁLVAREZ, P. 2006. Evolución cenozoica de los Andes de Chile central (33 - 34°S). Congreso Geológico Chileno N° 11: 205 - 208. Antofagasta.
- FOX, A.; FORCHHAMMER, K.; PETTERSSON, A.; LA POINT, P. & LIM, D.H. 2012. Geological discrete fracture network model for the Olkiluoto Site, Eurajoki, Finland. *Posiva Oy*: 346 pp. Eurajoki.
- FRIKKEN, P. 2003. Breccia - hosted copper - molybdenum mineralisation at Rio Blanco, Chile.

PhD Thesis. University of Tasmania: 290 pp. Tasmania.

- FRIKKEN, P.; COOKE, D.; WALSH, J.; ARCHIBALD, D.; SKARMETA, J.; SERRANO, L. & VARGAS, R. 2005. Mineralogical and isotopic zonation in the Sur - Sur Tourmaline Breccia, Río Blanco - Los Bronces Cu - Mo deposit, Chile: implications for ore genesis. *Society of Economic Geologist*. Vol. **100**: 935 - 961.
- FUENZALIDA, P. 2010. Diseños de explotación en panel caving con trituración temprana con sizers. Tesis para optar al grado de Magister en Minería. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería en Minas: 160 pp. Santiago.
- GANNA, P. & WALL, R. 1997. Evidencias geocronológicas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K/Ar de un hiatus Cretácico Superior - Eoceno en Chile central (33°00' - 33°30'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **24**, (2): 145 - 163.
- GOLDER ASSOCIATES. 2006. Fractures, FracMan and Fragmentation, applications of DFN models to block and panel caving: 6 pp. Burnaby.
- GOLDER ASSOCIATES. 2018. FracMan user's manual, release 7.7, interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation: 567 pp.
- GONZÁLEZ, O. 1963. Observaciones geológicas en el valle del río Volcán. *Revista Minerale*. N° 81: 20 - 61. Santiago.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall: 715 pp. Madrid.
- GRMD. 2019. Plan de Negocios y Desarrollo 2019. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 292 pp. Los Andes.
- HASLER, K. 2007. Petrogénesis del magmatismo bimodal y metamorfismo de muy bajo grado del Cretácico Inferior de la cordillera de la Costa, Chile central (33°20' - 34°00'S). Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología: 194 pp. Santiago.
- HERMOSILLA, J. 2015. Caracterización geológica y cronológica de los eventos de intrusión/brechización y alteración/mineralización del yacimiento Río Blanco, Región de Valparaíso, Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Geología Económica mención Exploración Minera. Universidad Católica del Norte. Departamento de Ciencias de la Ingeniería: 181 pp. Antofagasta.
- HERRERA, F. 2000. Análisis de estabilidad de taludes. 31 pp. Madrid.
- IRARRAZAVAL, V.; SILLOTOE, R.; WILSON, A.; TORO, J.C. & ROBLES, W. 2010. Discovery history of a giant, high - grade, hypogene porphyry copper - molybdenum

- deposit at Los Sulfatos, Los Bronces - Río Blanco district, central Chile. *Society of Economic Geologist*. Special Publications 15: 253 - 269.
- LEE, C.C.; LEE, C.H.; YEH, H.F. & LIN H.I. 2011. Modeling spatial fracture intensity as a control on flow in fractured rock. *Environ Earth Sci*. Vol. **63**: 1199 - 1211.
- LEI, Q.; LATHAM, J.P.; TSANG, C.F.; XIANG, J. & LANG, P. 2015. A new approach to upscaling fracture network models while preserving geostatistical and geomechanical characteristics. *Journal of Geophysical Research: solid Earth*. Vol. **120**: 1 - 24.
- LEÓN, 2016. Determinación del tamaño de las vetillas tipo stockwork mediante fotografía digital 3D y análisis estocástico, mina El Teniente. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología: 194 pp. Santiago.
- LIZAMA, J.M. 2014. Distribuciones estadísticas y análisis de relación entre variables geotécnicas en el Túnel Sur - Sur, Nivel 17, para futuros modelos DFN, yacimiento Río Blanco, CODELCO Chile, División Andina, Región de Valparaíso. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 110 pp. Concepción.
- LONG, J. & WITHERSPOON, P. 1985. The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks. *Journal of Geophysical Research*. Vol. **90**, (B2): 3.087 - 3.098.
- LONG, J.; REMER, J.; WILSON, C. & WITHERSPOON, P. 1982. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*. Vol. **18** (3): 645 - 658.
- LÓPEZ, E. & VERGARA, M. 1982. Geoquímica y petrogénesis de rocas granodioríticas asociadas con el yacimiento cuprífero Río Blanco - Los Bronces. *Revista Geológica de Chile*. N° 15: 59 - 70. Santiago.
- LUEBERT, F. & PLISCOFF, P. 2012. Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones geográficas*. N° 44: 41 - 56.
- MONGE, J. & PÉREZ, A. 2015. Estadística no paramétrica: prueba Chi Cuadrado. Universidad Abierta de Cataluña: 20 pp. Barcelona.
- MORALES, M. 2009. Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería de Mina: 100 pp. Santiago.
- MOSCOSO, R.; PADILLA, H. & RIVANO, S. 1982. Geología de la Hoja de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería: 67 pp. Santiago.
- NASI, C. & THIELE, R. 1982. Estratigrafía del Jurásico y Cretácico de la cordillera de la Costa,



al sur del río Maipo, entre Melipilla y laguna de Aculeo (Chile central). *Revista Geológica de Chile*. N° 16: 81 - 99.

- ORTIZ, F. 2019. Metodología de construcción de modelos DFN para determinación de fragmentación In situ del yacimiento Río Blanco. *Journal of Mining Engineering and Research*. Vol. 1, (1): 55 - 61.
- PEDROSA, I.; JUARROS, J.; ROBLES, A.; BASTEIRO J. & GARCÍA, E. 2014. Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿Qué estadístico utilizar?. *Universitas Psychologica*. Vol. 14, (1): 245 - 254.
- PINEDA, C. MORATA, D.; LELSEN, M. & BARRA, F. 2015. Geocronología U/Pb en circones de la Ignimbrita Pudahuel. Congreso Geológico Chileno N° 14: 526 - 529. La Serena.
- QUEVEDO, F. 2011. La prueba de ji - cuadrado. *Medwave*. N° 12: 1 - 5.
- QUIROGA, R.; FARÍAS, M.; CHARRIER, R. & FOCK, A. 2015. Evolución estructural y paleogeográfica del sector oriental de la cuenca de Abanico (cordillera Principal, entre 33°18' - 33°25'S). Congreso Geológico Chileno N° 14: 69 - 72. La Serena.
- RIVANO, S. 1996. Geología de las Hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería: 202 pp. Santiago.
- ROJAS, M. 2009. Descripción cuantitativa de los procesos de extracción y reducción de mineral en la minería de cobre a cielo abierto. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Industrial: 101 pp. Santiago.
- SCHULZ, K. 2019. Construcción de modelos de redes de fracturas discretas (DFN) a escala fase, para el análisis de estabilidad y geometrías de inestabilidades estructurales en el rajo Don Luis, CODELCO, División Andina, Región de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad Andrés Bello. Facultad de Ingeniería. Escuela Ciencias de la Tierra: 99 pp. Viña del Mar.
- SELLÉS, D. & GANA, P. 2001. Geología del área Talagante - San Francisco de Mostazal, regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería: 30 pp. Santiago.
- SGEOL. 2018. Modelamiento geológico 2018, yacimiento Río Blanco. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geología, CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 67 pp. Los Andes.
- SGEOM. 2017. Modelo estructural, División Andina 2017. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica, CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 52 pp. Los Andes.
- SGEOM. 2019a. Nota interna GRMD - SGEOM - 034 - 2019. Informe Interno Gerencia de

- Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 7 pp. Los Andes.
- SGEOM. 2019b. Evaluación geotécnica y geomecánica Fase 5 DS. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 56 pp. Los Andes.
- SGEOM. 2019c. Procedimiento de captura de información geotécnica mediante escaneo láser. Informe Interno Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Geomecánica. CODELCO Chile, División Andina (Inédito): 20 pp. Los Andes.
- SHORTER, P. 2015. Determinación de fragmentación mediante construcción de modelos de fracturas discretas para el Túnel de exploración Nivel 17, CODELCO - División Andina, Región de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 94 pp. Concepción.
- SKEWES, M. & HOLMGREN, C. 1993. Solevantamiento andino, erosión y emplazamiento de brechas mineralizadas en el depósito de cobre porfídico Los Bronces, Chile central (33°S): aplicación de geotermometría de inclusiones fluidas. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **20**, (1): 71 - 83.
- SKEWES, M.; HOLMGREN, C. & STERN, C. 2003. The Donoso copper - rich, tourmaline - bearing breccia pipe in central Chile: petrologic, fluid inclusion and stable isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *Mineralium Deposita*. Vol. **38**, (1): 2 - 21.
- SONG, J. 2006. Estimation of areal frequency and mean trace length of discontinuities observed in non - planar surfaces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. **39**: 131 - 146.
- STAMBUK, V.; BLONDEL, J. & SERRANO L. 1982. Geología del yacimiento Río Blanco. Congreso Geológico Chileno N° 3: 419 - 442. Concepción.
- STERN, C. 2004. Active andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **31**, (2): 161 - 206.
- THIELE, R. 1980. Geología de la Hoja de Santiago, Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas: 51 pp. Santiago.
- TIRUNEH, H. & STETLER, L.D. 2013. Discontinuity mapping using ground - based LiDAR: case study from an open pit mine. Geomechanics Symposium N° 47: 23 - 26. San Francisco.
- TORO, J.C.; ORTÚZAR, J.; ZAMORANO, J.; CUADRA, P.; HERMOSILLA, J. & SPRÖHNLE, C. 2012. Protracted magmatic - hydrothermal history of the Río Blanco - Los Bronces district, central Chile: development of world's greatest known concentration of copper. *Society of Economic Geologist*. Special Publication 16: 1 - 22.
- TUNIK, M. & ÁLVAREZ, P. 2008. Análisis y edad de la sección calcárea de la Formación Las

Chilcas (Chile) y sus implicancias para la correlación con unidades de Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. **63**, (3): 363 - 379.

VERGARA, M. & LATORRE, J. 1984. El complejo volcánico pliocénico de Río Blanco, Santiago. *Revista Geológica de Chile*. N° 22: 49 - 60.

WARBURTON, P. M. 1980. Stereological interpretation of joint trace data: influence of joint shape and implications for geological surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. **17**: 305 - 316.

ZEEB, C.; GÓMEZ - RIVAS, E.; BONS, P & BLUM, P. 2013. Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin*. Vol. **97**, (9): 1545 - 1566.

ZHANG, L. 2006. Engineering properties of rocks. Butterworth - Heinemann: 379 pp. Tucson.

ZHANG, L. & EINSTEIN, H. 2010. The planar shape of rock joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. **43**: 55 - 68.

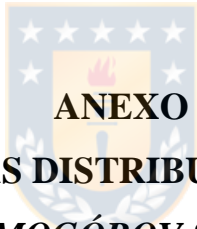




## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1.	Tabulaciones de las distribuciones Chi Cuadrado y <i>Kolmogórov Smirnov</i>	161
2.	Validaciones del método <i>bootstrapping</i> .....	164
3.	Estadísticas de las pruebas de bondad de ajuste .....	170
4.	Cálculos de $P_{21}$ (m/m <sup>2</sup> ) .....	176





**ANEXO 1.**

**TABULACIONES DE LAS DISTRIBUCIONES CHI CUADRADO Y  
*KOLMOGÓROV SMIRNOV***

**Tabla 1.1: Valores para la distribución Chi Cuadrado.** Donde p corresponde a la probabilidad de encontrar un valor mayor o igual que el Chi Cuadrado tabulado y v corresponde a los grados de libertad.

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722	1,6424	1,3233	1,0742	0,8735	0,7083	0,5707	0,4549
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942	3,2189	2,7726	2,4079	2,0996	1,8326	1,5970	1,3863
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514	5,3170	4,6416	4,1083	3,6649	3,2831	2,9462	2,6430	2,3660
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794	6,7449	5,9886	5,3853	4,8784	4,4377	4,0446	3,6871	3,3567
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152	7,2893	6,6257	6,0644	5,5731	5,1319	4,7278	4,3515
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461	8,5581	7,8408	7,2311	6,6948	6,2108	5,7652	5,3481
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479	9,8032	9,0371	8,3834	7,8061	7,2832	6,8000	6,3458
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271	11,0301	10,2189	9,5245	8,9094	8,3505	7,8325	7,3441
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837	13,2880	12,2421	11,3887	10,6564	10,0060	9,4136	8,8632	8,3428
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872	14,5339	13,4420	12,5489	11,7807	11,0971	10,4732	9,8922	9,3418
11	31,2635	28,7291	26,7569	24,7250	21,9200	19,6752	17,2750	15,7671	14,6314	13,7007	12,8987	12,1836	11,5298	10,9199	10,3410
12	32,9092	30,3182	28,2997	26,2170	23,3367	21,0261	18,5493	16,9893	15,8120	14,8454	14,0111	13,2661	12,5838	11,9463	11,3403
13	34,5274	31,8830	29,8193	27,6882	24,7356	22,3620	19,8119	18,2020	16,9848	15,9839	15,1187	14,3451	13,6356	12,9717	12,3398
14	36,1239	33,4262	31,3194	29,1412	26,1189	23,6848	21,0641	19,4062	18,1508	17,1169	16,2221	15,4209	14,6853	13,9961	13,3393
15	37,6978	34,9494	32,8015	30,5780	27,4884	24,9958	22,3071	20,6030	19,3107	18,2451	17,3217	16,4940	15,7332	15,0197	14,3389
16	39,2518	36,4555	34,2671	31,9999	28,8453	26,2962	23,5418	21,7931	20,4651	19,3689	18,4179	17,5646	16,7795	16,0425	15,3385
17	40,7911	37,9462	35,7184	33,4087	30,1910	27,5871	24,7690	22,9770	21,6146	20,4887	19,5110	18,6330	17,8244	17,0646	16,3382
18	42,3119	39,4220	37,1564	34,8052	31,5264	28,8693	25,9894	24,1555	22,7595	21,6049	20,6014	19,6993	18,8679	18,0860	17,3379
19	43,8194	40,8847	38,5821	36,1908	32,8523	30,1435	27,2036	25,3289	23,9004	22,7178	21,6891	20,7638	19,9102	19,1069	18,3376
20	45,3142	42,3358	39,9969	37,5663	34,1696	31,4104	28,4120	26,4976	25,0375	23,8277	22,7745	21,8265	20,9514	20,1272	19,3374
21	46,7963	43,7749	41,4009	38,9322	35,4789	32,6706	29,6151	27,6620	26,1711	24,9348	23,8578	22,8876	21,9915	21,1470	20,3372
22	48,2676	45,2041	42,7957	40,2894	36,7807	33,9245	30,8133	28,8224	27,3015	26,0393	24,9390	23,9473	23,0307	22,1663	21,3370
23	49,7276	46,6231	44,1814	41,6383	38,0756	35,1725	32,0069	29,9792	28,4288	27,1413	26,0184	25,0055	24,0689	23,1852	22,3369
24	51,1790	48,0336	45,5584	42,9798	39,3641	36,4150	33,1962	31,1325	29,5533	28,2412	27,0960	26,0625	25,1064	24,2037	23,3367
25	52,6187	49,4351	46,9280	44,3140	40,6465	37,6525	34,3816	32,2825	30,6752	29,3388	28,1719	27,1183	26,1430	25,2218	24,3366
26	54,0511	50,8291	48,2898	45,6416	41,9231	38,8851	35,5632	33,4295	31,7946	30,4346	29,2463	28,1730	27,1789	26,2395	25,3365
27	55,4751	52,2152	49,6450	46,9628	43,1945	40,1133	36,7412	34,5736	32,9117	31,5284	30,3193	29,2266	28,2141	27,2569	26,3363
28	56,8918	53,5939	50,9936	48,2782	44,4608	41,3372	37,9159	35,7150	34,0266	32,6205	31,3909	30,2791	29,2486	28,2740	27,3362
29	58,3006	54,9662	52,3355	49,5878	45,7223	42,5569	39,0875	36,8538	35,1394	33,7109	32,4612	31,3308	30,2825	29,2908	28,3361







**ANEXO 2.**

**VALIDACIONES DEL MÉTODO *BOOTSTRAPPING***

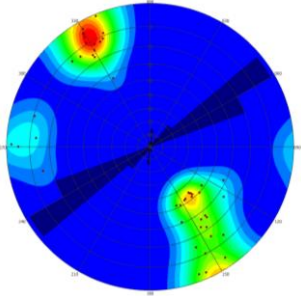
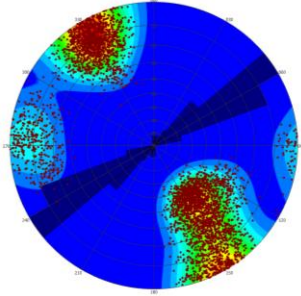
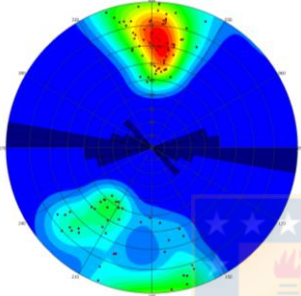
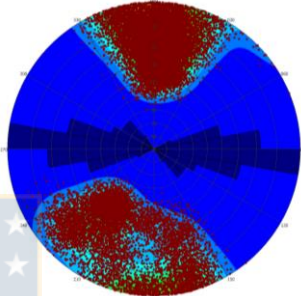
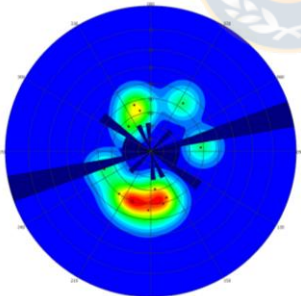
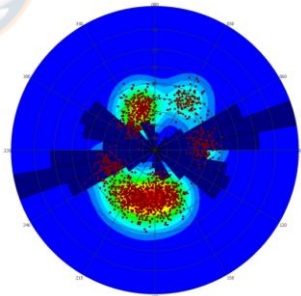
Número de discontinuidades mapeadas	Discontinuidades mapeadas	Discontinuidades simuladas	Número de discontinuidades simuladas
<p><b>Eje X'</b> 47</p>	<p>(a)</p> 	<p>(b)</p> 	<p><b>Eje X'</b> 3.844</p>
<p><b>Eje Y'</b> 104</p>	<p>(c)</p> 	<p>(d)</p> 	<p><b>Eje Y'</b> 19.958</p>
<p><b>Eje Z</b> 13</p>	<p>(e)</p> 	<p>(f)</p> 	<p><b>Eje Z</b> 1.497</p>

Figura 2.1: Validación del método de *bootstrapping* del sector II.

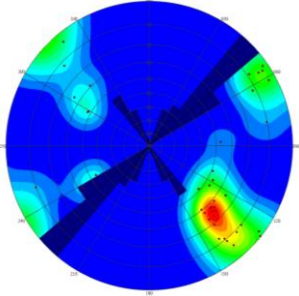
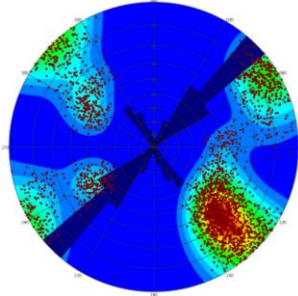
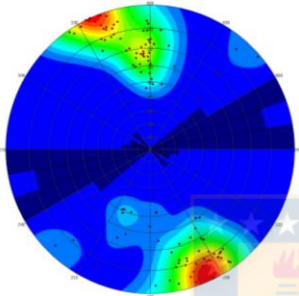
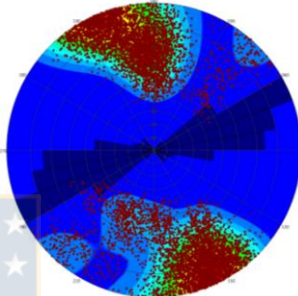
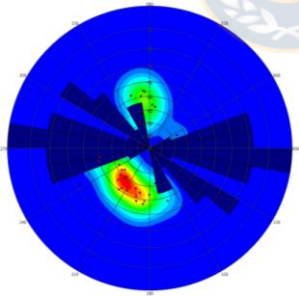
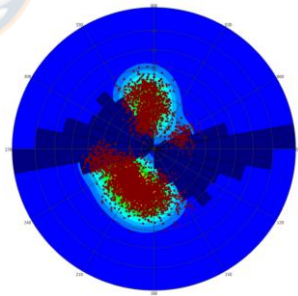
Número de discontinuidades mapeadas	Discontinuidades mapeadas	Discontinuidades simuladas	Número de discontinuidades simuladas
<p>Eje X'</p> <p>41</p>	<p>(a)</p> 	<p>(b)</p> 	<p>Eje X'</p> <p>2.670</p>
<p>Eje Y'</p> <p>117</p>	<p>(c)</p> 	<p>(d)</p> 	<p>Eje Y'</p> <p>8.279</p>
<p>Eje Z</p> <p>31</p>	<p>(e)</p> 	<p>(f)</p> 	<p>Eje Z</p> <p>4.038</p>

Figura 2.2: Validación del método de *bootstrapping* del sector III.



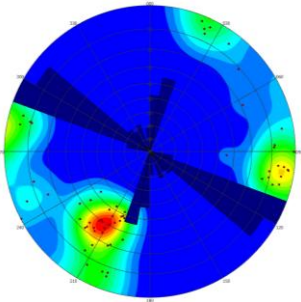
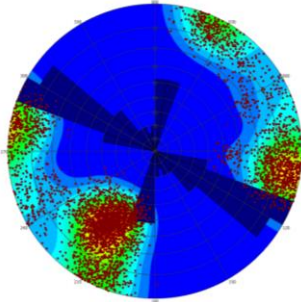
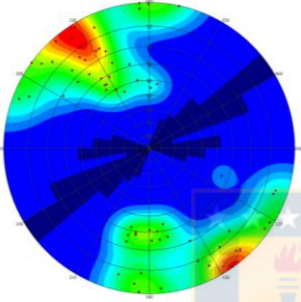
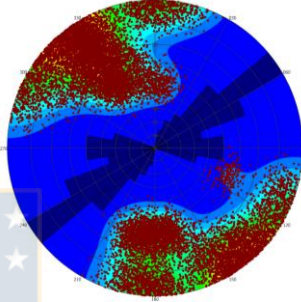
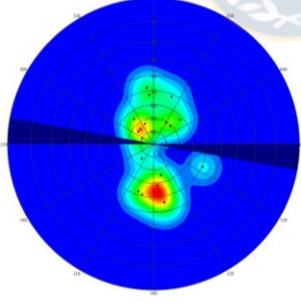
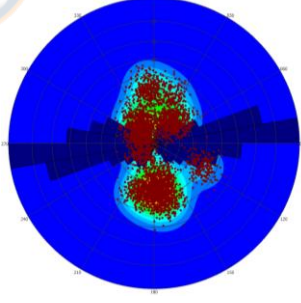
Número de discontinuidades mapeadas	Discontinuidades mapeadas	Discontinuidades simuladas	Número de discontinuidades simuladas
<p>Eje X'</p> <p>63</p>	<p>(a)</p> 	<p>(b)</p> 	<p>Eje X'</p> <p>4.058</p>
<p>Eje Y'</p> <p>69</p>	<p>(c)</p> 	<p>(d)</p> 	<p>Eje Y'</p> <p>13.065</p>
<p>Eje Z</p> <p>21</p>	<p>(e)</p> 	<p>(f)</p> 	<p>Eje Z</p> <p>3.979</p>

Figura 2.3: Validación del método de *bootstrapping* del sector IV.

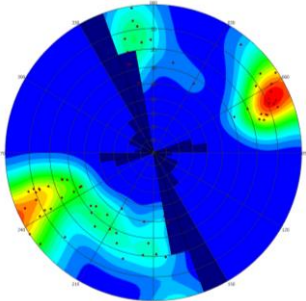
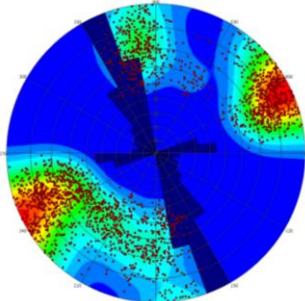
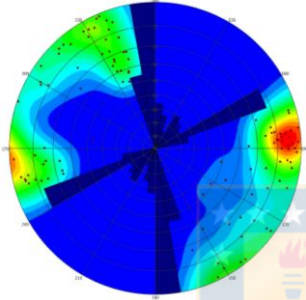
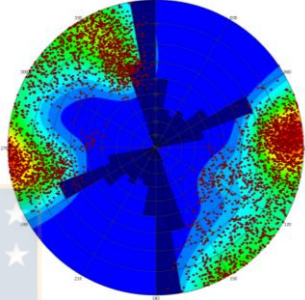
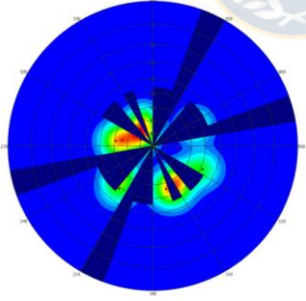
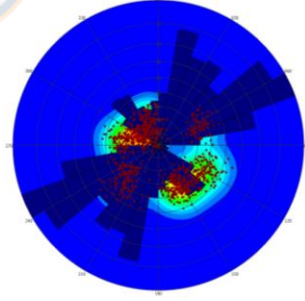
Número de discontinuidades mapeadas	Discontinuidades mapeadas	Discontinuidades simuladas	Número de discontinuidades simuladas
<p><b>Eje X'</b> 69</p>	<p>(a)</p> 	<p>(b)</p> 	<p><b>Eje X'</b> 2.260</p>
<p><b>Eje Y'</b> 105</p>	<p>(c)</p> 	<p>(d)</p> 	<p><b>Eje Y'</b> 3.844</p>
<p><b>Eje Z</b> 12</p>	<p>(e)</p> 	<p>(f)</p> 	<p><b>Eje Z</b> 1.058</p>

Figura 2.4: Validación del método de *bootstrapping* del sector V.

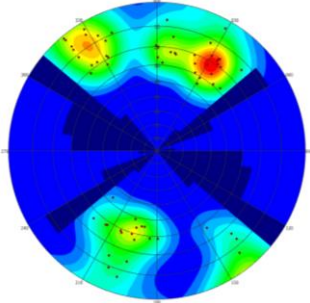
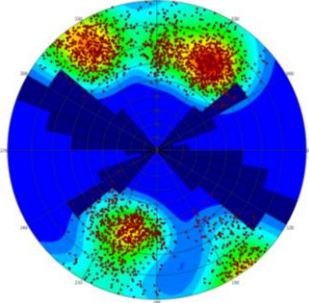
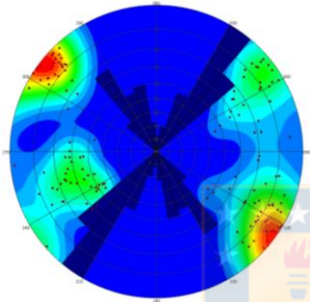
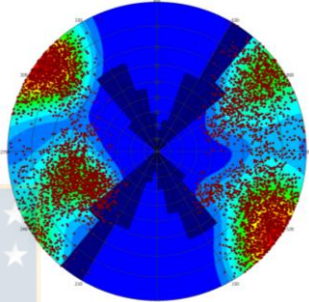
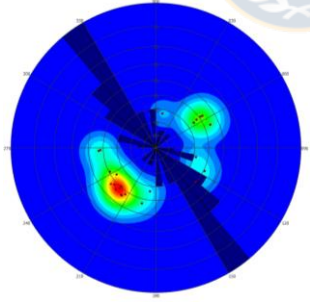
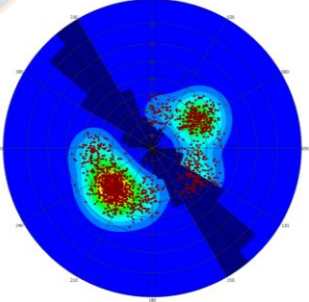
Número de discontinuidades mapeadas	Discontinuidades mapeadas	Discontinuidades simuladas	Número de discontinuidades simuladas
<p><b>Eje X'</b> 65</p>	<p>(a)</p> 	<p>(b)</p> 	<p><b>Eje X'</b> 2.586</p>
<p><b>Eje Y'</b> 137</p>	<p>(c)</p> 	<p>(d)</p> 	<p><b>Eje Y'</b> 5.673</p>
<p><b>Eje Z</b> 23</p>	<p>(e)</p> 	<p>(f)</p> 	<p><b>Eje Z</b> 1.358</p>

Figura 2.5: Validación del método de *bootstrapping* del sector VI.





**ANEXO 3.**

**ESTADÍSTICAS DE LAS PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE**

Tabla 3.1. Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado para los largos estructurales del sector II.

Distribución	Chi Cuadrado, $\alpha = 0,02$				
	$X^2$	$c$	$X_{c,\alpha}^2$	Valor p	$H_0$
Pareto	13,44	7	16,62	0,06	Aceptada
Lognormal	6,03	7	16,62	0,54	Aceptada
Weibull	19,48	7	16,62	0,01	Rechazada
Normal	65,35	6	15,03	$3,66 \times 10^{-12}$	Rechazada
Gamma	42,90	7	16,62	$3,49 \times 10^{-7}$	Rechazada
Exponencial	67,66	7	16,62	$4,38 \times 10^{-12}$	Rechazada
Uniforme	-				No aplica

Tabla 3.2. Prueba de bondad de ajuste *Kolmogórov Smirnov* para los largos estructurales del sector II.

Distribución	Kolmogórov Smirnov, $n=164$ ; $\alpha = 0,02$			
	$D$	$D_{n,\alpha}$	Valor p	$H_0$
Pareto	0,09	0,12	0,11	Aceptada
Lognormal	0,12		0,02	Rechazada
Weibull	0,16		$4,63 \times 10^{-4}$	Rechazada
Normal	0,26		$2,84 \times 10^{-10}$	Rechazada
Gamma	0,30		$1,23 \times 10^{-13}$	Rechazada
Exponencial	0,36		$1,63 \times 10^{-19}$	Rechazada
Uniforme	0,31		$8,54 \times 10^{-15}$	Rechazado

Tabla 3.3. Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado para los largos estructurales del sector III.

Distribución	Chi Cuadrado, $\alpha = 0,02$				
	$X^2$	$c$	$X_{c,\alpha}^2$	Valor p	H <sub>0</sub>
<b>Pareto</b>	7,39	7	16,62	0,39	Aceptada
<b>Lognormal</b>	16,26	7	16,62	0,02	Aceptada
<b>Weibull</b>	34,86	7	16,62	$1,19 \times 10^{-5}$	Rechazada
<b>Normal</b>	56,39	6	15,03	$2,43 \times 10^{-10}$	Rechazada
<b>Gamma</b>	56,63	7	16,62	$7,08 \times 10^{-10}$	Rechazada
<b>Exponencial</b>	43,79	7	16,62	$2,34 \times 10^{-7}$	Rechazada
<b>Uniforme</b>	-				No aplica

Tabla 3.4. Prueba de bondad de ajuste *Kolmogórov Smirnov* para los largos estructurales del sector III.

Distribución	Kolmogórov Smirnov, $n=189$ ; $\alpha = 0,02$			
	$D$	$D_{n,\alpha}$	Valor p	H <sub>0</sub>
<b>Pareto</b>	0,06	0.11	0,58	Aceptada
<b>Lognormal</b>	0,15		$4,93 \times 10^{-4}$	Rechazada
<b>Weibull</b>	0,21		$1,28 \times 10^{-7}$	Rechazada
<b>Normal</b>	0,29		$4,07 \times 10^{-14}$	Rechazada
<b>Gamma</b>	0,36		0	Rechazada
<b>Exponencial</b>	0,31		$2,17 \times 10^{-16}$	Rechazada
<b>Uniforme</b>	0,34		$2,17 \times 10^{-19}$	Rechazada

Tabla 3.5. Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado para los largos estructurales del sector IV.

Distribución	Chi Cuadrado, $\alpha = 0,02$				
	$X^2$	$c$	$X^2_{c,\alpha}$	Valor p	H <sub>0</sub>
<b>Pareto</b>	2,39	7	16,62	0,93	Aceptada
<b>Lognormal</b>	18,91	7	16,62	0,01	Rechazada
<b>Weibull</b>	45,02	7	16,62	$4,64 \times 10^{-8}$	Rechazada
<b>Normal</b>	42,45	6	15,03	$1,50 \times 10^{-7}$	Rechazada
<b>Gamma</b>	44,27	7	16,62	$1,90 \times 10^{-7}$	Rechazada
<b>Exponencial</b>	67,06	7	16,62	$5,80 \times 10^{-12}$	Rechazada
<b>Uniforme</b>	-				No aplica

Tabla 3.6. Prueba de bondad de ajuste *Kolmogórov Smirnov* para los largos estructurales del sector IV.

Distribución	Kolmogórov Smirnov, $n=153; \alpha = 0,02$			
	$D$	$D_{n,\alpha}$	Valor p	H <sub>0</sub>
<b>Pareto</b>	0,04	0,12	0,96	Aceptada
<b>Lognormal</b>	0,17		$1,90 \times 10^{-4}$	Rechazada
<b>Weibull</b>	0,22		$6,37 \times 10^{-7}$	Rechazada
<b>Normal</b>	0,27		$4,90 \times 10^{-10}$	Rechazada
<b>Gamma</b>	0,31		$1,76 \times 10^{-13}$	Rechazada
<b>Exponencial</b>	0,40		0	Rechazada
<b>Uniforme</b>	0,32		$2,77 \times 10^{-14}$	Rechazada

Tabla 3.7. Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado para los largos estructurales del sector V.

Distribución	Chi Cuadrado, $\alpha = 0,02$				
	$X^2$	$c$	$X^2_{c,\alpha}$	Valor p	H <sub>0</sub>
<b>Pareto</b>	15,06	7	16,62	0,04	Aceptada
<b>Lognormal</b>	48,57	6	15,03	$9,08 \times 10^{-9}$	Rechazada
<b>Weibull</b>	77,26	6	15,03	$1,31 \times 10^{-14}$	Rechazada
<b>Normal</b>	97,90	5	13,39	0	Rechazada
<b>Gamma</b>	192,89	5	13,39	0	Rechazada
<b>Exponencial</b>	132,10	7	16,62	0	Rechazada
<b>Uniforme</b>	-				No aplica

Tabla 3.8. Prueba de bondad de ajuste *Kolmogórov Smirnov* para los largos estructurales del sector V.


Distribución	Kolmogórov Smirnov, $n=186; \alpha = 0,02$			
	$D$	$D_{n,\alpha}$	Valor p	H <sub>0</sub>
<b>Pareto</b>	0,07	0,11	0,39	Aceptada
<b>Lognormal</b>	0,19		$3,92 \times 10^{-6}$	Rechazada
<b>Weibull</b>	0,25		$6,36 \times 10^{-11}$	Rechazada
<b>Normal</b>	0,35		0	Rechazada
<b>Gamma</b>	0,51		0	Rechazada
<b>Exponencial</b>	0,37		0	Rechazada
<b>Uniforme</b>	0,39		0	Rechazada

Tabla 3.9. Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado para los largos estructurales del sector VI.

Distribución	Chi Cuadrado, $\alpha = 0,02$				
	$X^2$	$c$	$X_{c,\alpha}^2$	Valor p	H <sub>0</sub>
Pareto	3,37	7	16,62	0,85	Aceptada
Lognormal	31,98	7	16,62	$4,09 \times 10^{-5}$	Rechazada
Weibull	71,79	7	16,62	$6,43 \times 10^{-13}$	Rechazada
Normal	97,97	5	13,39	0	Rechazada
Gamma	212,49	6	15,03	0	Rechazada
Exponencial	107,14	7	16,62	0	Rechazada
Uniforme	-				No aplica

Tabla 3.10. Prueba de bondad de ajuste *Kolmogórov Smirnov* para los largos estructurales del sector VI.

Distribución	Kolmogórov Smirnov, $n=225; \alpha = 0,02$			
	$D$	$D_{n,\alpha}$	Valor p	H <sub>0</sub>
Pareto	0,04	0,10	0,76	Aceptada
Lognormal	0,17		$2,91 \times 10^{-6}$	Rechazada
Weibull	0,23		$1,10 \times 10^{-10}$	Rechazada
Normal	0,34		0	Rechazada
Gamma	0,50		0	Rechazada
Exponencial	0,32		0	Rechazada
Uniforme	0,38		0	Rechazada

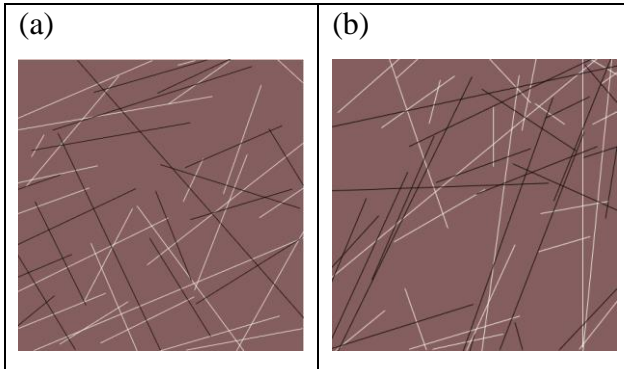


**ANEXO 4.**  
**CÁLCULOS DE  $P_{21}$  (m/m<sup>2</sup>)**



**Tabla 4.1: Valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) mapeados y modelados para el sector II.**

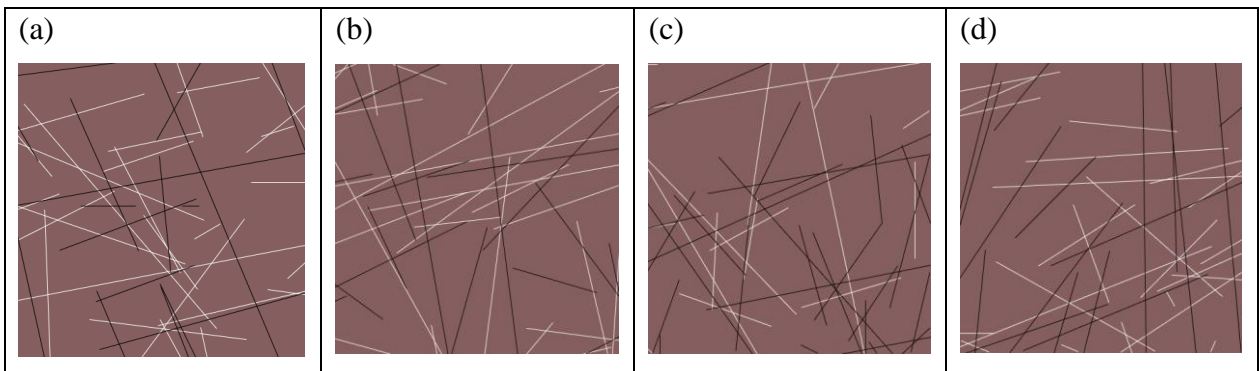
	Celda 1	Celda 2	Promedio
$P_{21}$ MAPEADO ( $m/m^2$ )	0,72	0,55	0,64
$P_{21}$ MODELADO ( $m/m^2$ )	0,71	0,61	0,66



**Figura 4.1: Trazas creadas por las intersecciones de los discos estructurales (negro) y los conjuntos de fractura (blanco) del sector II con las superficies, cálculo de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ). En (a) celda 1 y en (b) celda 2.**

**Tabla 4.2: Valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) mapeados y modelados para el sector III.**

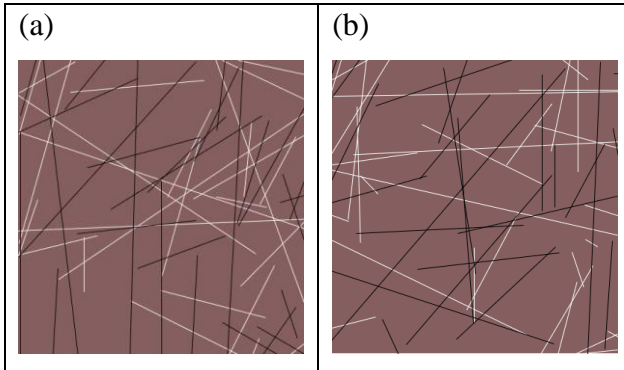
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Promedio
$P_{21}$ MAPEADO ( $m/m^2$ )	0,51	0,53	0,66	0,74	0,61
$P_{21}$ MODELADO ( $m/m^2$ )	0,67	0,70	0,58	0,43	0,59



**Figura 4.2: Trazas creadas por las intersecciones de los discos estructurales (negro) y los conjuntos de fractura (blanco) del sector III con las superficies, cálculo de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ). En (a) celda 1, en (b) celda 2, en (c) celda 3 y en (d) celda 4.**

**Tabla 4.3: Valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) mapeados y modelados para el sector IV.**

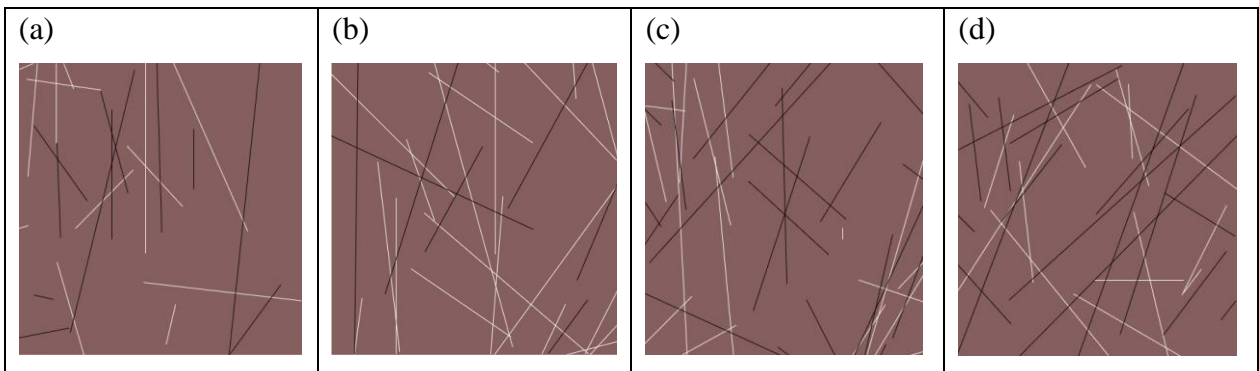
	Celda 1	Celda 2	Promedio
<b><math>P_{21}</math> MAPEADO (<math>m/m^2</math>)</b>	0,78	0,72	0,75
<b><math>P_{21}</math> MODELADO (<math>m/m^2</math>)</b>	0,79	0,66	0,73



**Figura 4.3: Trazas creadas por las intersecciones de los discos estructurales (negro) y los conjuntos de fractura (blanco) del sector IV con las superficies, cálculo de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ). En (a) celda 1 y en (b) celda 2.**

**Tabla 4.4: Valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) mapeados y modelados para el sector V.**

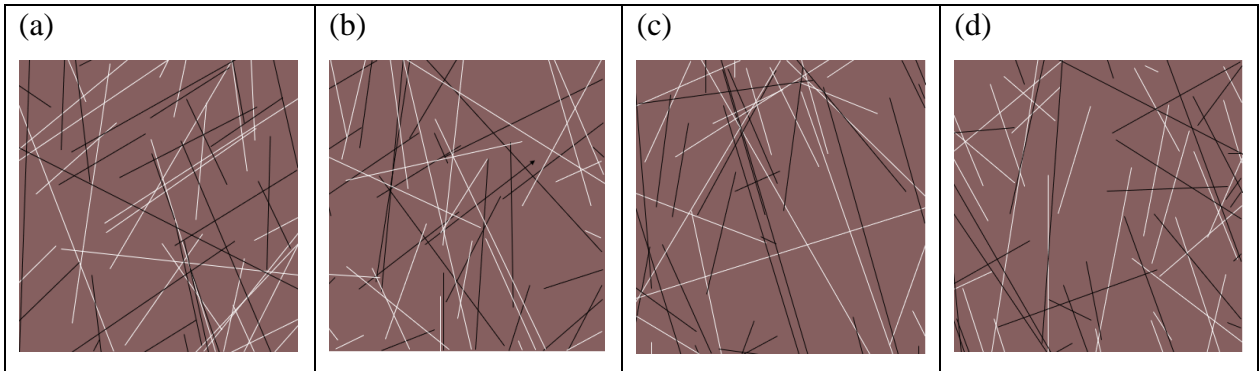
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Promedio
<b><math>P_{21}</math> MAPEADO (<math>m/m^2</math>)</b>	0,31	0,28	0,50	0,60	0,42
<b><math>P_{21}</math> MODELADO (<math>m/m^2</math>)</b>	0,26	0,58	0,39	0,40	0,41



**Figura 4.4: Trazas creadas por las intersecciones de los discos estructurales (negro) y los conjuntos de fractura (blanco) del sector V con las superficies, cálculo de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ). En (a) celda 1, en (b) celda 2, en (c) celda 3 y en (d) celda 4.**

**Tabla 4.5: Valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) mapeados y modelados para el sector VI.**

	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Promedio
<b><math>P_{21}</math> MAPEADO (<math>m/m^2</math>)</b>	0,76	0,69	0,57	0,69	0,68
<b><math>P_{21}</math> MODELADO (<math>m/m^2</math>)</b>	0,82	0,70	0,62	0,65	0,70



**Figura 4.5: Trazas creadas por las intersecciones de los discos estructurales (negro) y los conjuntos de fractura (blanco) del sector VI con las superficies, cálculo de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ). En (a) celda 1, en (b) celda 2, en (c) celda 3 y en (d) celda 4.**

