



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**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**

**ÍTALO ADRIÁN LEÓN MOLINA**

PROFESOR GUÍA:  
ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS  
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE  
2016

## Resumen

### DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS VETILLAS TIPO *STOCKWORK* MEDIANTE FOTOGRAFÍA DIGITAL 3D Y ANÁLISIS ESTOCÁSTICO, MINA EL TENIENTE.

En minería subterránea, los problemas de inestabilidad de las excavaciones dependen esencialmente de los esfuerzos y de las características del macizo rocoso. Los esfuerzos se asocian a la condición *in situ* (profundidad, tectonismo, otros) y a los inducidos por las mismas excavaciones (tamaño y forma). En relación al macizo rocoso, son importantes las características del material o roca intacta, pero sobre todo las características geométricas y mecánicas del arreglo estructural. Se ha observado que en las grandes inestabilidades geomecánicas en mina El Teniente (explosiones de roca y cuñas) existe un importante control estructural, en muchos casos definido por estructuras geológicas sub paralelas a las excavaciones (González & Brzovic, 2015), de trazas menores a los estándares de mapeos mina y/o muy difíciles de observar en ellos.

Dentro las características mecánicas y geométricas de las estructuras geológicas, el tamaño o largo también es una de las más importantes y a su vez más difíciles de observar por su intrínseca característica 3D (observaciones en sondajes 1D, afloramiento rocoso o cara de una excavación 2D). Para resolver el tamaño de las estructuras geológicas en torno a las excavaciones, la literatura especializada en geología estructural ha avanzado con el desarrollo y la construcción de lo que se ha denominado el Arreglo Estructural en 3D o *Discrete Fracture Network (DFN)*. El DFN, en relación a largo de las estructuras geológicas, se basa en las relaciones matemáticas de observaciones en 2D y la propiedad 3D tamaño de las mismas, desarrollada por Warburton (1980).

Trabajos previos realizados en Mina El Teniente, basados en la construcción de modelos estocásticos del arreglo estructural, han establecido un tamaño medio de las estructuras geológicas (vetillas tipo *stockwork*) de 1,0 m para una distribución lognormal y de 0,9 m para un distribución exponencial en la roca dacita (Brzovic y Herrera, 2011). Es de esperar que esta característica geológica del *stockwork* presente variaciones a lo ancho y largo del yacimiento.

En este trabajo se presenta una metodología que permite la construcción de modelos de DFN a partir de la información obtenida del mapeo de estructuras mediante el uso de la fotogrametría digital en el *software 3DM Analyst*. En otras palabras, se construye un modelo DFN, definido por parámetros básicos, que se ajusta a las propiedades observadas en fotografías digitales 3D de los desarrollos (Mapeos). Estos parámetros básicos corresponden a: i) Distribución de Orientaciones, ii) Distribución de Tamaños, e iii) Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$ .

La distribución de orientaciones se simula mediante la técnica de remuestreo estadístico *Bootstrap* (Efron, 1979), la distribución de tamaños mediante la aplicación del método "*Simulated Sampling*" (La Pointe *et al.*, 1983), y la Intensidad de Fracturamiento mediante la correlación existente entre distintas medidas de intensidad,  $P_{21}(m/m^2)$  y  $P_{32}(m^2/m^3)$  (Dershowitz & Herda, 1992).

Los análisis de detalle para 70 fotografías o imágenes 3D de los túneles en mina El Teniente en los niveles actuales de explotación (Mina Reno y Esmeralda) se realizaron para distintos tamaños de corte de largo de traza observado de las estructuras geológicas (*Truncation bias*). Los resultados permiten decir que la intensidad de fracturamiento, orientación y distribución de largos de las estructuras geológicas varían disparo a disparo con rangos específicos de  $P_{32}$  entre 2 y 7  $m^2/m^3$  para un tamaño de corte mínimo de 0,5 m en roca Cmet. Estos resultados permiten estudiar también las características geológicas propias del *stockwork* y su aplicación a la estabilidad de las excavaciones. De hecho, la metodología propuesta entrega además un criterio para definir las características del arreglo estructural (DFN) entorno a las excavaciones.

## **Agradecimientos**

A mis padres, Pilar Molina y Adrián León. No hay manera de expresar mi gratitud hacia ustedes por dotarme de las herramientas necesarias para mi desarrollo como estudiante y como persona.

A mis hermanos y sobrina, por ser incondicionales en su compañía y cariño.

A mi profesor guía y miembro de comisión examinadora, Andrés Brzovic. Gracias por las discusiones que me ayudaron a abrir mi entendimiento y lograr resolver este trabajo.

A mi comisión examinadora, Sofía Rebolledo y Sergio Sepúlveda. Muchas gracias por las recomendaciones y correcciones hechas a mi trabajo.

A Steve Rogers y *Golder Associates* por facilitar las herramientas, licencias necesarias y por su disposición a responder a algunas de las dudas que surgieron en el desarrollo de este estudio.

A Esteban Siebert y al equipo de “Compañía Minera La Patagua”, por presentarme el mundo de la geología en la minería subterránea. Gracias por la experiencia adquirida.

A todos l@s “Geopastas del Apocalipsis” por haber llenado de buena onda el paso por Geo. Mención especial para Juanpi y Metalero.

Al gordo Nico, mi amigo y hermano, por su amistad hecha de hierro.

Por último pero no menos importante, a mi novia Elfriede Osorio. Gracias por apoyarme en los días de estudiante y memorista. Mi gratitud para ti no cabe en esta hoja.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 <i>Antecedentes Generales de mina El Teniente</i> .....	1
1.2 <i>Ubicación y vías de acceso</i> .....	3
1.3 <i>Glosario, terminología y acrónimos</i> .....	5
1.4 <i>Descripción del problema</i> .....	6
1.5 <i>Objetivos</i> .....	12
1.6 <i>Intensidad de Fracturamiento y notación <math>P_{xy}</math></i> .....	12
CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO.....	16
2.1 <i>Geología Regional</i> .....	16
2.1.1 <i>Rocas Estratificadas</i> .....	16
2.1.2 <i>Rocas Intrusivas</i> .....	21
2.1.3 <i>Estructuras</i> .....	22
2.1.4 <i>Marco Geotectónico</i> .....	24
2.2 <i>Geología del Yacimiento</i> .....	26
2.2.1 <i>Unidades Litológicas</i> .....	28



2.2.2	<i>Geología estructural del Yacimiento</i> .....	33
2.2.3	<i>Alteración y Mineralización</i> .....	35
CAPÍTULO 3:	LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL MEDIANTE MÉTODOS DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL 3D.....	39
3.1	<i>Desarrollo de DTM (Digital Terrain Model)</i> .....	41
3.1.1	<i>Fotogrametría</i> .....	41
3.1.2	<i>Mapeo digital 3D en la mina El Teniente</i> .....	42
3.1.3	<i>Modelo Digital de Terreno (Digital Terrain Model)</i> .....	42
3.2	<i>Adquisición de Datos</i> .....	45
3.2.1	<i>Selección de modelos digitales o DTM's</i> .....	45
3.2.2	<i>Ubicación de los DTM mapeados</i> .....	46
3.2.3	<i>Mapeo de estructuras en DTM</i> .....	48
3.2.4	<i>Levantamiento de orientaciones de discontinuidades</i> .....	51
3.2.5	<i>Levantamiento del largo de traza de estructuras</i> .....	53
3.2.6	<i>Tamaño o radio equivalente de estructuras</i> .....	54
CAPÍTULO 4:	METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO DEL ARREGLO ESTRUCTURAL.....	57
4.1	<i>Concepto de DFN (Discrete Fracture Network)</i> .....	57
4.2	<i>Proceso de Poisson</i> .....	59
4.3	<i>Parámetros necesarios para definir un DFN</i> .....	60
4.4	<i>Simulación de Orientaciones en modelos estocásticos</i> .....	62
4.4.1	<i>Simulación de la orientación – Método del Bootstrapping</i> .....	63
4.5	<i>Simulación del Tamaño en modelos estocásticos</i> .....	66

4.5.1	<i>Ajuste de histogramas de tamaños mapeados</i> .....	68
4.5.2	<i>Ecuación Fundamental de Warburton</i> .....	69
4.5.3	<i>Técnica del Muestro Simulado</i> .....	70
4.6	<i>Simulación del parámetro de Intensidad de Fracturamiento <math>P_{32}(m^2/m^3)</math></i> .....	73
4.7	<i>Ejemplo de aplicación de la metodología de ajuste de parámetros</i> .....	76
4.8	<i>Evaluación de la simulación de parámetros</i> .....	80
4.9	<i>Extrapolación de Tamaño e Intensidad de Fracturamiento <math>P_{32}(m^2/m^3)</math></i> .....	84
4.10	<i>Validación de la extrapolación de datos</i> .....	87

CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....91

5.1	<i>Resultados de datos de tamaños mapeados</i> .....	91
5.2	<i>Resultados de datos de tamaños mapeados por DTM</i> .....	92
5.3	<i>Resultados de tamaños por sector de la mina</i> .....	93
5.4	<i>Resultados de valores de <math>P_{21}(m/m^2)</math> mapeados por DTM</i> .....	95
5.5	<i>Resultados de valores de <math>P_{21}(m/m^2)</math> mapeados por sector de la mina</i> .....	96
5.6	<i>Resultados de la aplicación de la Metodología: Determinación del tamaño</i> .....	97
5.7	<i>Resultados de la aplicación de la Metodología: Determinación del parámetro de Intensidad de Fracturamiento <math>P_{32}(m^2/m^3)</math></i> .....	99
5.8	<i>Validación de resultados de las simulaciones</i> .....	100

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....104

6.1	<i>Metodología de Trabajo</i> .....	104
6.2	<i>Resultados de la Aplicación de la Metodología de Trabajo</i> .....	105
6.3	<i>Limitaciones de la Metodología</i> .....	110

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	112
7.1 Conclusiones.....	112
7.2 Recomendaciones.....	114
BIBLIOGRAFÍA.....	116
ANEXOS.....	125
ANEXO A: <i>Sesgos en el levantamiento de información estructural</i> .....	125
ANEXO B: <i>Consideraciones de la Metodología de ajuste del Tamaño</i> .....	138
ANEXO C: <i>Comentario sobre la evaluación de la metodología</i> .....	142
ANEXO D: <i>DTM's seleccionados en el marco de este estudio</i> .....	144
ANEXO E: <i>Tablas de resultados de la aplicación de la metodología</i> .....	146
ANEXO F: <i>Gráficos no incluidos en el cuerpo de este informe</i> .....	155
ANEXO G: <i>Instrucciones para aplicar la metodología completa mediante el uso de códigos de Macroinstrucciones de FracMan (.fmf) y Microsoft Excel (VBA), para un tamaño mínimo de corte establecido</i> .....	166
ANEXO H: <i>Macroinstrucciones aplicadas en la metodología</i> .....	173

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1</b> Métodos de explotación implementados en mina El Teniente.....	2
<b>Figura 1.2</b> Imagen obtenida del software Vulcan con la ubicación de los niveles productivos alrededor de la Pipa Brecha Braden (tomado de Díaz, 2013).....	3
<b>Figura 1.3</b> Mapa de ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente de CODELCO.....	4
<b>Figura 1.4</b> Esquema de una sección de un túnel en una obra subterránea y su intersección con planos de discontinuidades presentes en el macizo rocoso.....	7
<b>Figura 1.5</b> Propiedades de fundamentales en la caracterización geotécnica (tomado de González de Vallejo, 2002).....	7
<b>Figura 1.6</b> Concepto de tamaño o largo de traza de discontinuidad (Modificado de ISRM, 1981).....	8
<b>Figura 1.7</b> Esquema de un sistema de fortificación (SERNAGEOMIN, 2013).....	8
<b>Figura 1.8</b> Esquema 3D que muestra una sobre-excavación (Informe interno 160407 ADIT 74-75 3DM ADAM, 2016).....	9
<b>Figura 1.9</b> Esquema de un DFN que muestra arreglo estructural en la periferia de una excavación ficticia ideal.....	10
<b>Figura 1.10</b> Modelos del arreglo estructural y esquemas de mapas de trazas para distintos sectores de la mina (GRMD-SGL-INF-61, 2014).....	11
<b>Figura 1.11</b> Medidas de Intensidad de Fracturamiento (Golder Associates Ltd, 2008).....	14
<b>Figura 1.12</b> Esquema de comparación entre medidas de Intensidad de Fracturamiento. (Modificado de Apuntes de Brzovic & Herrera, 2011).....	15
<b>Figura 2.1</b> Mapa Geológico Regional (Modificado por Charrier et al., 1996).....	17
<b>Figura 2.2</b> Modelo de estructuras tipo Riedel (tomado de Rivera y Falcón, 1998).....	23
<b>Figura 2.3</b> Marco Geotectónico. (A) Perfiles transversales de evolución tectono-magmática. (B) Ubicación de la Zona volcánica central y flat-slab.....	25
<b>Figura 2.4</b> Geología simplificada mostrada a través del mapa litológico del Nivel Teniente 6 del yacimiento El Teniente (modificada de la base de datos de la mina).....	27
<b>Figura 2.5</b> Mapa geológico con las principales Unidades Litológicas NNM, cota 1.880 m.....	29
<b>Figura 2.6</b> Zona de Falla El Teniente (ZFT).....	34
<b>Figura 3.1</b> Diagrama de flujo de trabajo que representa las distintas etapas para un análisis completo mediante el uso de los softwares 3DM Analyst y FracMan.....	39
<b>Figura 3.2</b> Determinación de un punto único 3D mediante el cruce de dos rayos de luz, principio de fotogrametría (Modificado de Birch, 2006).....	41
<b>Figura 3.3</b> Esquema del frente minero en planta, junto con la configuración de la ubicación de los puntos de control de terreno y las estaciones de fotografías (Modificado de Benado et al, 2010).....	43
<b>Figura 3.4</b> Esquema de toma fotografías de un frente minero (vista en planta). Cuatro fotografías superpuestas obtenidas desde una estación de captura de fotografías (estación 1) (Modificado de 3DM Adams Analyst System-El teniente, 2011).....	43

<b>Figura 3.5</b> Generación de Modelo digital de Terreno (DTM), 3DM.....	44
<b>Figura 3.6</b> Modelo Digital de terreno (DTM 7872 sector Esmeralda) de labor minera visto desde diferentes direcciones en 3DM Analyst.....	44
<b>Figura 3.7</b> Modelo Digital de terreno DTM 4909 – Esmeralda. DTM de calidad óptima.....	46
<b>Figura 3.8</b> Mapa de ubicación de los DTM mapeados.....	47
<b>Figura 3.9</b> Fotografía del enrejado de vetillas (stockwork) característico del macizo rocoso de la mina El Teniente en roca CMET (Complejo Máfico El Teniente) (Brzovic, 2005).....	48
<b>Figura 3.10</b> Relación utilizada en este estudio entre el Tamaño (radio de un círculo) y el Largo de traza de una estructura (Birch, 2006).....	50
<b>Figura 3.11</b> a) Estructura digitalizada mediante un círculo a partir de puntos (Birch, 2006). b) Estructuras mapeadas en el DTM 4909 (sector Esmeralda Hw, nivel Transporte).....	50
<b>Figura 3.12</b> a) DTM 3476 del sector Esmeralda – nivel Transporte, b) 433 estructuras mapeadas en 3DM Analyst, c) stereonet con los 433 polos pertenecientes a las estructuras mapeadas.....	52
<b>Figura 3.13</b> Stereonets con el número de polos de orientaciones de las estructuras mapeadas en este estudio. a) Reno, b) Esmeralda Hw, c) Esmeralda Fw.....	52
<b>Figura 3.14</b> Relación tamaño-largo de traza.....	55
<b>Figura 3.15</b> Dos DTM mapeados a partir de tamaño mínimo de radio 1 m.....	55
<b>Figura 3.16</b> Esquema que muestra el levantamiento estructural en 3DM Analyst para el DTM 4909, el traspaso de información al software simulador FracMan y un resumen de la información de tamaños y orientaciones mapeados obtenida.....	56
<b>Figura 4.1</b> Ejemplo de un DFN (Digital Fracture Network) generado en FracMan (Tomado de Golder Associates Ltd., 2011).....	59
<b>Figura 4.2</b> Proceso de Poisson.....	60
<b>Figura 4.3</b> Esquema simplificado del método de generación de un DFN representativo de los datos mapeados.....	61
<b>Figura 4.4</b> a) 73 estructuras levantadas en el DTM 2715, con radio equivalente mínimo 0,3 m (Esmeralda Hw - Nivel Acarreo). b) 340 estructuras simuladas (40 iteraciones) mediante bootstrapping en un volumen de 729 m <sup>3</sup> , con radio equivalente mínimo 0,3 m. c) stereonet con 73 polos de datos mapeados en a). d) stereonet con las 340 orientaciones simuladas en b.....	64
<b>Figura 4.5</b> Plano insertado en el set de estructuras mapeadas en el DTM 2715.....	65
<b>Figura 4.6</b> a) Stereonet con los datos mapeados (34 estructuras) que intersectan el plano de la figura 4.3, b) stereonet con los datos de una simulación escogida al azar (35 estructuras) que intersectan el plano de la Figura 4.5.....	65
<b>Figura 4.7</b> Relación entre la distribución de largo de traza y distribución de tamaño. (Modificada de Golder Associates Ltd., 2011).....	66
<b>Figura 4.8</b> Funciones de densidad de probabilidad definidas en este estudio.....	67
<b>Figura 4.9</b> Histogramas de radio equivalente mapeado. DTM 4748, ajuste lognormal.....	68

<b>Figura 4.10</b> Distribuciones de probabilidad de mejor ajuste a los datos tamaño mapeados según estadístico k-s para ambos sectores de la mina.....	69
<b>Figura 4.11</b> Ecuación de Warburton (1980).....	70
<b>Figura 4.12</b> Curvas de frecuencia acumulada para largos de traza medidos (en azul) y largos de traza simulados (en rojo) mediante la expresión de Warburton (1980).....	71
<b>Figura 4.13</b> Diagrama esquemático de la aplicación del método de “Muestreo Simulado” para el ajuste de la distribución de tamaño real de las estructuras de la mina El Teniente.....	72
<b>Figura 4.14</b> Esquema del muestreo simulado.....	73
<b>Figura 4.15</b> a) Estructuras mapeadas con plano-ventana de mapeo de 3x3m (DTM 2715). b) mapa de trazas generado para el cálculo del $P_{21}$ .....	74
<b>Figura 4.16</b> Arriba: esquema del procedimiento de derivación del valor de la intensidad $P_{32}(m^2/m^3)$ , abajo: correlación lineal entre los parámetros de intensidad de fracturamiento.....	75
<b>Figura 4.17</b> Estructuras mapeadas en 3DM Analyst en el DTM 2715, sector Esmeralda Hw – nivel Transporte, 124 estructuras mapeadas.....	76
<b>Figura 4.18</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa de N° de estructuras mapeadas a partir de un tamaño mínimo de mapeo. 124 estructuras mapeadas en 3DM Analyst en el DTM 2715, sector Esmeralda Hw – nivel Transporte.....	77
<b>Figura 4.19</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa de N° de estructuras mapeadas a partir de un tamaño mínimo de mapeo. 30 estructuras mapeadas en 3DM Analyst en el DTM 2715, sector Esmeralda Hw – nivel Transporte. Tamaño mínimo 1m.....	77
<b>Figura 4.20</b> Metodología de ajuste de media de tamaño real (radio equivalente, m) a partir de la media de largo de traza observada (m).....	79
<b>Figura 4.21</b> Aplicación real de método de derivación del parámetro de intensidad $P_{32}(m^2/m^3)$ a partir del parámetro intensidad $P_{21}(m/m^2)$ (DTM 2715).....	80
<b>Figura 4.22</b> a) Datos mapeados. b) datos simulados partir de 3 iteraciones aleatorias generadas a partir de los parámetros obtenidos mediante la metodología presentada en este trabajo.....	82
<b>Figura 4.23</b> Propiedades medidas en el plano de muestreo y sus resultados para 40 iteraciones (metodología aplicada para el DTM 2715).....	83
<b>Figura 4.24</b> a) <i>stereonet</i> con polos de estructuras mapeadas, b) <i>stereonet</i> con polos de estructuras simuladas (40 iteraciones) con <i>bootstrapping</i> .....	83
<b>Figura 4.25</b> Aplicación de la metodología para 4 tamaños mínimos (entre 0,5 y 1 m, en azul). DTM 2715.....	85
<b>Figura 4.26</b> Construcción de una superficie digitalizada de la galería DTM 2715.....	88
<b>Figura 4.27</b> a) Estructuras mapeadas, y galería del DTM 2715; b) trazas de datos mapeados; c) ajuste aproximado de la galería para eliminar errores.....	88

<b>Figura 4.28</b> a) Estructuras simuladas (40 iteraciones), b) y c) trazas de las estructuras simuladas intersectadas con fragmento de superficie de galería de DTM 2715, para un par de iteraciones escogidas aleatoriamente.....	89
<b>Figura 4.29</b> a) <i>Stereonet</i> y polos de estructuras mapeadas en galería, b) <i>stereonet</i> y polos de estructuras simuladas (40 simulaciones) en galería.....	90
<b>Figura 5.1</b> Histograma de radios equivalentes de las estructuras mapeadas en el sector Esmeralda (53 DTM, 3852 estructuras).....	91
<b>Figura 5.2</b> Histograma de radios equivalentes de las estructuras mapeadas en el sector RENO.....	91
<b>Figura 5.3</b> Radio equivalente mínimo de corte y número de estructuras mapeadas por DTM, mina Esmeralda, sectores 'cabeza' (Hw) y 'patilla' (Fw).....	92
<b>Figura 5.4</b> Radio equivalente mínimo de corte y número de estructuras mapeadas por DTM, mina RENO.....	93
<b>Figura 5.5</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio equivalente mínimo de corte mapeado, sectores mina Esmeralda Hw y Esmeralda Fw.....	94
<b>Figura 5.6</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio equivalente mínimo de corte mapeado, sector mina RENO.....	94
<b>Figura 5.7</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) en función del largo de traza mínimo. Sector Esmeralda.....	95
<b>Figura 5.8</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) en función del largo de traza mínimo. Sector RENO.....	95
<b>Figura 5.9</b> Esquema de procedimiento de simplificación del mapa de trazas a partir del criterio de largo de traza mínimo (m).....	96
<b>Figura 5.10</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Intensidad de fracturamiento $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) observada en función del largo de traza mínimo de corte contenido en un plano, sectores Esmeralda Fw y Esmeralda Hw.....	96
<b>Figura 5.11</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Intensidad de fracturamiento $P_{21}$ ( $m/m^2$ ) observada en función del largo de traza mínimo de corte contenido en un plano, sector RENO.....	96
<b>Figura 5.12</b> Gráfico Tamaño real de radio equivalente (m) en función del Tamaño mínimo de radio equivalente (m), sector Esmeralda Hw.....	98
<b>Figura 5.13</b> Gráfico Tamaño real de radio equivalente (m) en función del Tamaño mínimo de radio equivalente (m), sector Esmeralda Fw.....	98
<b>Figura 5.14</b> Gráfico Tamaño real de radio equivalente (m) en función del Tamaño mínimo de radio equivalente (m), sector RENO.....	98
<b>Figura 5.15</b> Gráfico de Intensidad de fracturamiento $P_{32}$ ( $m^2/m^3$ ) en función del tamaño mínimo de radio equivalente, sector Esmeralda Hw.....	99
<b>Figura 5.16</b> Gráfico de Intensidad de fracturamiento $P_{32}$ ( $m^2/m^3$ ) en función del tamaño mínimo de radio equivalente, sector Esmeralda Fw.....	99

<b>Figura 5.17</b> Gráfico de Intensidad de fracturamiento $P_{32}(m^2/m^3)$ en función del tamaño mínimo de radio equivalente, sector RENO.....	100
<b>Figura 5.18</b> Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones.....	101
<b>Figura 5.19</b> Gráficos de Error relativo porcentual según el tamaño mínimo de corte (radio equivalente mínimo) para las propiedades medias en el plano (ventana de muestreo).....	102
<b>Figura 5.20</b> Promedio de los errores relativos de todos lo mapeos agrupados por propiedad medida. Tres sectores de la mina.....	103
<b>Figura 5.21</b> Desviación estándar de los errores relativos de todos lo mapeos agrupados por propiedad medida. Tres sectores de la mina.....	103
<b>Figura 5.22</b> Error relativo porcentual total de las 4 propiedades medidas en el plano de muestreo para los tres sectores analizados en función del tamaño de corte mínimo (radio equivalente).....	103
<b>Figura 6.1</b> Esquema resumen de la metodología presentada en este estudio.....	104
<b>Figura 6.2</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio equivalente mínimo de corte mapeado, tres sectores de la mina.....	106
<b>Figura 6.3</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio mínimo de corte de mapeo. Tres sectores de la mina. Metodología.....	108
<b>Figura 6.4</b> Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Intensidad de fracturamiento $P_{21}(m/m^2)$ observada en función del largo de traza mínimo de corte contenido en un plano, tres sectores de la mina.....	109
<b>Figura 6.5</b> Efecto de sobreestimación del tamaño de estructura debido al efecto tamaño de la ventana de mapeo.....	111
<b>Figura A.1</b> Variabilidad de los datos de orientaciones mapeadas según la dirección del plano.....	127
<b>Figura A.2</b> a) Estructuras de radio equivalente mayor a 1 m mapeadas en DTM 5014 (29 estructuras) y <i>stereonet</i> , b) estructuras de radio equivalente mayor a 2 m mapeadas en DTM 5014 (7 estructuras) y <i>stereonet</i> .....	128
<b>Figura A.3</b> Esquemas explicativos del sesgo por truncamiento.....	129
<b>Figura A.4</b> Esquema de la variabilidad de la medición de la intensidad $P_{21}(m/m^2)$ .....	132
<b>Figura A.5</b> “Zonas ciegas” mapeo de estructuras DTM 2814 y plano vertical ajustado.....	133
<b>Figura A.6</b> Efecto escala en las propiedades medidas para un macizo rocoso (Modificado de González de Vallejo, 2002).....	133
<b>Figura A.7</b> a) Estructuras levantadas en el DTM 4909 a partir de la cuales se hicieron las simulaciones. b) Variación en las dimensiones del plano de muestreo y las trazas de las estructuras contenidas simuladas en dicho plano.....	134
<b>Figura A.8</b> Promedio de valores de $P_{21}(m/m^2)$ para 10 realizaciones. Área representativa mínima y dimensiones de ventana de mapeo escogida.....	135



<b>Figura A.9</b> a) Estructuras digitalizadas en el DTM 4909 (sector: Esmeralda, nivel: Transporte). b) Estructuras en Fracman. c) Planos-Superficies de mapeo. d) Trazas de las estructura en planos-superficie de mapeo.....	136
<b>Figura A.10</b> a) Superficie de la galería del DTM 7783 (RENO) y el plano que simula el frente del desarrollo. b) la galería digitalizada, el plano de mapeo y las estructuras mapeadas en círculos.....	137
<b>Figura B.1</b> DTM 2715, sector Esmeralda. A partir de tamaños mapeados se obtienen trazas “mapeadas” las cuales serán usadas para ajustar el tamaño real.....	138
<b>Figura B.2</b> Histogramas de radio equivalente mapeado. a) DTM 4748, ajuste lognormal para 149 estructuras. b) DTM 4909, ajuste lognormal para 551 estructuras.....	140
<b>Figura B.3</b> Esquema del procedimiento de truncar una curva de fdp a un tamaño mínimo. Hacia la derecha de la línea vertical se encuentra la población de estructuras de interés.....	141
<b>Figura B.4</b> Relación media y desviación estándar de tamaño de discontinuidad – media y desviación estándar de largo de traza de discontinuidad para distintos valores de $P_{32}$ .....	142
<b>Figura F.1</b> N° de estructuras mapeadas en función del tamaño (radio equivalente) mínimo de corte. Incluye mapeos con más de 150 estructuras. Sector Esmeralda.....	155
<b>Figura F.2</b> Gráfico de probabilidad de ocurrencia del tamaño de estructura en galería asociada al mapeo. Sector Esmeralda.....	156
<b>Figura F.3</b> Gráfico de probabilidad de ocurrencia del tamaño de estructura en galería asociada al mapeo. Sector RENO.....	156
<b>Figura F.4</b> Intensidad $P_{21}(m/m^2)$ en función de largo de traza mínimo. Sector Esmeralda Hw.....	157
<b>Figura F.5</b> Intensidad $P_{21}(m/m^2)$ en función de largo de traza mínimo. Sector Esmeralda Fw.....	157
<b>Figura F.6</b> Intensidad $P_{21}(m/m^2)$ en función de largo de traza mínimo. Tres sectores de la mina.....	157
<b>Figura F.7</b> Intensidad $P_{32}(m^2/m^3)$ en función del tamaño real. Sector Esmeralda Hw.....	158
<b>Figura F.8</b> Intensidad $P_{32}(m^2/m^3)$ en función del tamaño real. Sector Esmeralda RENO.....	158
<b>Figura F.9</b> Intensidad $P_{32}(m^2/m^3)$ en función del tamaño real. Sector Esmeralda Fw.....	158
<b>Figura F.10</b> N° de trazas contenidas en el plano (ventana de mapeo) en función del número de estructuras mapeadas. Sector Esmeralda Hw.....	159
<b>Figura F.11</b> N° de trazas contenidas en el plano (ventana de mapeo) en función del número de estructuras mapeadas. Sector RENO.....	159
<b>Figura F.12</b> N° de trazas contenidas en el plano (ventana de mapeo) en función del número de estructuras mapeadas. Sector Esmeralda Fw.....	159
<b>Figura F.13</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}(m/m^2)$ en función de la intensidad de fracturamiento $P_{32}(m^2/m^3)$ . Sector RENO.....	160
<b>Figura F.14</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}(m/m^2)$ en función de la intensidad de fracturamiento $P_{32}(m^2/m^3)$ . Sector Esmeralda Hw.....	160

<b>Figura F.15</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}(m/m^2)$ en función de la intensidad de fracturamiento $P_{32}(m^2/m^3)$ . Sector Esmeralda Fw.....	160
<b>Figura F.16</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}(m/m^2)$ en función del N° de trazas contenidas en el plano. Sector RENO.....	161
<b>Figura F.17</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}(m/m^2)$ en función del N° de trazas contenidas en el plano. Sector Esmeralda Fw.....	161
<b>Figura F.18</b> Intensidad de fracturamiento $P_{21}(m/m^2)$ en función del N° de trazas contenidas en el plano. Sector Esmeralda Hw.....	161
<b>Figura F.19</b> Tamaño real en función del tamaño de corte mínimo. Sector Esmeralda Fw.....	162
<b>Figura F.20</b> Tamaño real en función del tamaño de corte mínimo. Sector Esmeralda Hw.....	162
<b>Figura F.21</b> Tamaño real en función del tamaño de corte mínimo. Sector RENO.....	162
<b>Figura F.22</b> Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones. Esmeralda Fw.....	163
<b>Figura F.23</b> Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones. Esmeralda Hw.....	164
<b>Figura F.24</b> Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones. RENO.....	165
<b>Figura G.1</b> Archivo de texto obtenido de 3DM <i>Analyst</i> .....	166
<b>Figura G.2</b> Ventana desplegada por la macro 'Sub abrir_txt'.....	167
<b>Figura G.3</b> Tabla editada por la macro 'Ordenar_Tabla'.....	167
<b>Figura G.4</b> Proceso de importación de archivo que contiene las estructuras en FracMan.....	168
<b>Figura G.5</b> Verificar <i>Object</i> de la macro coincide con el nombre del <i>Fracture Sets</i> de FracMan.....	169
<b>Figura G.6</b> Proceso de verificación de que el <i>MinValue</i> de la macro coincide con el valor del radio mínimo truncado utilizado.....	169
<b>Figura G.7</b> Verificando que el valor de intensidad de fracturamiento es el correcto.....	170
<b>Figura G.8</b> Ajuste de la curva acumulativa de la distribución de largo de traza observada mediante una curva cumulativa de una distribución de largo de traza real.....	171
<b>Figura G.9</b> Macro de <i>Microsoft Excel</i> ajustando los parámetros del tamaño real para una distribución lognormal a partir de los datos generados por las iteraciones de FracMan.....	171
<b>Figura G.10</b> Macro de <i>Microsoft Excel</i> ajustando los parámetros de intensidad de fracturamiento a partir de una correlación lineal.....	172
<b>Figura G.11</b> Macro de <i>Microsoft Excel</i> calculado el error entre valores observado-simulado.....	172

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.1</b> Parámetros geotécnicos de intensidad de Fracturamiento definidos por Dershowitz & Herda (1992) (Modificada de Golder Associates Ltda, 2008).....	14
<b>Tabla 2.1</b> Resumen: Formaciones de los Andes de Chile Central (Charrier et al, 1996).....	18
<b>Tabla 2.2</b> Clasificación de Estructuras Geológicas del Yacimiento El Teniente.....	35
<b>Tabla 2.3</b> Etapas de alteración y Mineralización hipógenas (Modificado de Cuadra, 1986).....	36
<b>Tabla 3.1</b> Clasificación de la persistencia de las discontinuidades (ISRM, 1981).....	53
<b>Tabla 3.2</b> Clasificación de vetillas en El Teniente según la extensión de la traza mapeada observada (Brzovic y otros, 2001).....	54
<b>Tabla 4.1</b> Datos estructurales mapeados y parámetros derivados necesarios para un modelo estocástico o DFN (Staub et al, 2002).....	58
<b>Tabla 4.2</b> Resultados de la aplicación de la metodología de ajuste de parámetros para la construcción de un DFN del DTM 2715 mapeado con un tamaño mínimo $r= 1\text{m}$ .....	80
<b>Tabla 4.3</b> Comparación entre propiedades simuladas (40 iteraciones) y observadas (datos y simulaciones a partir del DTM 2751).....	84
<b>Tabla 4.4</b> Resultado de la aplicación de la metodología para cuatro tamaños de corte mínimo.....	85
<b>Tabla 4.5</b> Comparación entre datos observados y promedios de simulaciones. DTM 2715. Tamaño mínimo extrapolado: 1,5 m.....	86
<b>Tabla 4.6</b> Comparación de propiedades entre datos observados y promedio de simulaciones.....	89
<b>Tabla A.1</b> Resultados del DTM 4909 (Esmeralda-Transporte) para los cuatro planos.....	137
<b>Tabla B.1</b> Distribuciones mejores ajustadas a los datos de largo de traza para diversos autores (Zhang & Einstein, 2000).....	139
<b>Tabla D.1</b> Información general de los DTM ( <i>Digital Terrain Model</i> ) mapeados en el marco de este estudio. Sector y nivel de la mina al que pertenecen y la intersección donde se ubican. Número de estructuras que se mapeadas.....	144
<b>Tabla E.1</b> Resultados de la aplicación de la metodología. Sector Esmeralda Fw.....	146
<b>Tabla E.2</b> Resultados de la aplicación de la metodología. Sector Esmeralda Hw.....	148
<b>Tabla E.3</b> Resultados de la aplicación de la metodología. Sector RENO.....	149
<b>Tabla E.4</b> Error relativo porcentual para cada propiedad media en el plano. Sector Esmeralda Fw.....	149
<b>Tabla E.5</b> Error relativo porcentual para cada propiedad media en el plano. Sector Esmeralda Hw.....	151
<b>Tabla E.6</b> Error relativo porcentual para cada propiedad media en el plano. Sector RENO.....	152
<b>Tabla E.7</b> Dirección del plano-ventana de muestreo subvertical. Tres sectores de la mina.....	153

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes generales de la mina El Teniente

La Mina El Teniente, propiedad de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO-CHILE), corresponde a un extenso depósito de cobre y molibdeno. Es considerada la mina subterránea más grande a nivel mundial, con una área aproximada de 6 km<sup>2</sup> y una extensión vertical actual superior a 1 km. Este depósito puede ser clasificado de acuerdo a su tamaño como “súper gigante”.

Se ha calculado que sus reservas alcanzan los 93 millones de toneladas métricas (Mtm), mientras que sus recursos superan los 75 Mtm con leyes superiores al 0,65% Cu y 0,019% Mo (Skewes *et al.*, 2002). La producción anual es de 455.444 toneladas métricas finas de cobre en la forma de lingotes refinados a fuego (RAF) y cátodos de cobre. Como resultado del procedimiento, del mineral también se obtiene 6.817 toneladas métricas de molibdeno (datos años 2014).

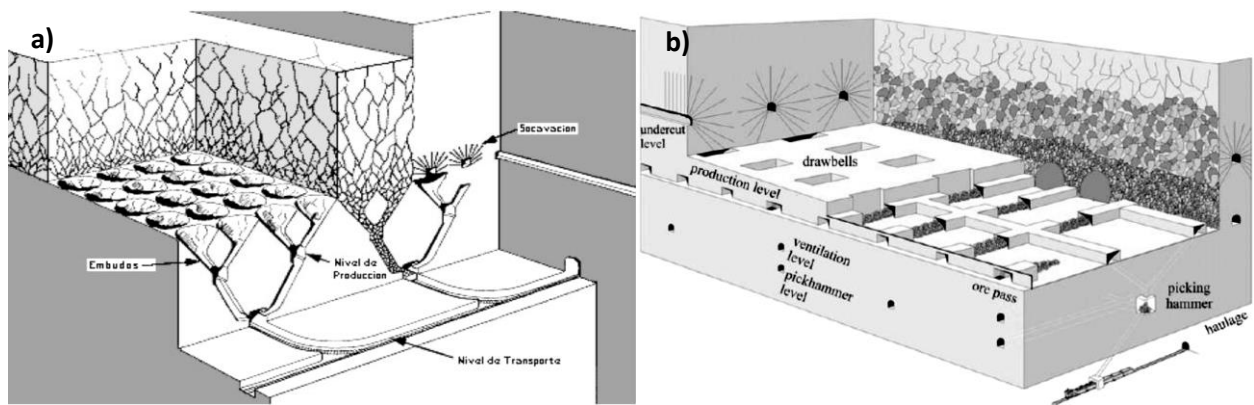
El Teniente, junto al yacimiento Río Blanco - Los Bronces, forman parte del arco magmático del Mioceno-Plioceno temprano que se sitúa en el extremo norte de la Zona Volcánica Sur Andina (ZVS), emplazado a 260 km al este de la fosa oceánica actual y a 90 Km sobre la zona sísmica, donde la placa de Nazca subducta bajo la placa Sudamericana en un ángulo de 30°.

El distrito geológico es dominado por rocas volcánicas del Mioceno correspondientes a la Formación Farellones, localmente intruída por rocas ígneas de composición intermedia además de brechas hidrotermales (Kay *et al.*, 1991). Las rocas presentan distintos grados de alteración y mineralización (calcopirita, bornita y molibdenita principalmente).

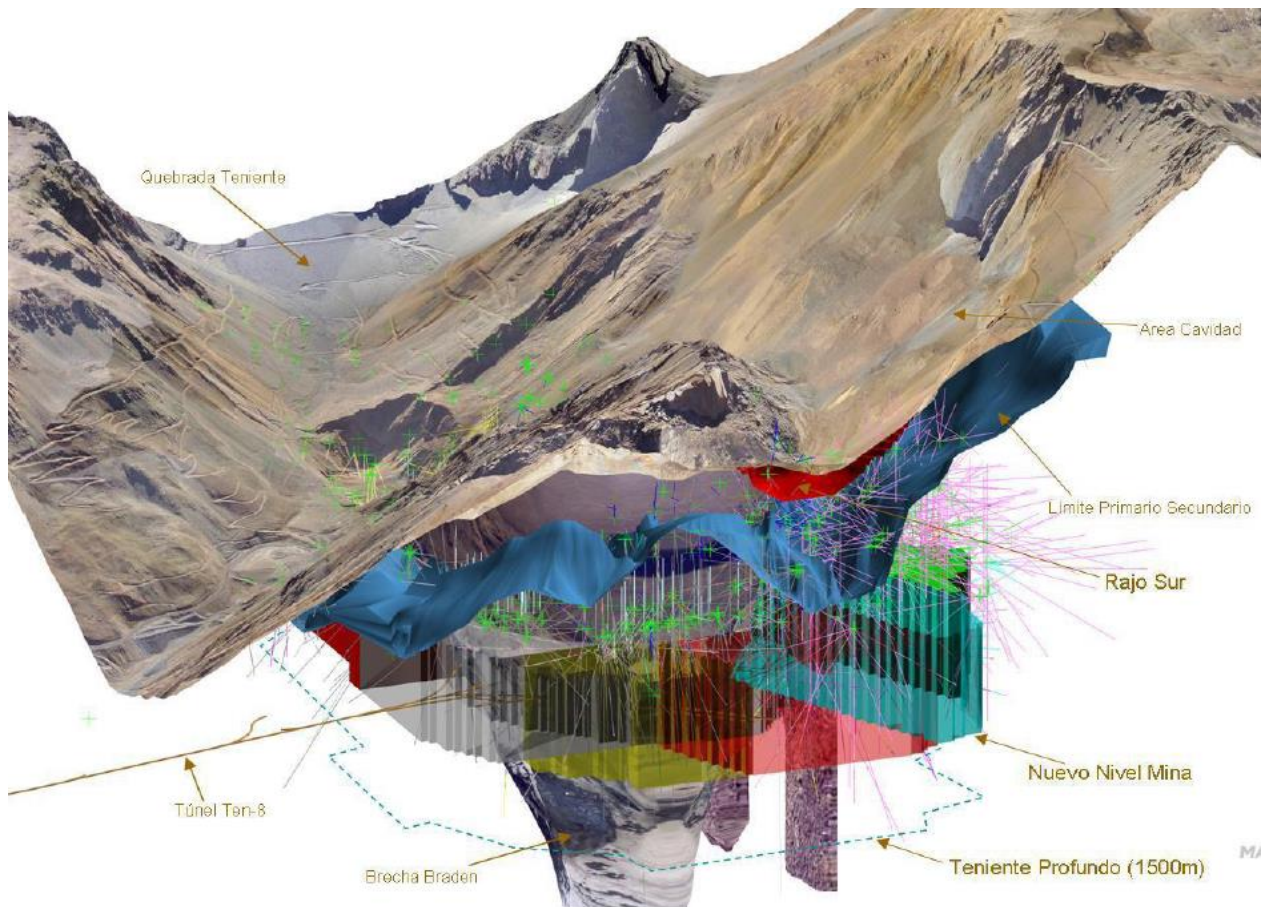
La explotación del Yacimiento comenzó en el año 1905 y se ha desarrollado en forma subterránea mediante la aplicación de dos métodos. El primero, utilizado para la extracción de mineral principalmente secundario, corresponde al Hundimiento Gravitacional de Bloques (*Block Caving*) empleado hasta el año 2000. La metodología de explotación usada a partir de ese año es el Hundimiento y Derrumbe de Paneles (*Panel Caving*) (Rojas *et al.*, 2001) (ver Figura 1.1).

Esta modificación en el método de explotación se debió a los avances en la explotación de la roca primaria que se encuentra a mayor profundidad y posee mayor dureza. El *Panel Caving* utiliza el peso que ejerce la montaña para facilitar el quiebre y posterior hundimiento del techo, generando una estructura de colapso en superficie, denominada “Cavidad Teniente” (Valenzuela, 2003).

Los sectores de la mina han sido emplazados alrededor de la Pipa Brecha Braden, incluyendo los actuales niveles productivos, así como el Nuevo Nivel Mina (NNM), que se encuentra en etapa de implementación (ver Figura 1.2).



**Figura 1.1** Métodos de explotación implementados en mina El Teniente. a) *Block Caving*. b) *Panel Caving* (Harmin, 2001).



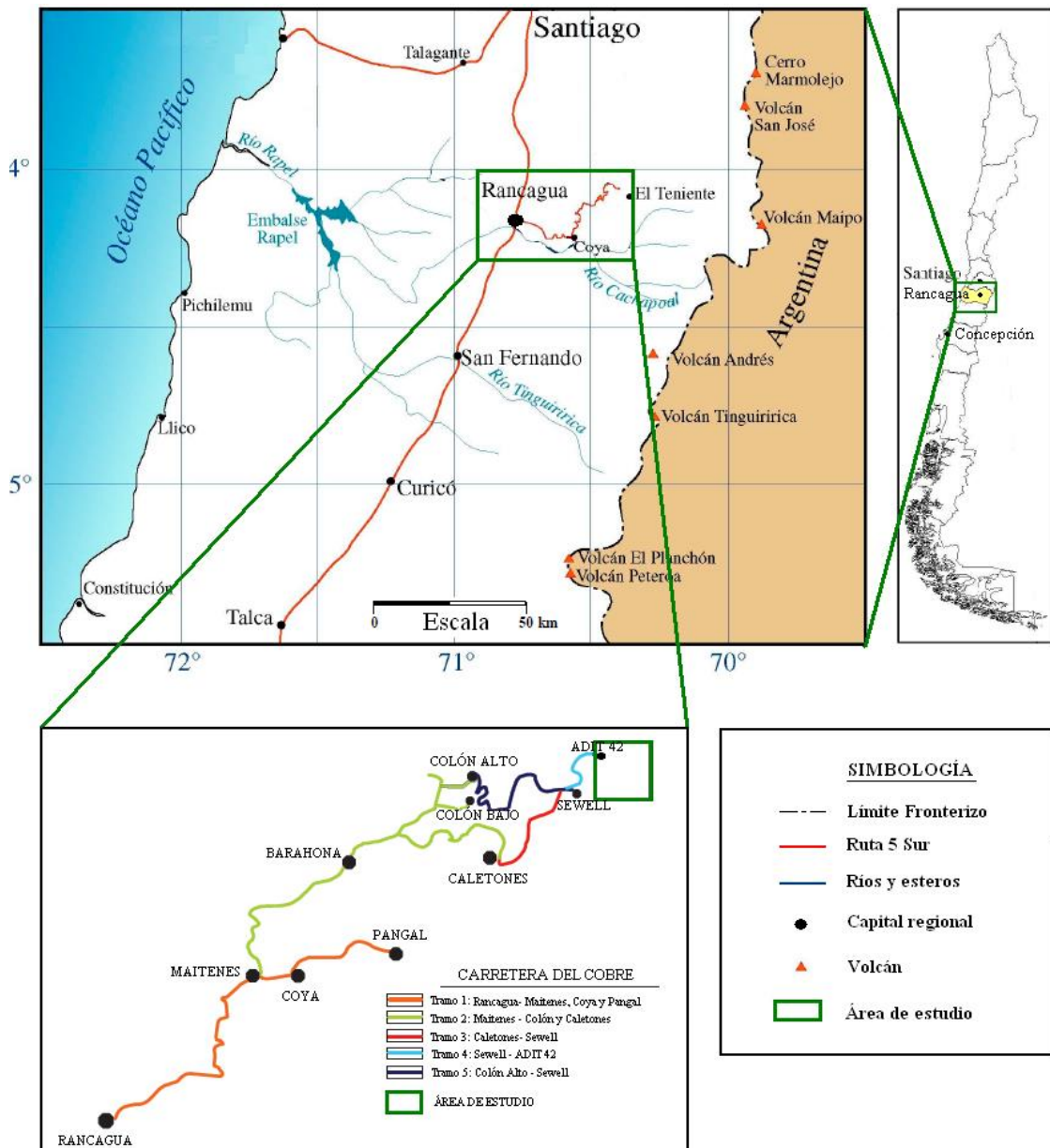
**Figura 1.2** Imagen obtenida del *software* Vulcan con la ubicación de los niveles productivos alrededor de la Pipa Brecha Braden (tomado de Díaz, 2013).

## 1.2 Ubicación y vías de acceso

El yacimiento El Teniente se localiza en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, provincia del Cachapoal, aproximadamente a 45 km al noreste de la capital regional, Rancagua. Sus coordenadas geográficas son 70°21' de longitud oeste y 34°14' de latitud sur, con una altura de 2.400 m s.n.m. En la Figura 1.3 se observa el mapa de la ubicación del yacimiento en la región, y los tramos de acceso a la mina.

El acceso a la mina se realiza desde Rancagua por una carretera asfaltada de 60 km llamada "Carretera del Cobre Eduardo Frei Montalva" (ex carretera El Cobre), la que une la ciudad de Rancagua con la localidad de Colón Alto en el kilómetro. La carretera está dividida en

5 tramos. El tramo 1 es de uso público hasta el control de acceso al yacimiento (Barrera Maitenes). Los tramos siguientes son caminos privados y su circulación está restringida.



**Figura 1.3** Mapa de ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente de CODELCO. Región del Libertador Bernardo O’Higgins. Detalle de las vías de acceso de la “Carretera del Cobre Eduardo Frei Montalva” y de las distintas localidades.

El ingreso a las instalaciones de producción se realiza mediante buses desde la localidad de Colón Alto. En ocasiones, el acceso hacia el interior de la mina es por medio de un

túnel de 8 km de largo, utilizando un ferrocarril eléctrico que comunica con el nivel Teniente 8 (1983 m s.n.m.). El ingreso a los distintos niveles de la mina se lleva a cabo a través de piques principales (Pique B, Pique C y Pique 2) y rampas, las que permiten el tránsito de vehículos motorizados a los diferentes frentes de desarrollo.

### 1.3 Glosario, terminología y acrónimos

**DFN:** *Discrete Fracture Network*. Modelo estocástico discreto del arreglo estructural de un macizo rocoso. Basado en las distribuciones de parámetros de Orientación, Tamaño e Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$ .

**DTM:** *Digital Terrain Model*. Modelo fotográfico 3D de un terreno. Construido en base a los principios de la fotogrametría digital.

**Fotogrametría:** Técnica para obtener las características geométricas de un objeto a partir de fotografías.

**Largo de traza de estructura:** Es la expresión 2D de del tamaño de una estructura observado en la superficie rocosa de un afloramiento, pared de galería subterránea, etc. Se genera al intersectar la superficie de un afloramiento con planos de discontinuidades. Es la principal, sino única, fuente de información para construir los modelos del arreglo estructural o DFN.

**Modelo estocástico:** Modelos discretos de comportamiento no-determinístico. Basados en parámetros definidos por distribuciones probabilísticas.

**$P_{10}$ :** Una medida de la Intensidad de Fracturamiento lineal, expresada en este estudio como el número de estructuras por metro de línea de mapeo(ff/m). El  $P_{10}$  es generalmente medido en sondajes y en la bibliografía afín es conocido como 'frecuencia' (Dershowitz & Herda, 1992).

**$P_{21}$ :** Una medida de la Intensidad de Fracturamiento areal, expresada en este estudio como la suma de largos de trazas contenidas en un área contenedora ( $m/m^2$ ). El  $P_{21}$  es generalmente registrado es la superficie de afloramientos como en paredes de galerías subterráneas (Dershowitz & Herda, 1992).



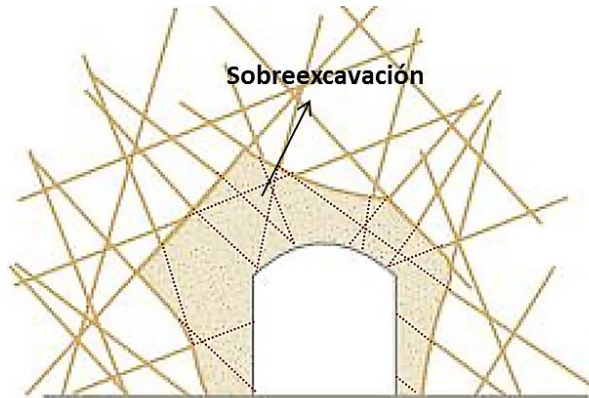
**$P_{32}$ :** Una medida de la Intensidad de Fracturamiento volumétrico, expresada en este estudio como el área de las superficies de las estructuras contenidas en un volumen de roca ( $m^2/m^3$ ). El  $P_{32}$  es muy difícil de medir en terreno; es generalmente calculado a partir de otras medidas de intensidad de fracturamiento ( $P_{10}, P_{21}$ ) a través de simulación estocástica (Dershowitz & Herda, 1992) o estimado analíticamente (Wang, 2005; Terzaghi, 1965).

**Tamaño de estructura:** Propiedad que se expresa sobre la superficie de la estructura, y corresponde a la extensión areal de dicha superficie. En este trabajo, se asumen las estructuras como círculos planos finitos, por lo tanto, el tamaño corresponde al radio de dicho círculo. Su expresión en un afloramiento es el 'largo de traza' de una estructura.

#### 1.4 Descripción del problema

En minería subterránea, los problemas de inestabilidad de las excavaciones dependen esencialmente de los esfuerzos y de las características del macizo rocoso. Los esfuerzos se asocian a la condición in situ (profundidad, tectonismo, entre otros) y a los inducidos por las mismas excavaciones (tamaño y forma de ésta). En relación al macizo rocoso y su caracterización, se debe fijar la atención en dos grupos de factores: la matriz rocosa y la influencia de las discontinuidades. Estas últimas determinan en un 80% el comportamiento del macizo rocoso y corresponden a las características geométricas y mecánicas del arreglo estructural. Por otro lado, solo un 20% del comportamiento del macizo rocoso se ve determinado por las propiedades del material o roca intacta. Luego, la mayoría de los problemas de inestabilidad propios de un macizo rocoso en labores subterráneas depende a la intersección de una sección de un túnel con planos de discontinuidades presentes en el macizo rocoso en cuestión, como muestra el esquema de la Figura 1.4.

Con el fin de caracterizar correctamente las discontinuidades, la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM en sus siglas en inglés) ha sugerido que se deben describir diez propiedades fundamentales (ISRM, 1981) (Ver Figura 1.5). Estas propiedades representan las características geométricas y de resistencia de las estructuras geológicas.



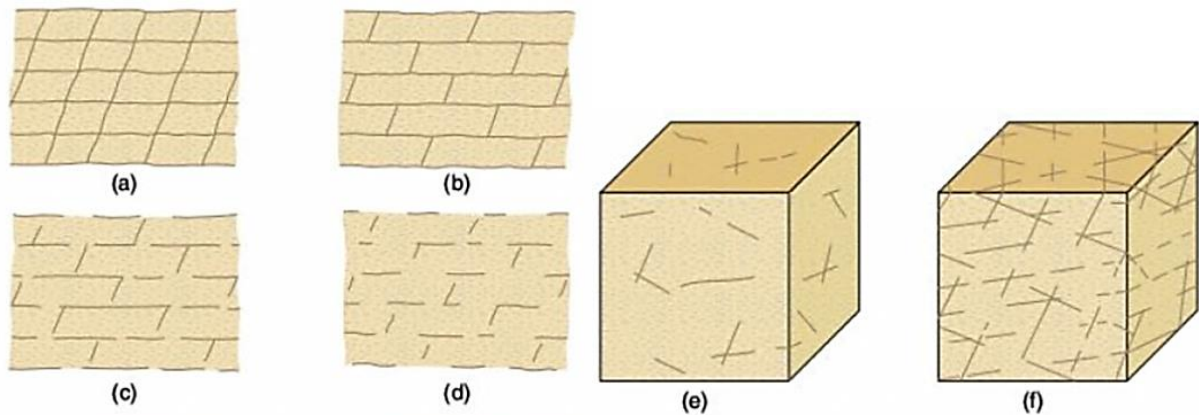
**Figura 1.4** Esquema de una sección de un túnel en una obra subterránea y su intersección con planos de discontinuidades presentes en el macizo rocoso. La sobreexcavación esquematizada es controlada estructuralmente (Modificado de González de Vallejo, 2002).



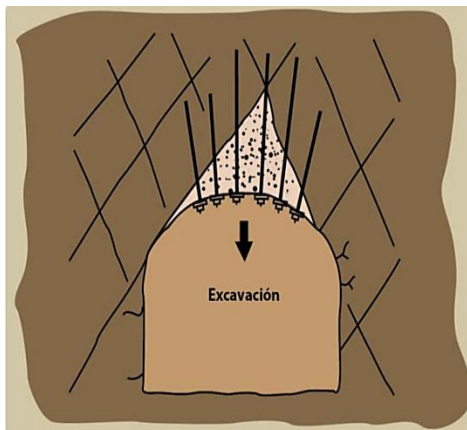
**Figura 1.5** Propiedades de fundamentales en la caracterización geotécnica (tomado de González de Vallejo, 2002).

Si bien todas las propiedades cumplen un rol en la estabilidad del macizo, la propiedad que define en gran medida si la estructura participará o no en el proceso de rotura del macizo rocoso es el Tamaño, propiedad descrita en la bibliografía como ‘Largo de traza de estructura o Persistencia’ (ver Figura 1.6). Luego, la presencia de discontinuidades de dirección paralela al eje de desarrollo de una galería y con buzamientos elevados, sumado a estructuras de tamaño o persistencia elevados, son igualmente desfavorables para la estabilidad como favorables para

que ocurra la rotura del macizo. Juntas estas propiedades también definen el diseño del sistema de fortificación (ver Figura 1.7).



**Figura 1.6** Concepto de tamaño o largo de traza de discontinuidad. Propiedad que define en gran medida la formación de bloques. (a) Dos sets persistentes, (b) un set persistente, (c) sets semipersistentes (d) sets no persistentes, (e) baja formación de bloques, (f) alta formación de bloques (Modificado de ISRM, 1981).



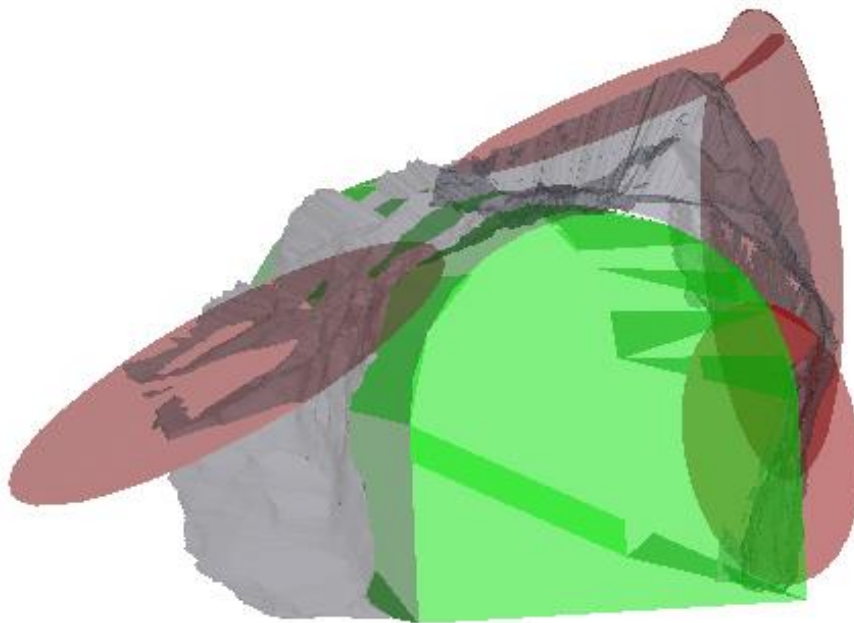
**Figura 1.7** Esquema de un sistema de fortificación de un túnel en una obra subterránea. El diseño del sistema de fortificación se define a partir de las propiedades Tamaño y Orientación de las discontinuidades (Tomado de 'Guía de Fortificación y Acuñaadura', SERNAGEOMIN, 2013).

Se ha observado que en las grandes inestabilidades geomecánicas en la mina El Teniente (explosiones de roca y cuñas) un importante control es estructural, y que en muchos casos (ver ejemplo presentado de la Figura 1.8) las estructuras que delimitan las sobreexcavaciones corresponden a discontinuidades geológicas (vetillas) sub paralelas a las

excavaciones (González & Brzovic, 2015), de trazas menores a los estándares de mapeos mina y/o muy difíciles de observar en ellos (aspecto relacionado a la dirección sub paralela de las discontinuidades). Todo lo anterior conduce a que las estructuras involucradas en estos problemas de inestabilidad no sean levantadas en lo mapeos estándares llevados a cabo por geólogos al interior de la mina.

Para capturar información es posible utilizar las nuevas tecnologías que permiten el levantamiento de información estructural detallada, confiable y en relativamente poco tiempo. Con este fin, en la mina El Teniente, se ha implementado un Sistema de Fotogrametría Digital que permite manipular Modelos Digitales de Terreno (DTM: *Digital Terrain Model*) en tres dimensiones de los cuales es posible capturar la información requerida (orientaciones y largo de trazas de las estructuras) a partir de fotografías 3D.

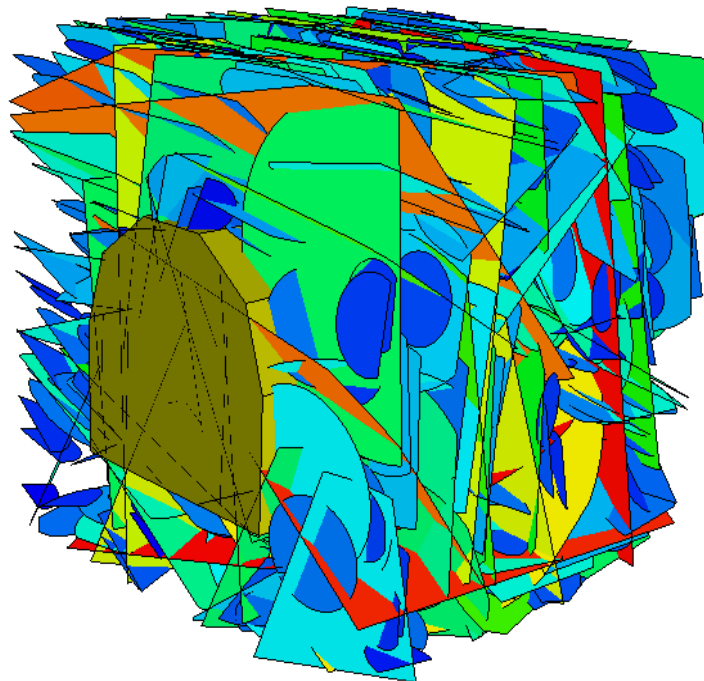
Este sistema permite el levantamiento estructural de discontinuidades cuyos largos de traza están por debajo del estándar de mapeo de interior mina en El Teniente y, por lo tanto, acceder al rango de largos de traza de estructuras en donde ocurren los problemas de inestabilidad antes comentados.



**Figura 1.8** Esquema 3D que muestra una sobre-excavación real en una sección del túnel luego de un estallido de roca. Se observa también que esta sobreexcavación tiene un control estructural (delimita el daño), por estructuras sub paralelas a la excavación (de trazas no visibles en las paredes de la galería) (Informe interno 160407 ADIT 74-75 3DM ADAM, 2016).

Una cuña inestable será factible solo si un set de al menos 3 estructuras geológicas se intersectan arriba del techo de una excavación, por lo cual la propiedad tamaño de estructura es de vital importancia. El problema al abordar los análisis de estabilidad basados en la información observada en galerías, es el limitado acceso que se tiene a conocer y medir el tamaño real y forma de las estructuras ya que estas características corresponden a propiedades 3D medibles solo en la superficie de las estructuras geológicas (observaciones en sondajes, 1D; observaciones en un afloramiento rocoso o cara de una excavación, 2D).

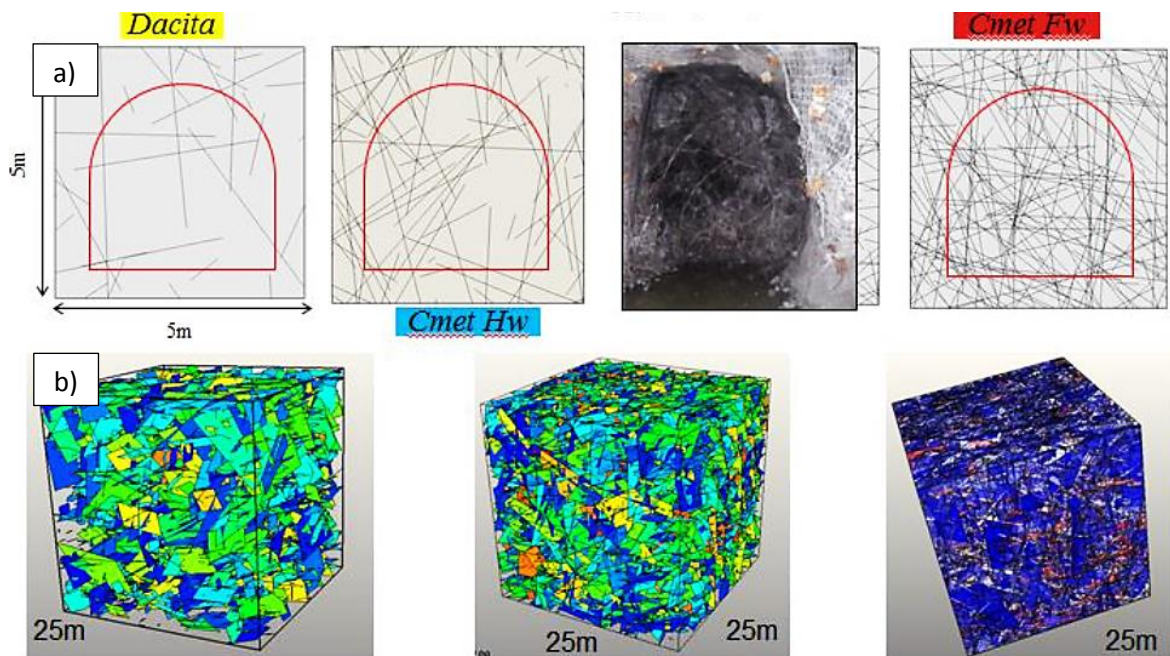
Para resolver el tamaño de las estructuras geológicas en torno a las excavaciones, la literatura especializada en geología estructural ha avanzado con el desarrollo y la construcción de lo que se ha denominado el Arreglo Estructural Estocástico en 3D o *Discrete Fracture Network (DFN)*. El DFN, en relación al largo de las estructuras geológicas, se basa en las relaciones matemáticas de observaciones en 2D y la propiedad 3D tamaño intrínseca de las mismas, desarrollada por Warburton (1980). El desarrollo de estos DFN permite conocer probabilísticamente las características geométricas del arreglo estructural del macizo rocoso en las inmediaciones de la periferia de un túnel de una labor subterránea (ver Figura 1.9).



**Figura 1.9** Esquema de un DFN que muestra arreglo estructural en la periferia de una excavación ficticia ideal (colores de las estructuras indican tamaño) (Confeccionado en FracMan).



En el Teniente ya se han aplicado los modelos estocásticos con el fin de conocer la propiedad Tamaño de estructura. Brzovic y Herrera (2012) obtuvieron una descripción detallada de la propiedad tamaño para el Pórfido Dacítico, con una media de tamaño de 0,9 m para una distribución exponencial y una media de tamaño de 1 m para una distribución lognormal. Estos resultados se han utilizado en la planificación de desarrollo de galerías y han sido aplicados para distintos análisis que exigen este *input*, en distintos ambientes geológicos y distintas rocas (aplicaciones como estimación de la fragmentación, análisis de estabilidad, entre otros). El problema que esto presenta es que la gran variabilidad de las condiciones geológicas nos indica *a priori* que las características geométricas de los arreglos estructurales deben ser distintas para distintos sectores de la mina (ver Figura 1.10), variabilidad evidenciada en las distintas geometrías de los *stockworks* observados en las galerías de la mina El Teniente.



**Figura 1.10** Modelos del arreglo estructural para distintos sectores de la mina. a) Esquema de mapas trazas perpendiculares a las galerías, tres sectores de la mina (Dacita, Cmet Hw y Cmet Fw), b) modelos estocásticos del arreglo estructural para tres sectores de la mina. Los tres modelos fueron generados a partir de un mismo valor de tamaño de estructura (GRMD-SGL-INF-61, 2014).

Luego, es necesario contar con una metodología que conduzca a la construcción de DFN's con datos estructurales de un solo disparo, lo que permitiría conocer estocásticamente la propiedad Tamaño, junto a propiedades como la Orientación y la Intensidad de Fracturamiento

(concepto revisado en '1.6 Intensidad de Fracturamiento'). Esto haciendo uso de la información levantada mediante métodos de fotografía 3D.

Por otro lado, también se busca utilizar los resultados para establecer diferencias en la geometría de los *stockworks* observados en distintos sectores de la mina. Esto con los fines de cuantificar estas diferencias, establecer tendencias para aumentar el conocimiento que se tiene del macizo rocoso, y poder medir la variabilidad de las características geométricas de los *stockworks* de la mina.

## **1.5 Objetivos**

### **Objetivo General**

Construir un modelo estocástico 3D del arreglo estructural que represente los datos levantados mediante métodos de fotografía 3D.

### **Objetivos Específicos**

1. Determinar los parámetros estadísticos de la distribución de los tamaños reales de las estructuras observadas en las galerías de la mina El Teniente.
2. Desarrollar una metodología de trabajo que permita resolver el objetivo específico 1.
3. Descripción y comparación de resultados para distintos ambientes geológicos.

## **1.6 Intensidad de Fracturamiento y notación $P_{xy}$**

La Intensidad de Fracturamiento o de discontinuidades es una medida del fracturamiento total en un macizo rocoso y corresponde a uno de los parámetros más importantes para describir la influencia de las discontinuidades en el macizo, y es utilizado ampliamente en este estudio. Para definir la Intensidad de Fracturamiento, generalmente, se combina la densidad de fracturamiento (el número de estructuras contenidas en una línea, en un área o en volumen) con las dimensiones del espacio que contiene a las estructuras. Puede ser expresada en términos de diferentes medidas en una, dos o tres dimensiones, incluyendo espaciamiento de

discontinuidad, frecuencia lineal, areal y volumétrica, RQD (*Rock Quality Designation*), largo de traza por unidad de área y área de discontinuidad por unidad de volumen (Zhang, 2006).

Existe una notación definida por Dershowitz & Herda (1992) que describe los parámetros de Intensidad de Fracturamiento de un macizo rocoso mediante el acrónimo  $P_{xy}$ , donde  $x$  es la dimensión que contiene el fracturamiento e  $y$  es la dimensión de la medida. Esta es la terminología específica que utiliza FracMan, *software* simulador utilizado en este estudio, para cuantificar características de fracturas. La notación es ilustrada en la Tabla 1.1.

Para  $x$ , 1 denota medidas a lo largo de una línea, 2 denota medidas hechas en un plano, y 3 denota medidas hechas en un volumen. Para  $y$ , 0 denota una medida puntual, 1 denota medida de longitud, 2 denota medida areal, y 3 denota medida volumétrica.

Luego, el número de estructuras contenidas en una línea de mapeo (usualmente un sondaje) corresponde a la medida del  $P_{10}$ (ff/m). El largo total de las trazas de las discontinuidades contenidas en un área de roca es el  $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>) (delineado en rojo en la Tabla 1.1), y el área total de las discontinuidades (la dimensión medida es área, o 2D) en un volumen de roca (dimensión donde se mide es volumen, o 3D) es el  $P_{32}$ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) (delineado en rojo en la Tabla 1.1). La Figura 1.11 muestra esquemas de las medidas y las notaciones utilizadas.

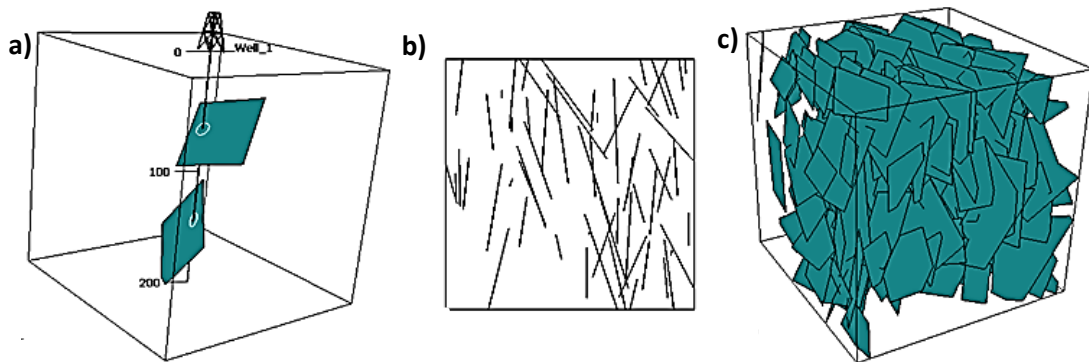
El valor del  $P_{32}$ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) es a menudo utilizado en la descripción del fracturamiento del macizo rocoso, ya que elimina los sesgos direccionales (es decir, no depende de la dirección en que se observe) y da una medida de la cantidad de fracturamiento. Sin embargo, éste parámetro es derivado de otros que sí son sesgados, como lo es el  $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>), debido a que no puede ser medido de forma directa.

El  $P_{32}$ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) tampoco es único, muchas fracturas pequeñas o pocas grandes pueden producir la misma área fracturada dentro de un volumen, he aquí la importancia de un modelo geométrico de distribución de los tamaños de las estructuras (Palleske, 2014).



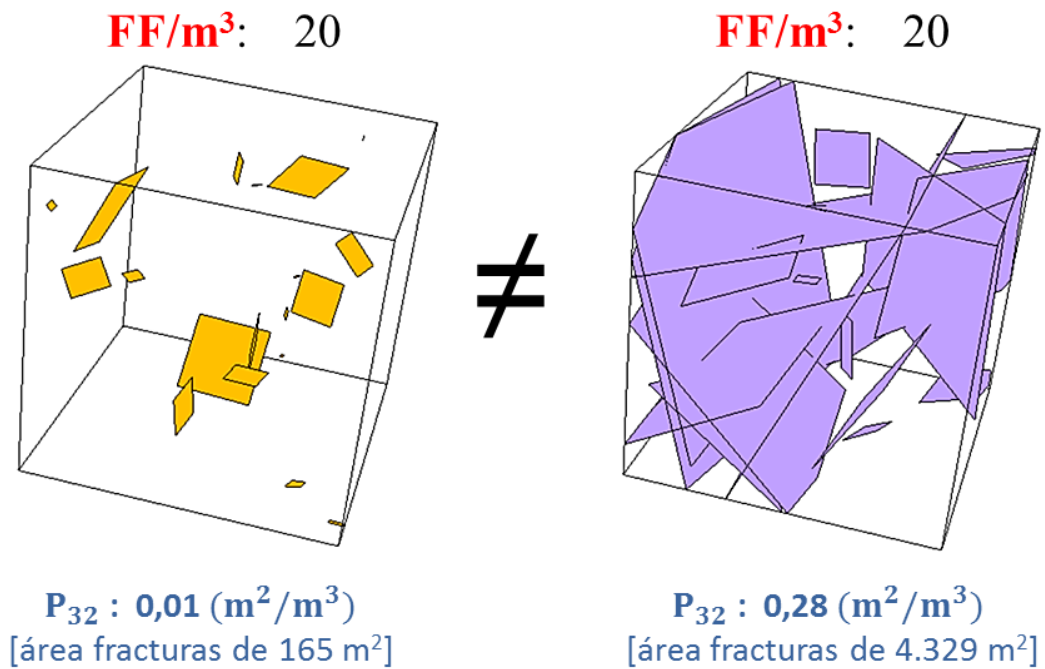
**Tabla 1.1** Parámetros geotécnicos de Intensidad de Fracturamiento definidos por Dershowitz & Herda (1992) (Modificada de *Golder Associates Ltd*, 2008).

	Dimensión de la medida				
Dimensión del muestreo	0	1	2	3	
1	P10 N° de fracturas por unidad de largo de un sondaje	P11 Largo de fracturas por unidad de largo			Medidas lineales
2	P20 N° de fracturas por unidad de área	P21 Largo de fracturas por unidad de área	P22 Área de fracturas por área		Medidas areales
3	P30 N° de fracturas por unidad de volumen		P32 Área de fracturas por unidad de volumen	P33 Volumen de fracturas por unidad de volumen	Medidas volumétricas
	Densidad		Intensidad	Porosidad	



**Figura 1.11** Medidas de Intensidad de Fracturamiento. a) Medida en una dimensión ( $P_{10}$ (ff/m), frecuencia lineal de fractura, espaciamiento, RQD, etc), b) medida en dos dimensiones ( $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>), frecuencia areal de fracturamiento, etc), c) medida en tres dimensiones ( $P_{32}$ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), frecuencia volumétrica de fracturamiento, porosidad, etc.) (Modificado de *Golder Associates Ltd*, 2008).

El  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  posee ventajas comparativas respecto a otros parámetros similares presentes en la bibliografía afín a estos temas. Uno de estos parámetros es la medida de  $\text{ff}/\text{m}^3$ , que corresponde a el número de estructuras contenidas en volumen, es decir, una medida de frecuencia volumétrica. La principal ventaja de la Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  sobre esta medida es que en su definición incluye el factor del tamaño de las estructuras, entregando más información del fracturamiento total del macizo rocoso que el  $\text{ff}/\text{m}^3$ . La Figura 1.12 muestra un esquema de comparación de ambas medidas.



**Figura 1.12** Esquema de comparación entre medidas de Intensidad de Fracturamiento. Para iguales valores de  $\text{ff}/\text{m}^3$  los valores de  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  son distintos y entregan mucha más información respecto al fracturamiento total del macizo rocoso (Modificado de Apuntes de Brzovic & Herrera, 2011).

## CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Geología Regional

Varios autores dan cuenta de la geología regional entorno a la mina El Teniente, entre los cuales se encuentran Klöhn (1960), Aguirre (1960), Davidson & Vicente (1973), Charrier (1973, 1981, 1983), Thiele (1980), Charrier *et al.* (1994), Rivera & Falcón (2000), entre otros.

El Yacimiento de cobre-molibdeno “El Teniente” se ubica en los Andes Centrales, formando parte de la Franja Cuprífera del Mioceno Superior-Plioceno (Skewes *et al.*, 2002). A nivel regional, las rocas que afloran en el distrito del yacimiento están representadas por potentes secuencias de rocas volcánicas estratificadas, intercaladas con secuencias sedimentarias (marinas y continentales), correspondientes a unidades meso-cenozoicas (abarcando desde el Triásico al cuaternario) del Ciclo Orogénico Andino (Klöhn, 1960). Estas rocas se encuentran instruidas por cuerpos plutónicos e hipabisales de edad Cenozoica, como batolitos, stocks y en menor medida por diques y apófisis. En la Figura 2.1 se presenta el mapa geológico regional extraído de Charrier *et al.* (1996).

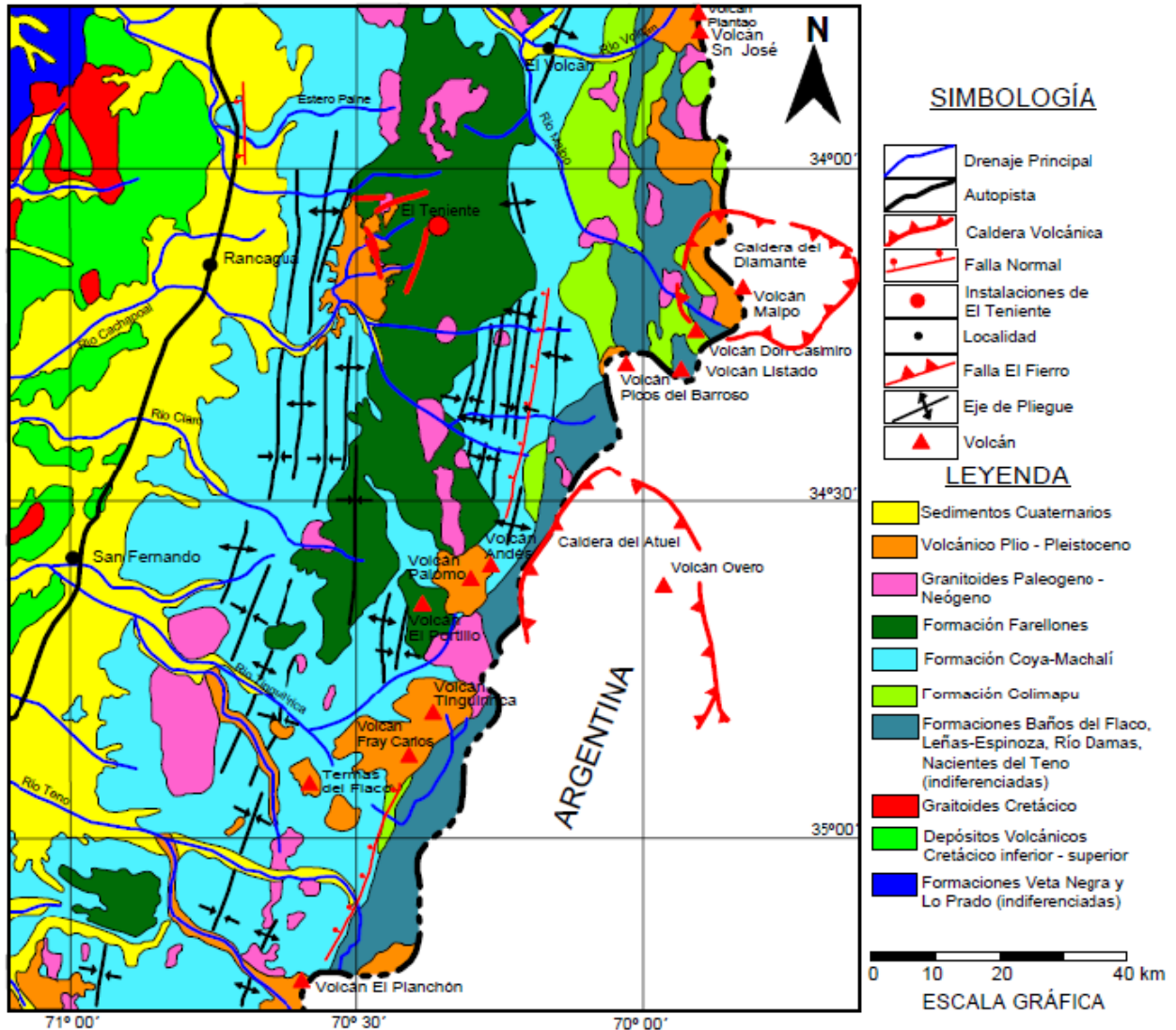
#### 2.1.1 Rocas Estratificadas

Las secuencias estratificadas (volcánicas y sedimentarias) que afloran en el área del Yacimiento El Teniente (ver resumen en Tabla 2.1) han sido definidas por Klöhn (1960), Charrier (1973 y 1981), González (2000) entre otros, y corresponden, de más antigua a más reciente, a:

##### **a) Formación Nacientes de Teno (Bajociano-Kimmeridgiano Inferior):**

Son rocas sedimentarias clásticas ubicadas en la zona este de la región. Dicha formación está definida por Klöhn (1960). Se distribuye discontinuamente en la porción oriental de la región (Charrier, 1973) y subyace en forma concordante a la Formación Río Damas (Davidson, 1971) (Ver Figura 2.1). Davidson & Vicente (1973) definen que esta formación está constituida por dos miembros: el Miembro Santa Elena Evaporítico (yeso y anhidrita), con una potencia de 500 a 600 m que disminuye paulatinamente hacia el este; y el Miembro Inferior

Detrítico y Calcáreo, que corresponde al Miembro Rinconada y Estratos Inferiores del Valle Villagra y Quebrada La Zorra definido por Klöhn (1960), que presenta una potencia de 100 a 200 m, su edad es asignada en base a su contenido fosilífero (Charrier, 1973).



**Figura 2.1:** Mapa Geológico Regional (Modificado de Charrier *et al.*, 1996). Cordillera de la Costa: (1) Formaciones Veta Negra y Lo Prado (indiferenciadas). Depósitos de cuenca intra-arco volcánico (dominio volcánico) y marino sedimentarios (Jurásico Superior a Cretácico Inferior) (2) Depósitos volcánicos continentales (dominio volcánico, Cretácico inferior a superior) (3) Granitoides (intrusivos, Cretácico). Cordillera Principal: (4) Formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas, Nacientes del Teno (indiferenciadas, marino y continental, Jurásico). (5) formación Colimapu (Jurásico Superior a Cretácico inferior, marino). (6) Formación Coya-Machalí (Palógeno, volcánico continental). (7) Formación Farellones (Neógeno, volcánico continental). (8) Granitoides (Paleógeno-Neógeno). (9) Volcánico (Plioceno-Pleistoceno). (10) Cuaternario continental clástico.

**Tabla 2.1:** Resumen de las Formaciones de los Andes de Chile Central. Modificado de Charrier *et al.* (1996).

Formación	Litología	Espesor (m)	Edad	Autor	observaciones
Colón - Coya	Lahares, coladas de lavas andesíticas, dacíticas y piroclastos	150	Plioceno Superior-Reciente	Gómez (2001)	
Discordancia del 3° plegamiento					Fase del Mioceno-Plioceno
Farellones	Depósitos continentales, lavas dacíticas y depósitos piroclásticos	2400	Mioceno (25-7 Ma )	Klöhn (1960)	
Discordancia del 2° plegamiento					Fase del Oligoceno Inferior o del Mioceno Inferior
Coya-Machalí	Depósitos volcanoclásticos y depósitos detríticos	3200	Paleógeno-Neógeno Inferior (62.3-164 Ma)	Klöhn (1960)	Correlacionable con la Formación Abanico
Discordancia del 1° plegamiento					Fase del Cretácico Superior
Colimapu	Depósitos sedimentarios rojos (M. Inferior) y depósitos volcánicos (M. Superior)	2000-3000	Barremiano-Albiano	Klöhn (1960)	
Baños del Flaco	Sedimentarias marinas fosilíferas	2000	Titoniano-Neocomiano	Klöhn (1960)	Correlacionable a la Formación lo Valdés
Leñas-Espinoza	Rocas piroclásticas, depósitos turbidíticos	1200	Kimmeridgiano Superior	Klöhn (1960)	Concordante en contacto por falla
Río Damas	Areniscas rojas continentales, conglomerados y lavas.	3000	Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior	Klöhn (1960)	
Nacientes del Teno	Areniscas marinas y calizas, 100-200 m de yeso (M. Superior)	600-1000	Bajociano-Kimmeridgiano Inferior	Klöhn (1960)	En los Andes de Chile Central no afloran estratos más antiguos

**b) Formación Río Damas (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):**

Definida por Klöhn (1960), está constituida por sedimentos clásticos continentales intercalados con potentes depósitos de origen volcánico (efusivos y piroclásticos) y esporádicos sedimentos químicos. Esta secuencia representa el término del ciclo regresivo originado por el sollevamiento tectónico del paleoborde occidental sudamericano. Depositada en un ambiente esencialmente terrestre, subaéreo y lagunar, entre el Kimmeridgiano Superior y Titoniano Inferior. Se distribuye como una franja N-S en el margen oriental de la región (ver Figura 2.1). Su mayor desarrollo se encuentra en la zona del Río Damas y su espesor promedio es de 3.000 m. Sobreyace concordantemente a la Formación Nacientes del Teno y subyace, en forma

concordante y gradual, a la Formación Baños del Flaco, mientras que su relación estratigráfica con la Formación Leñas-Espinoza es desconocida (Charrier, 1981).

**c) Formación Leñas-Espinoza (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):**

Definida por Klöhn (1960) y posteriormente redefinida por Charrier (1981), Es una serie de rocas sedimentarias que puede ser separada en dos partes, un miembro inferior de tipo detrítico y uno superior de tipo calcáreo fosilífera, en conjunto su potencia promedio es de 1200 m. Su contacto inferior es desconocido, pero hacia el techo subyace a la Formación Coya-Machalí de manera discordante y a la Formación Baños de Flaco con un contacto gradual. También presenta un contacto contemporáneo de falla con la Formación Rio Damas.

**d) Formación Baños del Flaco (Titoniano-Neocomiano):**

Definida por Klöhn (1960) como una secuencia de rocas sedimentarias calcáreas de carácter marino (margas y calizas) con intercalaciones detríticas y volcánicas (conglomerados, brechas, areniscas, tobas y lavas), con una potencia que varía entre 1.100 y 2.300 m aproximadamente disminuyendo su espesor hacia Este. Posteriormente, Charrier (1981), asigna a esta formación los Estratos Superiores de la Formación Leñas-Espinoza definida por Klöhn (1960). Se reconoce en el sector oriente de la región (ver Figura 2.1). Sobreyace concordantemente y con paso gradual a las Formaciones Río Damas y Leñas-Espinoza y Subyace concordantemente la Formación Colimapu. En algunas áreas, su límite superior se encuentra erosionado y se presenta cubierto de manera discordante por la Formación Coya-Machalí. En general, esta formación esta intensamente deformada.

**e) Formación Colimapu (Barremiano-Albiano):**

Definida inicialmente por Klöhn (1960). Corresponde a rocas volcano-sedimentarias que agrupa a areniscas tobíferas rojizas, lutitas tobíferas y tufitas rojas, éstas son intercaladas con conglomerados, brechas, lavas andesíticas, calizas y capas de yeso, lo que indicaría un ambiente continental. La formación presenta dos miembros, un Miembro Inferior Sedimentario (areniscas finas y calizas) y un Miembro Superior Volcánico (tobas, lapilli e ignimbritas), de 1500 y 1600 m de potencia respectivamente (Charrier, 1981). El espesor mínimo es de 3000 m.

El origen de esta formación estaría relacionado con el segundo ciclo continental asociado al alzamiento que ocurrió durante el Barremiano-Albiano (Charrier, 1973). Su contacto inferior es

de tipo concordante con la Formación Baños del Flaco, mientras que su contacto superior es discordante por erosión con la Formación Coya-Machalí.

**f) Formación Coya-Machalí (Eoceno Superior-Mioceno Inferior):**

Definida por Klöhn (1960), corresponde a intercalaciones de rocas volcánicas (coladas, brechas, tobas y riolitas) con rocas sedimentarias (brechas, conglomerados, areniscas y limonitas), ambas de tipo continental. Dataciones de K-Ar indican edades de 20,5-23,1 Ma (Charrier & Munizaga, 1979). La Formación Farellones (Charrier et al., 1994) divide en dos franjas paralelas a ésta. La zona occidental contiene rocas de tipo volcánicas con texturas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas; mientras que la zona oriental contiene rocas piroclásticas con intercalaciones de sedimentitas. La franja occidental posee 1900 m de potencia, en tanto que la franja oriental unos 1300 m. Su contacto inferior es discordante con la Formación Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno, ésta se debería a la orogénesis a la que se vio expuesta. Su contacto superior es con la Formación Farellones y corresponde a una discordancia angular.

**g) Formación Farellones (Mioceno Superior):**

Definida por Klöhn (1960), predominantemente volcánica. Corresponde a una secuencia que aflora en una franja casi continua de orientación N-S (ver Figura 2.1). Contiene grandes depósitos de flujos piroclásticos e intercalaciones de sedimentos lacustres, en la parte inferior, mientras que en la parte superior presenta lavas intermedias a básicas y domos riolíticos (Thiele *et al.*, 1990). Las rocas volcánicas que la conforman agrupan lavas andesíticas-riolíticas, tobas e ingnimbritas con intercalaciones de brechas (Charrier & Munizaga, 1979); éstas se habrían depositado en un ambiente continental con actividad volcánica principalmente andesítica, cuyo centro eruptivo se ubicaría probablemente a lo largo de la zona actual de afloramientos de esta formación. Thiele y *et al.* (1990) postulan que estas secuencias se habrían acumulado en un graben volcánico-tectónico, formado a partir de una serie de colapsos de calderas, basándose en la presencia de fallas normales que delimitan esta formación, el gran volumen de magma ácido extruído y un gradiente paleotermal alto (de tipo campo geotérmico). Dataciones radiométricas K/Ar indican edades de 4,13-14,3 Ma (Charrier, 1983), asignándola así al Mioceno Medio-Superior. Se dispone con pliegues suaves, con inclinaciones de no más de 25° a subhorizontales (Charrier, 1983), y sobreyace en discordancia angular sobre estratos de la Formación Coya-Machalí (Klöhn 1960; Charrier, 1973). La importancia de esta formación en la región radica en que esta aloja el yacimiento El Teniente.

#### **h) Formación Colón-Coya:**

Reconocida por primera vez por Enrione (1972) y definida como formación por Gómez (2001), corresponde a un conjunto de lahares de granulometría heterogénea, insertos en una matriz arcillo-cinerítica, con intercalaciones locales de piroclastos, ceniza, lavas andesíticas de poca potencia y gravas fluviales. El espesor de este depósito varía entre algunos centímetros y 150 m. En el área, sus afloramientos se disponen discordantemente sobre las formaciones Farellones y Coya-Machalí, abarcando un área de 160 km<sup>2</sup> y rellenando la paleotopografía del vale. Su techo corresponde a la actual superficie de erosión. Dataciones radiométricas K-Ar obtenidas por Charrier & Munizaga (1979), coinciden con los resultados de Cuadra (1986), situando esta formación en el Plioceno-Pleistoceno (2,3-1,3 Ma). Se encuentra ubicada hacia el S-W del yacimiento (ver Figura 2.1).

#### **i) Depósitos no consolidados (Pleistoceno):**

Secuencias asignadas al Cuaternario. Asociados principalmente a los sistemas de drenajes del área, corresponden a depósitos aluviales (fluviales, lacustres y glaciofluviales). Estos depósitos se encuentran rellenando los principales sistemas de drenaje, tales como los valles de los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco (ver Figura 2.1).

### **2.1.2 Rocas Intrusivas**

Los intrusivos presentes en el sector de la Cordillera de los Andes, donde se encuentra emplazado el yacimiento El Teniente, tienen una variada composición, textura, edad y extensión. Existen al menos cinco franjas de intrusivos agrupados en complejos ígneos intrusivos del Paleógeno-Neógeno (Oligoceno Superior al Mioceno Superior), con edades que varían entre los 34,3 y 5,59 Ma (Falcón & Rivera, 1998). Las unidades intrusivas comprenden cuerpos plutónicos e hipabisales, que corresponden principalmente a granodioritas, pórfidos dioríticos y andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos, cortando las rocas de las Formaciones Coya-Machalí y Frellones (Skewes, 2002).

Cuerpos menores observados en la región, corresponden principalmente a stocks, apófisis, diques y filones, que constan de rocas fanerocristalinas, subordinadamente, afaníticas y brechas, entre las que se han reconocido granitos, granodioritas, tonalitas, monzonitas



cuarcíferas y dioritas cuarcíferas. En general, se trata de cuerpos relativamente pequeños y aislados (Charrier, 1981).

Por relaciones de contacto con las rocas encajantes y por la alineación que muestran estos cuerpos, se les asigna una edad general post-Formación Farellones, es decir, posterior al Mioceno (Stewart & Araya, 1972 y Godoy, 1993).

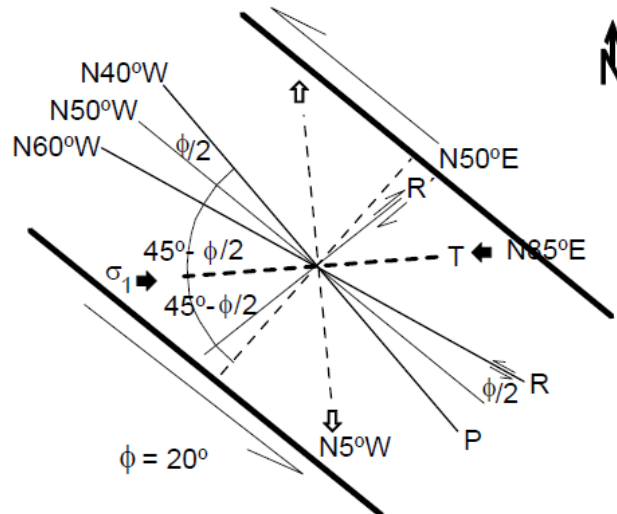
Kurtz *et al.* (1997) agruparon estos cuerpos en 3 unidades de acuerdo a sus edades de según datación Ar/Ar:

- i. Plutones antiguos, cuyas edades fluctúan entre  $21,6 \pm 4,9$  y  $16,2 \pm 1,2$  Ma.
- ii. Complejo Plutónico Teniente, subdividido en un grupo de 12 Ma ( $12,4 \pm 2,5$  y  $11,3 \pm 0,3$  Ma) y un segundo grupo de 8 Ma ( $8,8 \pm 0,1$  y  $7,7 \pm 0,1$  Ma)
- iii. Complejo Plutónico Joven, con edades que oscilan entre los  $6,6 \pm 0,1$  y los  $5,5 \pm 0,2$  Ma.

### **2.1.3 Estructuras**

Los rasgos geológicos de Chile Central, entre los  $33^{\circ}\text{S}$  y  $39^{\circ}\text{S}$  estarían en parte controlados por estructuras regionales NW-SE a NNW-SSE producidas durante los eventos tectono-magmáticos del Paleozoico-Mesozoico (Godoy & Lara, 1994). Estas estructuras estarían marcando los límites de los segmentos tectónicos dispuestos de manera oblicua a la cadena andina actual, habiendo sufrido numerosas reactivaciones durante el Mesozoico-Cenozoico (Rivera & Cembrano, 2000); donde los movimientos laterales de los mismos explicarían la distribución de franjas de centros volcánicos e intrusivos del Mioceno en la región (Falcón & Rivera, 1998).

En el área, los patrones estructurales habrían sido el resultado de movimientos laterales a lo largo de una zona de transcurrencia sinistral  $\text{N}50^{\circ}\text{W}$ , generando fracturas sintéticas sinestrales (tipo R), de orientación  $\text{N}60^{\circ}\text{W}$  y antitéticas dextrales (tipo R'), de orientación  $\text{N}50^{\circ}\text{E}$  (Falcón & Rivera, 1998) como se muestra en la Figura 2.2 del modelo estructural de Riedel.



**Figura 2.2:** Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrancia sinistral de rumbo N50°W que coincide con la zona de falla Río Blanco-Codegua (tomado de Rivera y Falcón, 1998).

Dentro de los rasgos estructurales de carácter regional, se pueden mencionar:

- i. Pliegues: Son descritos anticlinales y sinclinales por Klöhn (1960), y Charrier *et al.* (1994). Presentan un suave buzamiento hacia el sur cuyos ejes de rumbo general norte-sur muestran inflexiones en el rumbo desde N 30° W a N 30° E. Estas estructuras presentan continuidad longitudinal solamente entre los segmentos acotados por sistema de fallas N 30° W (Rivera & Falcón, 2000).
- ii. Fallas: Los sistemas de falla consisten en siete zonas de falla orientadas generalmente N 30° W, que se reconocen tanto en la Cordillera de la Costa como en la de los Andes. En torno al yacimiento El Teniente, destacan las zonas de falla Piuquencillo al norte, El Azufre al centro y Juanita al sur (Rivera & Cembrano, 2000), que truncan a los ejes de plegamiento de la Formación Farellones. Además, Rivera y Falcón (2000) describen a la cuenca de El Teniente como una depresión volcánico tectónica, que se encuentra limitada al norte por la falla Piuquencillo y al sur por el lineamiento Tinguiririca – Navidad, con un ancho de casi 100 kilómetros y largo, en la dirección noroeste - sureste, superior a los 150 kilómetros.
- iii. Discordancias: Tres fases compresivas son reconocidas en la región, que se manifiestan a través de tres discordancias orogénicas de plegamiento y de erosión (Klöhn, 1960).

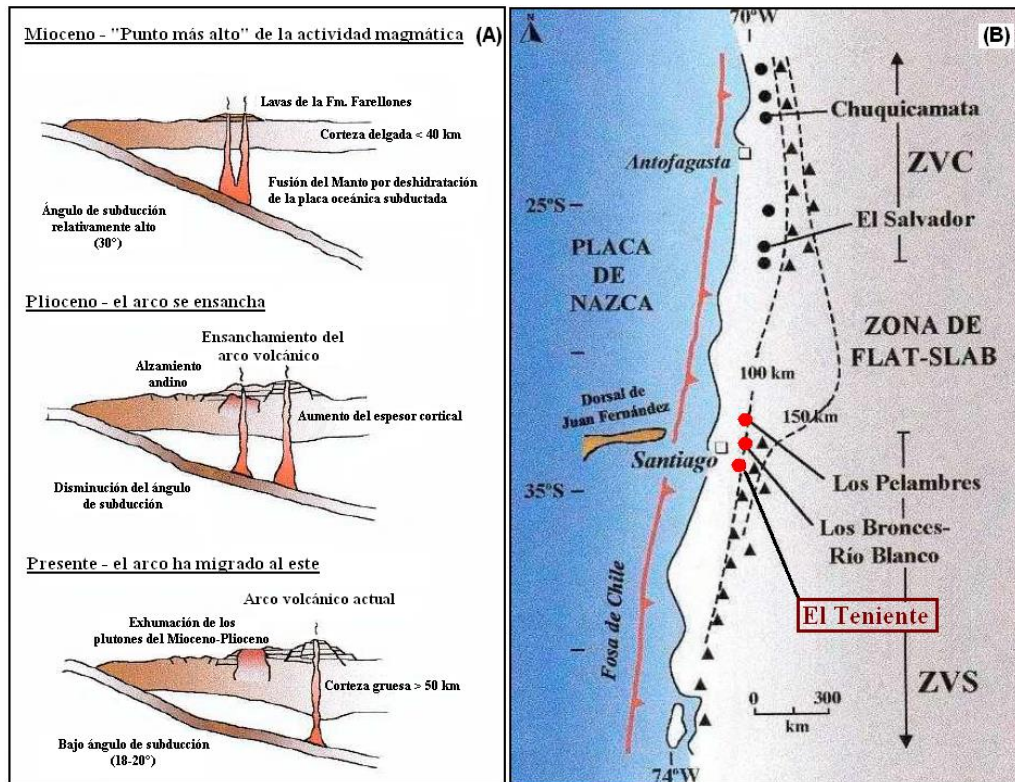
En la región ocurren tres fases compresivas de deformación:

- i. Fase de la parte inferior del Cretácico Superior, que pondría en discordancia las formaciones de la Formación Farellones y las rocas volcánicas terciarias y cuaternarias.
- ii. Fase responsable de la deposición de la Formación Coya-Machalí en discordancia sobre la Formación Colimapu, su edad no es clara, algunos autores la asignan al Oligoceno Inferior, y otros al Mioceno Inferior (Charrier *et al.*, 1996).
- iii. Fase del Mioceno-Plioceno que genera un suave plegamiento de la Formación Farellones, depositándose en discordancia la Formación Colon-Coya.

También pueden mencionarse las características regionales descritas por Charrier (1981), quien identifica fallas inversas en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí, las que se verían favorecidas por la presencia de intercalaciones de roca incompetente, la presencia de fallas normales con desplazamientos verticales, asociadas a la tectónica de bloques Plio-Cuaternaria resultante del alzamiento andino, y una falla con deslizamiento transcurrente sinistral a lo largo del Río Cachapoal, que desplaza a los ejes de pliegues de la Formación Coya-Machalí.

#### **2.1.4 Marco Geotectónico**

Su génesis estaría relacionada a la evolución tectónica del margen continental sudamericano: a engrosamiento cortical y a la progresiva disminución del ángulo de subducción de la Placa de Nazca, desde el Mioceno, que produce solevamiento. El rápido ascenso de los sistemas plutónicos emplazados en profundidad, genera la exsolución de fluidos magmáticos ricos en cobre que originan la mineralización (Skewes y Stern, 1995). La disminución de la edad de los depósitos hacia el sur indica un vínculo genético con la migración al sur del foco de subducción de la Dorsal de Juan Fernández (Stern y Skewes, 1997). En la Figura 2.3 se muestra la evolución magmato-tectónica de los Andes Centrales a los 34°S entre el Mioceno al Presente, y la ubicación de los segmentos Zona Volcánica Central (ZVC), zona de flat-slab y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS).



**Figura 2.3:** Marco Geotectónico: (A) Perfiles transversales de la evolución magmato-tectónica de los Andes Centrales a los 34°S entre el Mioceno al presente. (B) Ubicación del segmento Zona volcánica Central (ZVC), zona de flat-slab y la porción norte de la Zona volcánica Sur (ZVS). Los triángulos representan el actual frente volcánico activo y los círculos rojos los tres yacimientos gigantes de pórfido cuprífero del Mio-Plioceno, ubicados en el extremo norte de la ZVS. Los círculos negros representan pórfidos más antiguos, ubicados en el extremo sur de a ZVC. Líneas segmentadas indican la actual profundidad de la zona de Benioff (tomado y modificado de Stern & Skewes, 1995 y 1997).

Durante el Mioceno Medio, se desarrolla una disminución del ángulo de subducción bajo el segmento cortical al norte de los 33°S, debido a la anteriormente mencionada subducción activa de la Dorsal de Juan Fernández (Pilger, 1981), la cual produce una segmentación del arco andino en Chile Central. Este evento produjo un ensanchamiento del arco magmático y migración del frente volcánico hacia el este en el Mioceno Tardío y, luego, el término de la actividad magmática durante el Plioceno (Kay y Kurtz, 1995), por lo que el flat-slab se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica moderna (Kurtz y otros, 1997). Este proceso además se asocia a un alzamiento, deformación y aumento del espesor de la corteza bajo la cadena volcánica al norte de los 33°S (Kay y otros, 1991).

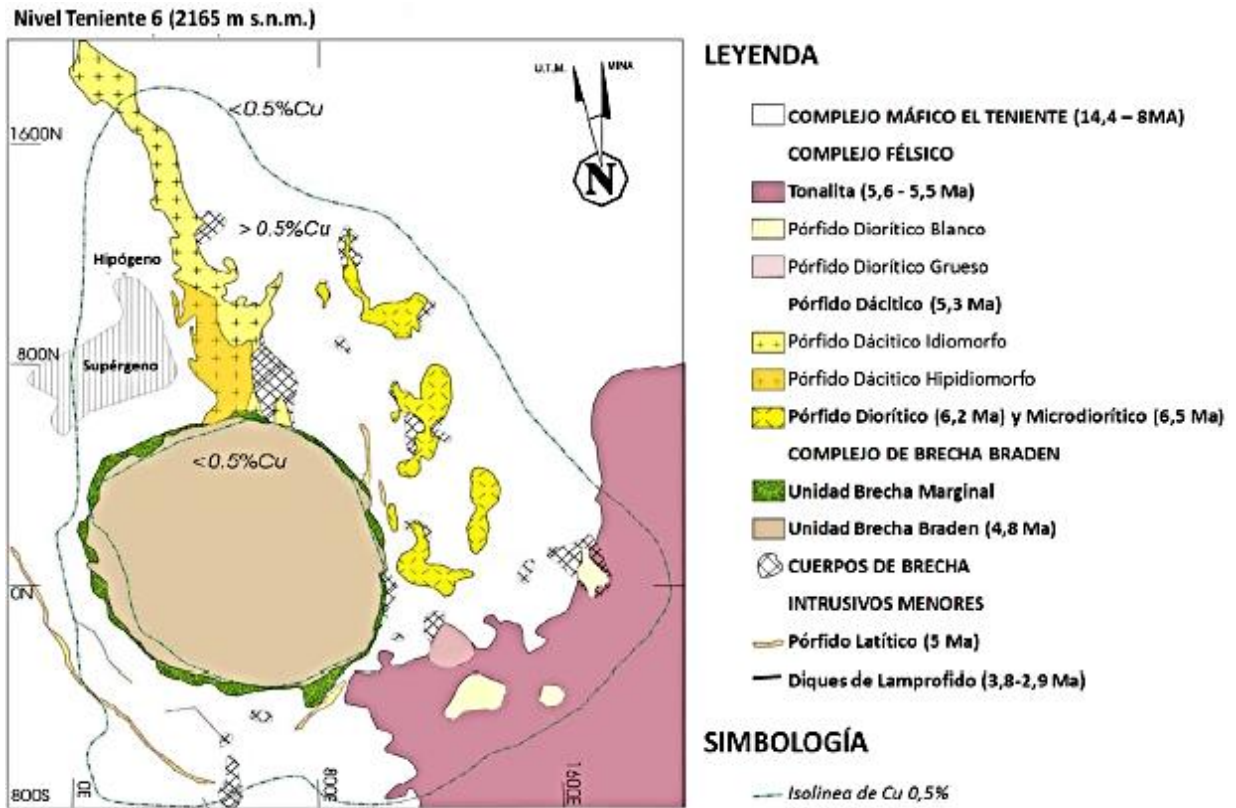
Por otro lado, al sur de los 33°S, el ángulo de subducción también decrece, contemporáneamente al desarrollo del flat-slab, pero en menor magnitud. El frente volcánico migra hacia el este a su ubicación en los Andes en la actualidad. También se produce deformación y engrosamiento de la corteza, y el alzamiento de la cadena andina (Skewes y Stern, 1994).

## 2.2 Geología del Yacimiento

El yacimiento hipógeno de cobre El Teniente pertenece al grupo de depósitos de cobre formados a fines del Mioceno y es uno de los más grandes del mundo. Se encuentra emplazado en rocas intrusivas, piroclásticas, volcánicas y subvolcánicas correspondientes a la Formación Farellones de edad miocena media a superior (Camus, 1975; Cuadra, 1986) (ver Figura 2.1).

Las rocas intrusivas que se observan en el depósito se emplazan, principalmente, en el miembro inferior de la Formación Farellones y corresponden a: cuerpos irregulares de composición diorítica, que afloran en los alrededores de la localidad de Sewell. En su parte central se encuentra la megaestructura denominada Brecha Braden, con forma de cono invertido (Cuadra, 1986) y en donde se ubican las instalaciones principales de la mina. También se distingue un dique de composición dacítica que solamente aflora en las laderas de la Quebrada Teniente; filones latíticos dispuestos concéntricamente a la Chimenea de Brechas Braden, ubicados al oeste del sector; cuerpos intrusivos y de brechas menores; y un dique de lampróvido que aflora al sur de la megaestructura.

Es el resultado de sucesivos eventos de deformación, intrusión de cuerpos félsicos, mineralización y alteración superpuestos, ocurridos en un lapso de al menos 5,3 Ma, donde los recursos se generaron en un periodo de 1,2 Ma (Maksaev *et al.*, 2002; Maksaev, 2004; Canell *et al.*, 2004). Otra hipótesis es la propuesta por Skewes *et al.* (2002), la que sugiere que se trataría de un depósito de megabrecha generado por la exsolución de fluidos magmáticos de plutones en enfriamiento. La formación de las vetas tardías, en asociación con el emplazamiento de brechas más jóvenes e intrusiones de pórfidos félsicos, generan una alteración sericítica que en algunos casos contribuye con Cu y en otros elimina o redistribuye la mineralización preexistente (Skewes *et al.*, 2002). La Figura 2.4 muestra la geología simplificada del yacimiento.



**Figura 2.4** Geología simplificada mostrada a través del mapa litológico del Nivel Teniente 6 (2165 m.s.n.m) del yacimiento El Teniente (modificada de la base de datos de la mina). En la figura se muestran las principales Unidades Litológicas y el límite del depósito definido por concentraciones superiores al 0,5% de Cu. En él se indican las coordenadas locales medidas en metros.

La mineralización de cobre y molibdeno es principalmente en vetillas del tipo stockwork (70%), formando un cuerpo mineralizado de forma elíptica en planta, de 1,6 km x 2 km aproximadamente. El 30% restante se concentra en el cemento de diversa brechas magmáticas-hidrotermales de biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina, y en menor proporción, diseminada en la matriz de los cuerpos intrusivos félsicos. Los minerales de mena más importantes, en la zona primaria, corresponden a la asociación calcopirita-bornita-pirita. En la zona de enriquecimiento secundario, el mineral característico es la calcosina y en forma subordinada covelina, cobre nativo y cuprita (Cuadra, 1986).

Los sistemas estructurales principales de la mina son: NS, NE, NNW, esta última con continuidad distrital, evidenciados por la traza de los contactos entre unidades de rocas diferentes, por fallas y zonas de cizalle, y por la distribución y geometría de las vetas y vetillas.

### 2.2.1 Unidades Litológicas

Dentro del yacimiento se pueden distinguir los siguientes grupos litológicos principales: Complejo Máfico El Teniente (ex “Andesitas de la Mina”), Complejo Félsico, Complejo Chimenea Braden (“Braden Pipe”), Complejo de Brechas e intrusivos menores (ver Figura 2.5).

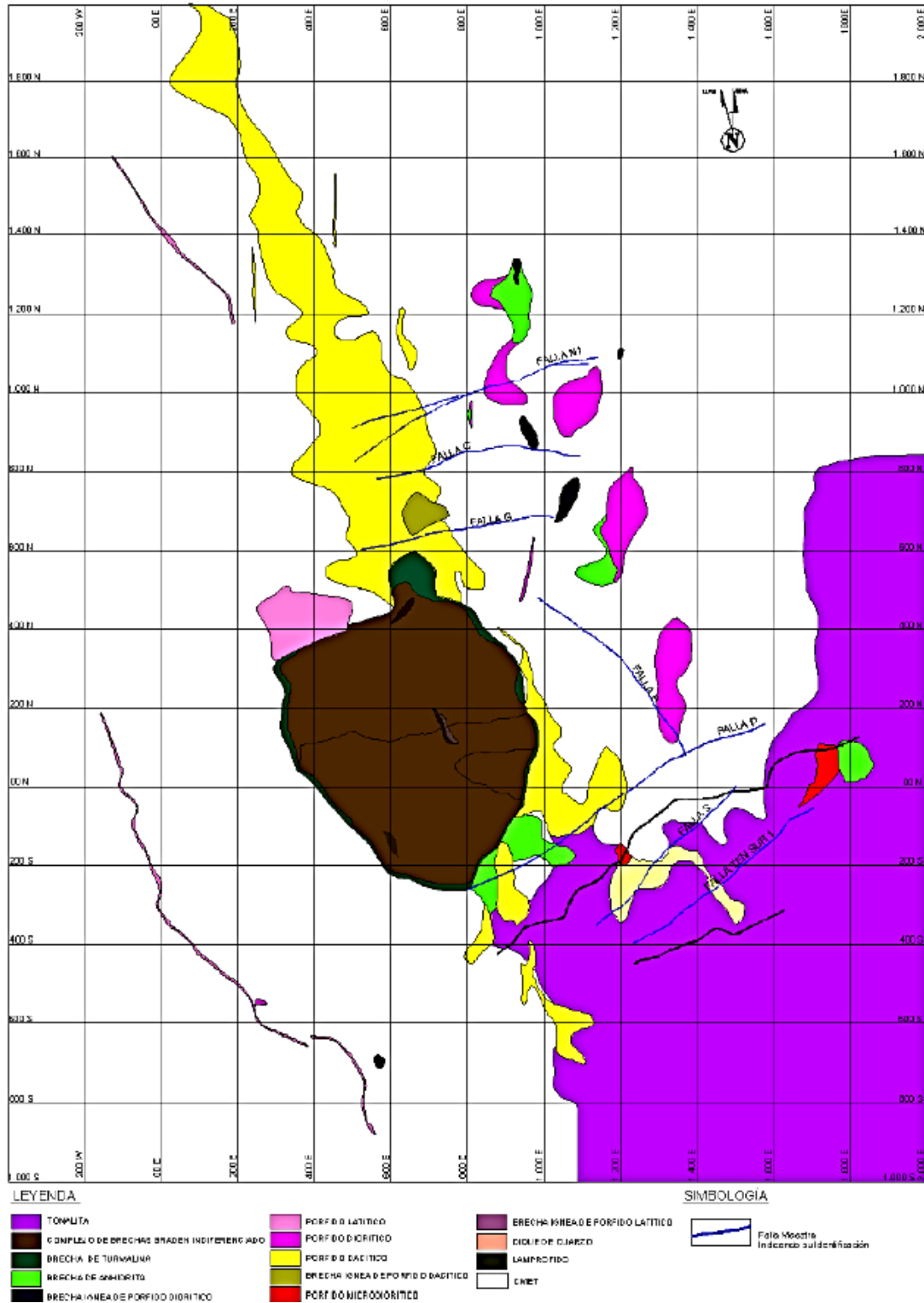
#### a) Complejo Máfico El Teniente (CMET)

Conjunto de rocas oscuras del Mioceno Superior las que, a gran escala, conforman un lacolito que intruye a la Formación Farellones (Munizaga *et al.*, 2002; Charrier *et al.*, 2002; Skewes, 2000), y que constituyen la roca caja en la cual se hospeda más del 80% de la mineralización de cobre presente en el depósito (Camus, 1975; Arévalo & Floody, 1995 y Arévalo *et al.*, 1998) (ver Figura 2.5).

Esta unidad es un complejo subvolcánico de composición básica color pardo oscuro a negro, que tiene una extensión vertical de más de 2 km de alto, 2,4 km de ancho y 1,2 km de largo (Burgos, 2002). Las rocas poseen texturas que van de afaníticas, a porfídicas. La petrografía original de estas ha sido obliterada ya que se encuentran fuertemente alteradas, brechizadas y mineralizadas. En el interior del yacimiento las características de rocas primarias quedan enmascaradas por el intenso “*stockwork*” y por la alteración hidrotermal principalmente potásica, siendo la biotita el mineral predominante en esta fase (Villalobos, 1975) y responsable del color negro que las caracterizan.

Algunos estudios mostraron que corresponden a rocas máficas intrusivas, las cuales incluyen a gabros, diabasas, pórfidos basálticos y pórfidos basálticos andesíticos (Skewes, 1997; Skewes & Arévalo, 1997 y 2000; Skewes, 1999 y Skewes *et al.*, 2002). Estas rocas estarían conformando sólo una parte del Complejo Máfico El Teniente, el cual correspondería a un complejo intrusivo subvolcánico (Skewes 1997; Skewes, 2000 y Skewes & Arévalo, 2000).

Estudios recientes, confirman que parte del complejo corresponde a una diabasa de textura porfídica que presenta variaciones en el tamaño de los fenocristales de plagioclasa. Las texturas de grano fino corresponderían a los márgenes del intrusivo y las de grano grueso al centro de éste. En general, se encuentra constituido por relictos de piroxenos y tiene una fuerte alteración biotítica (Burgos, 2002).



**Figura 2.5** Mapa geológico con las principales Unidades Litológicas del proyecto Nuevo Nivel Mina, cota 1.880 m (confeccionado por la Superintendencia de Geología, mina El Teniente).



## **b) Complejo Félsico**

### ***Pórfido Diorítico***

Anteriormente denominada como Diorita Central. Corresponde a una serie de diques y stocks, de gran extensión vertical y alineamiento de rumbo N30°W. Dentro del yacimiento se encuentra ubicado en la parte norte y central del mismo. En el contacto con el CMET se generan brechas hidrotermales con distintos cementos y clastos de pórfido diorítico.

Posee fenocristales de plagioclasas, biotitas y en menor cantidad cuarzo, que conforman aproximadamente un 60% del total de la roca. Presenta diversas alteraciones, tales como: potásica, filica y argílica (Guzmán, 1991).

Según Maksaev y otros (2004), la edad de cristalización sucedió entre  $6,11 \pm 0,13$  Ma y los  $6,28 \pm 0,16$  Ma. Las dataciones anteriores fueron realizadas mediante U/Pb en circones.

### ***Tonalita***

Es un gran cuerpo intrusivo, ubicado en la parte SE del yacimiento, y corresponde a un stock de 200 m<sup>2</sup> ubicado al SE de la pipa Braden. Intuye al Complejo Máfico El Teniente.

El cuerpo muestra un color gris oscuro y posee variaciones texturales: en las zonas marginales es del tipo porfídico (con fenocristales de plagioclasa primaria, biotita y relictos de anfíbola), mientras que hacia el centro es fanerítica. El límite entre ambas texturas es transicional y se puede evidenciar por variaciones en el tamaño de los cristales y porcentaje de masa fundamental (Faunes, 1981). El cuerpo es afectado por una intensa alteración filica, caracterizada por cuarzo-sericita-clorita (Cuadra, 1986).

Su composición química es de carácter calcoalcalino, con contenidos de SiO<sub>2</sub> variables entre 63,6% y 64,2%.

Dataciones radiométricas, por el método K/Ar, le asignó al stock una edad de  $7,1 \pm 1,0$  Ma (Cuadra, 1986), es decir, se le asignó una edad Mioceno Superior, mientras que por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  fue datado en  $5,47 \pm 0,2$  Ma a  $5,63 \pm 0,12$  Ma, que corresponde al Plioceno Inferior (Maksaev *et al.*, 2001).

### ***Pórfido dacítico (ex Pórfido Teniente)***

Antiguamente llamado Pórfido Teniente, Dacita Pórfídica o simplemente Dacita, fue caracterizada por Ossandón (1974), Cuadra (1986) y Rojas (2002), entre otros, quienes señalan que corresponde a un cuerpo intusivo con disposición N-S a NNW con manto subvertical. Corresponde a un cuerpo tabular irregular subvertical situado en el sector norte del yacimiento, el cual intruye a las rocas máficas donde se observan contactos nítidos, pero de diseño irregular o bien transicional. El cuerpo se dispone con 1.500 m de corrida y una potencia variable entre 50 m, hacia los niveles más superficiales, y 300 m, hacia los niveles más profundos. El límite sur se encuentra cortado por la Chimenea de Brechas Braden, en cuyo contacto se desarrolla una brecha con fragmentos del pórfido y matriz de turmalina.

El Pórfido Dacítico es de color gris claro a blanco con fenocristales de oligoclasa, biotita y escaso cuarzo (Cuadra, 1986), siendo una roca rica en feldespatos alcalinos y pobre en sílice. Ossandón (1974) distinguió dos variedades texturales: la porfídica idiomorfa, que ocurre cerca de la zona de contacto, y la porfídica hipidiomorfa, que ocurre en la parte central del intrusivo.

El principal evento mineralizador del depósito ha sido asociado con el emplazamiento de este intrusivo (Ojeda *et al.*, 1980), aunque estudios recientes concluyen que el Pórfido Dacítico jugó un rol importante en la redistribución del cobre, en torno a sus márgenes (Skewes, 2000).

Edades U-Pb en circón indican que la cristalización del intrusivo ocurrió hace 5,3 Ma (Maksaev *et al.*, 2002 y Munizaga *et al.*, 2002). Las dataciones K-Ar en biotita arrojan una edad de alteración y mineralización entre los 4,6 a 4,7 Ma (Clark *et al.*, 1983 y Cuadra, 1986).

### ***Pórfido Microdiorítico***

Antiguamente conocido como "Pórfido A", Corresponde a una diorita de grano fino, con abundantes xenolitos de "andesita" y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994), que se ubica en el sector central-este del yacimiento, presentando contactos por intrusión con la Tonalita y el Complejo Máfico El Teniente (Figura 2.5). Este cuerpo genera un volumen importante de brechas ígneas e hidrotermales que muestran altas leyes de cobre.

Edades U/Pb en circón, indican que la cristalización de este cuerpo ocurrió hace  $6,46 \pm 0,11$  Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

### **c) Complejo Brecha Braden**

Corresponde a una pipa volcánica que se originó por la expulsión de gases que fragmentaron la roca caja. Tiene forma de cono invertido y en planta se manifiesta de manera circular con un diámetro 1200 m y una profundidad de 3150 m (Floody, 2000). Se encuentra en la parte central del yacimiento, y por relaciones de contacto, se estima que su edad corresponde a 4,7 a 4,5 Ma (Cuadra, 1986). Se compone de dos unidades.

### **d) Cuerpos de Brechas**

El Complejo de Brechas se compone de clastos monolíticos y/o heterolíticos. Arredondo (1994) reconoció en el sector central este del yacimiento, varios cuerpos de brechas de distinta composición. Las brechas están clasificadas de acuerdo al mineral dominante contenido en la matriz (Skewes, *et al.*, 2002), entre las cuales destacan las Brechas de anhidrita, Brechas de turmalina, Brechas de biotita y Brechas Ígneas. Los clastos son de rocas intrusivas de composición félsicas, máficas o de ambas, con matriz de biotita, turmalina, cuarzo, feldespato, clorita, anhidrita, yeso, apatito, calcopirita, bornita, pirita, rutilo y magnetita. La matriz suele encontrarse atravesada por vetillas de anhidrita, cuarzo, biotita, feldespato y sulfuros de cobre.

### **e) Intrusivos Menores**

Corresponden a unidades de ocurrencia restringida y de menor importancia, volumétricamente menos importantes y de carácter parcialmente estéril. Estos intrusivos corresponden a los últimos eventos intrusivos reconocidos en el yacimiento.

### **f) Pórfido Latítico**

Definido por Howell & Molloy (1960) como latita porfídica, corresponden a diques de poca potencia (entre 2 a 15 m) concéntricos a la Brecha Braden (Figura 2.5). Se reconoce como cuerpos irregulares, discontinuos y autobrechizados. La roca posee una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa en una proporción mucho mayor que en el Pórfido Dacítico. Contiene además fenocristales de biotita, anfíbolos alterados, "ojos de cuarzo" en una masa fundamental de cuarzo y feldespato (Skewes *et al.*, 2002). Edades Pb-U en circón realizadas por indican 4,82±0,09 Ma.

### **g) Diques de Cuarzo y Anhidrita**

Formados por cuarzo y en menor grado anhidrita y sulfuros diseminados. Abundan en la parte norte y oeste del depósito. Presentan potencia que varía de 10 cm a 3 m, con un manteo generalmente subvertical. En general, no desarrollan halo de alteración en la roca de caja y sus contactos son tajantes (Morales & Pereira, 1996).

### **h) Dique de andesita**

Atraviesa a la Diorita Sewell en el sector sur de ésta. La roca es de color gris negro y presenta textura porfídica. El cuerpo es de forma tabular de 0,52 a 1,0 m de potencia, con rumbo N60°E y corrida de 500 m.

### **i) Diques de Lamprófido**

Se ubica al sur de la Brecha Braden. Son cuerpos tabulares, de potencia variable de 1 a 2 m, de color gris a verdosos. Su textura es porfídica, con fenocristales de hornblenda en una masa fundamental de augita y labradorita. Cortan al CMET, a la Tonalita y a la Brecha Braden. Dataciones de K-Ar indican una edad de 3,8 a 2,9 Ma (Cuadra, 1986 y Godoy, 1993).

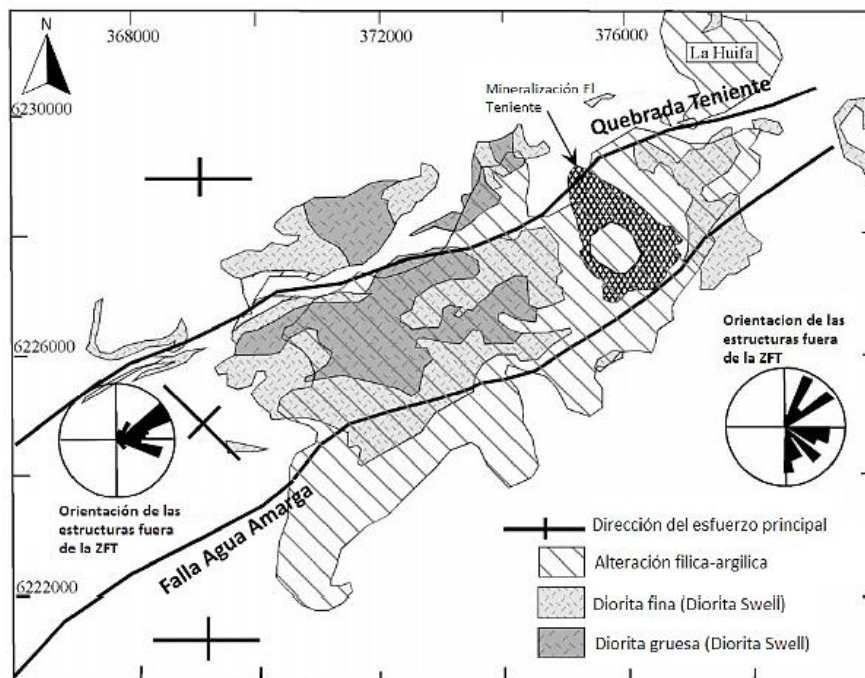
## **2.2.2 Geología estructural del yacimiento**

Según Garrido (1992), el yacimiento se encuentra emplazado en una compleja zona de cizalle de características distritales y con orientación aproximada de N65° E, denominada Zona de Falla El Teniente (ZFT) y caracterizado por la presencia de tres dominios estructurales particulares: Dominio N60°E, Dominio N50°W y dominio N20°E dispuesto en echelón con respecto a los anteriores. Los Dominios estructurales corresponden a zonas de mayor frecuencia relativa de fallas, constituidos en su mayoría por fallas de rumbo con manteo subvertical. En la mina se manifiestan por una mayor frecuencia de fallas paralelas, con un espesor variable entre 20 a 400 m.

La ZFT con una extensión de 14 km y ancho de 3 km se limita al norte con la quebrada Teniente y al sur por la falla Agua Amarga (ver Figura 2.6). Dentro de la zona de falla, el arreglo estructural es totalmente distinto al reconocido en el entorno, independiente del tipo litológico, definiendo un eje de acortamiento de dirección N48°±11W (Garrido, 1995). Estos sistemas

habrían estado activos antes, durante y después de la formación del yacimiento y serían controlados por el emplazamiento de la chimenea Braden (Garrido, 1992).

Dentro de las estructura más notables no se puede dejar de mencionar la zona de chimenea o pipa de Brechas Braden emplazada en rocas de la Formación Farellones (Camus, 1975). Con el emplazamiento de los cuerpos intrusivos y de la Chimenea Braden se originó un fracturamiento, que afecta a estos cuerpos y a las rocas encajadoras preexistentes. Este fracturamiento es del tipo “stockwork” que aloja gran parte de la mineralización, alcanzando frecuencias máximas de 40 vetillas por metro lineal en las cercanías de los contactos con los intrusivos (Zúñiga, 1982).



**Figura 2.6** Zona de Falla El Teniente (ZFT). Es una extensa zona de tendencia NE limitada por la quebrada El Teniente hacia el Norte y la falla Agua Amarga hacia el sur. Controla el emplazamiento del Complejo Tonalítico Sewell (8,9-7,0 Ma; Kay & Kurts, 1995), y las zonas de alteración del yacimiento. Garrido (1995) nota que el esfuerzo principal regional es de tendencia E-W, siendo rotado a la dirección NW dentro de la ZFT (modificado de Garrido, 1995).

En El Teniente las estructuras geológicas se clasifican de acuerdo a dos parámetros: continuidad y tipo de relleno (ver Tabla 2.2). En la mena primaria las estructuras se caracterizan por encontrarse selladas y con gran número de estructuras menores con trazas que alcanzan los 4 metros y conforman un denso enrejado (“stockwork”), por sobre las estructuras de

mayores trazas. En la mena secundaria, ubicada hacia sectores altos del yacimiento, el agua ha lixiviado algunos minerales cambiando las propiedades originales de las estructuras, lo que trae como consecuencia la pérdida del sello natural, permitiendo la circulación de agua.

**Tabla 2.2** Clasificación de Estructuras Geológicas del Yacimiento El Teniente.

Tipo de estructura	Continuidad	Espesor típico
Distritales	>1 km	>1 m
Maestras	>500 m	Entre 5 y 120 cm
Mayores	>100 m o corta más de 3 labores	>7 mm
Intermedias	>4m y <100 m o corta hasta 3 labores	<5 mm
Menores	<4 m o no corta labor	≤2 mm

### 2.2.3 Alteración y Mineralización

La mineralización del yacimiento El Teniente es producto de la superposición de diversos eventos de alteración y mineralización. En la actualidad se distinguen tres etapas hipógenas, llamadas Tardimagmática, Hidrotermal Principal y Hidrotermal Tardía y una etapa Supérgena. La Tabla 2.3 presenta un resumen de estas etapas. Éstas están relacionadas al emplazamiento de los intrusivos félsicos dacítico y diorítico, y al anillo de brecha hidrotermal de turmalina y brecha Braden (Howell & Molloy, 1960). Producto de estos eventos de alteración, han originado las vetillas Tardimagmáticas, Principales y Tardías, que constituyen la evolución hipógena del yacimiento.

#### i. Etapa Tardimagmática

Corresponde a la primera etapa de alteración del yacimiento. El mineral principal es biotita, sin embargo, existe también anhidrita, albita, clorita, cuarzo, sericita y turmalina. La mineralogía ocurre mayoritariamente en vetillas sin halo, aunque existe también de manera diseminada (Zuñiga, 1982). El pórfido dacítico fue zonado en esta etapa, con un núcleo rico en bornita, un sector intermedio de calcopirita y una parte externa con abundante pirita y magnetita.

Dentro del yacimiento hay dos sectores en que esta etapa se encuentra marcada. El primero, en la zona norte, con la intrusión del pórfido dacítico (Arévalo y Floody, 1995) que presenta una gradación, desde el centro, en intensidad de alteración potásica a propilítica. El segundo, en la parte sur, se observa la misma zonación pero enmascarada por las alteraciones posteriores.

En el Complejo Máfico El Teniente, la alteración se denota con la presencia de biotita, albita y cuarzo, que destruye la textura original de la roca (Arredondo, 1994).

**Tabla 2.3** Etapas de alteración y Mineralización hipógenas (Modificado de Cuadra, 1986).

ETAPA	CARACTERÍSTICAS GENERALES	MINERALOGÍA PRINCIPAL	RELACIONADA A	TEMPERATURA DE FORMACIÓN
TARDIMAGMÁTICA	Alteración potásica en vetillas (cuarzo, feldespato potásico y anhidrita) y en forma masiva (perfitización en intrusivos y biotitización en CMET). Conforman zonas de mayor intensidad en un esquema concéntrico al Pórfido Dacítico en la parte norte y en el borde de la Tonalita Sewell, por el sur.	Cuarzo, anhidrita, feldespato potásico (perfitita), biotita, clorita. Calcopirita, bornita, pirita, molibdenita	Consolidación de los intrusivos Tonalita Sewell y Pórfido Dacítico.	450° - 650° C
HIDROTHERMAL PRINCIPAL	Alteración fílica desarrollada a partir de vetillas de sulfuros, generando halos de alteración de cuarzo, sericita y clorita, de ancho variable. Las zonas de mayor intensidad conforman franjas en las "andesitas" dispuestas en forma simétrica al Pórfido Dacítico. También se desarrolla en la Tonalita Sewell como vetillas y en forma masiva.	Cuarzo, sericita, clorita y anhidrita. Calcopirita, pirita, molibdenita y ± bornita	Reacción de los fluidos tardimagmáticos con las aguas meteóricas.	250°– 450° C
HIDROTHERMAL TARDÍA	Alteración fílica que afecta a los clastos de la Brecha Marginal y como halos de alteración de vetillas, en forma similar a la anterior, pero con menos frecuencia. Se desarrolla a partir de la Brecha Marginal extendiéndose a unos 100 o 150 m en una zona concéntrica a ésta.	Anhidrita, cuarzo, sericita, turmalina, yeso, carbonatos, clorita. Calcopirita, bornita, pirita, molibdenita, tenentita.	Fluidos hidrotermales generados por el emplazamiento de la Brecha Marginal.	300° C
PÓSTUMA	Principalmente alteración a sericita y calcita. Restringida a la Chimenea Braden, en vetillas de baja frecuencia o afectando a la matriz y a los clastos de la Brecha Braden.	Sericita, calcita, yeso, cuarzo, siderita, anketita, baritina, anhidrita, turmalina. Pirita, calcopirita, molibdenita, blenda, galena, tenantita.	Fluidos hidrotermales asociados a la formación de la Chimenea Braden.	250°– 300° C

## ii. Etapa Hidrotermal Principal

Etapa que se sobreimpone a la anterior y está relacionada con la reacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. Se define por la superposición de franjas de alteración fílica, ubicadas simétricamente con respecto al Pórfido Dacítico. Su intensidad se encuentra determinada por la frecuencia de vetillas de cuarzo, anhidrita y sulfuros, que obliteran la mineralogía preexistente y texturas tardimagmáticas (Ojeda *et al.*, 1980). La mineralización corresponde a calcopirita, pirita y molibdenita subordinada, principalmente en vetillas y escasamente en forma diseminada en los halos de alteración (Zúñiga, 1982). Las vetillas son de cuarzo, anhidrita y calcopirita, con muscovita, digenita y molibdenita en menor cantidad. Las vetillas hidrotermales principales (HP) se asocian a esta etapa. En la roca de caja, la mineralogía es reemplazada por una asociación de cuarzo-sericita, con menor proporción de anhidrita y clorita. La asociación se desarrolla a expensas de la biotita tardimagmática y de los feldespatos de las rocas máficas y del pórfido Teniente respectivamente. En la diorita y Pórfido Dacítico, el feldespato potásico, plagioclasa y ferromagnesianos se encuentran alterados en forma similar y la textura original fanerítica y/o porfídica es reemplazada por una textura sacaroidal fina.

## iii. Etapa Hidrotermal Tardía

Relacionada espacial y genéticamente a la unidad Brecha Marginal (Villalobos, 1975). Se manifiesta por la alteración cuarzo-sericita de los fragmentos de la brecha, así como por vetas y vetillas rellenas con anhidrita, yeso, turmalina, siderita, cuarzo y con halos de alteración cuarzo-sericita-clorita-calcita. Las vetillas contienen cuarzo, turmalina, anhidrita, sericita, clorita, yeso, carbonatos y menas de cobre, hierro y molibdeno (Zúñiga, 1982), las cuales se distribuyen en una franja concéntrica al anillo de brechas y además como cemento matriz de la brecha hidrotermal de turmalina, y como parte de la alteración de sus fragmentos. Arévalo *et al.* (1998), dividen a esta etapa en dos: una etapa temprana y una tardía propiamente tal asociada a la brecha de turmalina y constituye los valores máximos de penetrabilidad de la etapa tardía original.



#### **iv. Etapa Póstuma**

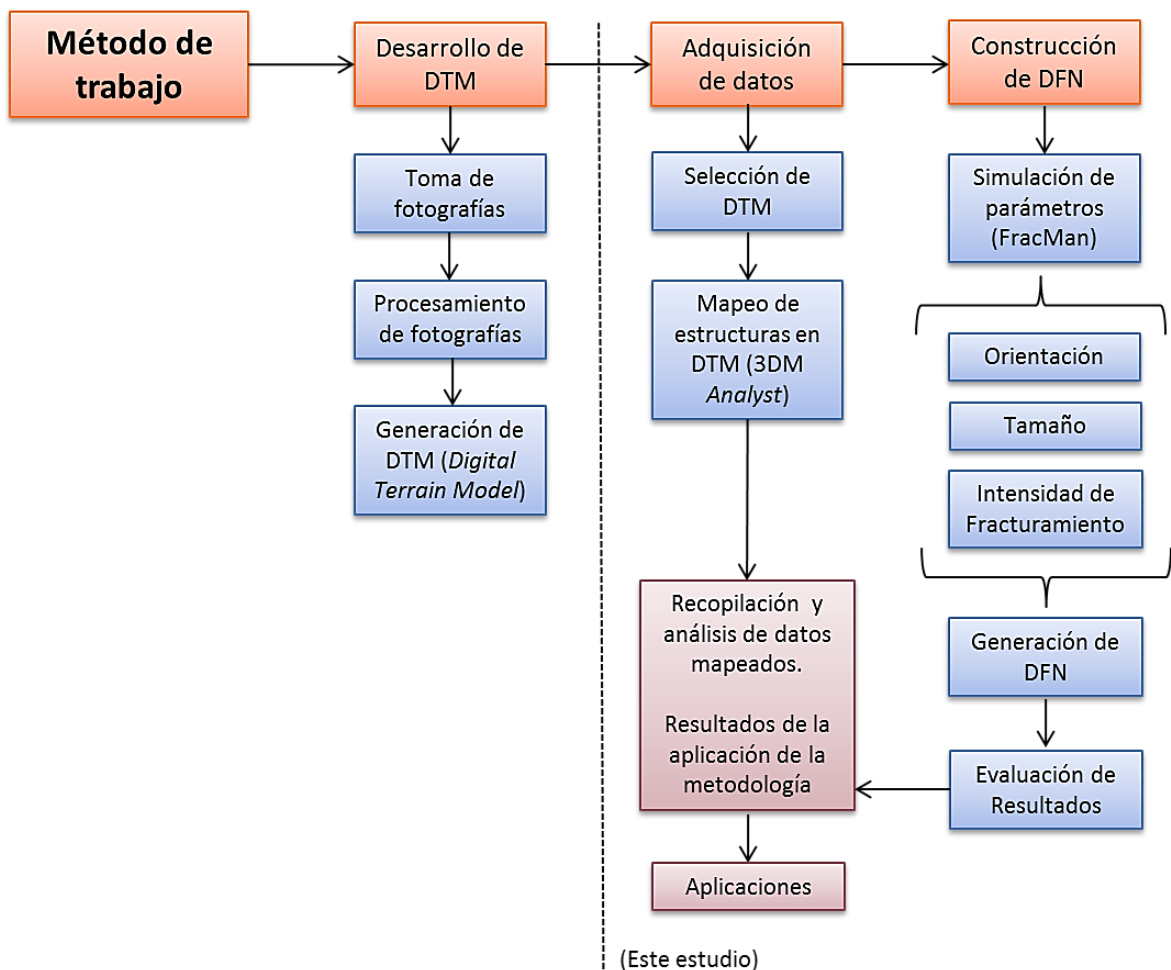
Está relacionada a la consolidación de la Brecha Braden y se caracteriza por una asociación mineralógica constituida fundamentalmente por sericita, calcita y pirita en el cemento, y por la alteración sericítica de la fracción clástica. También existe un relleno de estructuras planares y de cavidades, con minerales de baja temperatura tales como yeso, siderita, ankerita, baritina, blenda, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina (Ojeda *et al.*, 1980). La mineralización hipógena se encuentra en vetas y vetillas de pirita, calcopirita, tenantita-tetraedrita, molibdenita y galena-esfalerita con anhidrita como mineral de ganga predominante y de manera subordinada cuarzo, turmalina, yeso y carbonatos. Como minerales secundarios se encuentran sericita, clorita y calcita junto con diseminaciones de pirita y calcopirita (Floody, 2000).

#### **v. Etapa Supérgena**

Esta etapa se distribuye con geometría elíptica de eje mayor NW en un área de 15 km<sup>2</sup> en la parte alta del yacimiento (Portigliati & Camus, 1974; Ojeda *et al.*, 1980 y Álvarez, 1990). La cuenca alcanza una profundidad entre los 100 y 600 m y un ancho que varía entre los 100 y 500 m (Cuadra, 1986). Se caracteriza por la lixiviación total de la anhidrita y la presencia de sericita y arcillas. La mineralización corresponde a calcosina gris, calcosina celeste y covelina azul, los cuales fueron generados por el reemplazo total de los sulfuros preexistentes. El paso fue gradual, reemplazando selectivamente a los sulfuros de cobre, primero a bornita y luego a calcopirita. La pirita durante el proceso de lixiviación no sufrió alteración (Álvarez, 1990). La edad de los eventos de alteración y mineralización se encuentra comprendida entre los 5,3 a 4,7 Ma (Cuadra, 1986 y Makshev *et al.*, 2001).

## CAPÍTULO 3: LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL MEDIANTE MÉTODOS DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL 3D

Los Capítulos 3 y 4 del presente trabajo describen la metodología diseñada para la construcción de Modelos Estocásticos del Arreglo Estructural a partir de la información levantada en galerías de la mina El Teniente mediante métodos de fotografía 3D, es decir, el flujo de trabajo para un análisis en 3DM *Analyst* (Fotogrametría Digital) y FracMan (Simulador de estructuras 3D). El diagrama de la Figura 3.1 muestra el método de trabajo seguido para un realizar un análisis completo.



**Figura 3.1** Diagrama de flujo de trabajo que representa las distintas etapas para un análisis completo mediante el uso de los *softwares* 3DM *Analyst* y FracMan.

El diagrama de trabajo anterior se divide en 4 etapas, donde 3 de éstas (cuadros anaranjados en la Figura 3.1) se refieren a la aplicación de la metodología diseñada por el autor de este trabajo para llevar a cabo un análisis completo mediante el uso de la fotogrametría y la simulación estocástica. En el diagrama, la línea vertical segmentada indica que este estudio se centra en las etapas detalladas a la derecha de ésta.

La primera columna de trabajo del diagrama de la Figura 3.1 se refiere al desarrollo de los DTM y abarca los procesos desde la toma de las fotografías en las galerías hasta el procesamiento de éstas y la posterior generación de los Modelos Digitales de Terreno o DTM (*Digital Terrain Model*). Esta columna del diagrama se revisa brevemente en este estudio ya que corresponde al trabajo del personal de la mina encargado de la toma de fotografías y al trabajo de un técnico especializado en el procesamiento de éstas. Estos ‘Modelos Digitales de Terreno’ son la fuente de donde se obtuvo toda la información en la que se basó este trabajo, pero un análisis más minucioso de su construcción y desarrollo se escapa de los objetivos y alcances de este estudio.

La segunda columna corresponde a la adquisición de datos y abarca la selección de DTM y el levantamiento de información de estructuras en éste mediante el *software* 3DM *Analyst* de *Adam Technology*. Esta etapa fue llevada a cabo, en forma íntegra, por el autor de este trabajo. Las etapas primera y segunda de la Figura 3.1 se revisan en el presente apartado ‘Capítulo 3 Levantamiento estructural mediante el método de Fotogrametría Digital 3D’.

La tercera columna corresponde a la construcción de los modelos estocásticos del arreglo estructural (DFN o *Discrete Fracture Network*) y abarca desde la simulación de las orientaciones de las estructuras hasta la evaluación de los resultados, pasando por el ajuste de parámetros de Tamaño de estructuras e Intensidad de Fracturamiento (simulación de estructuras). Ésta culmina con la explicación del método de evaluación utilizado para asegurar la representatividad de las simulaciones llevadas a cabo. Ésta es realizada mediante la aplicación de las herramientas de simulación de estructuras disponibles en el *software* *FracMan* de *Golder Associates*. Esta etapa se revisa en el apartado ‘Capítulo 4 Construcción de un Modelo Estocástico del Arreglo Estructural o DFN’. Una cuarta etapa (cuadros violetas en la Figura 3.1) corresponde a una aplicación a partir de los resultados obtenidos de la metodología y es revisa en el Capítulo 4.

Cada una de estas etapas comprende una gran cantidad de cálculos y procesos los cuales fueron automatizados por el autor de este trabajo mediante el uso de

'Macroinstrucciones' para FracMan y *Microsoft Excel* (ver 'ANEXO H: Macroinstrucciones aplicadas en la metodología').

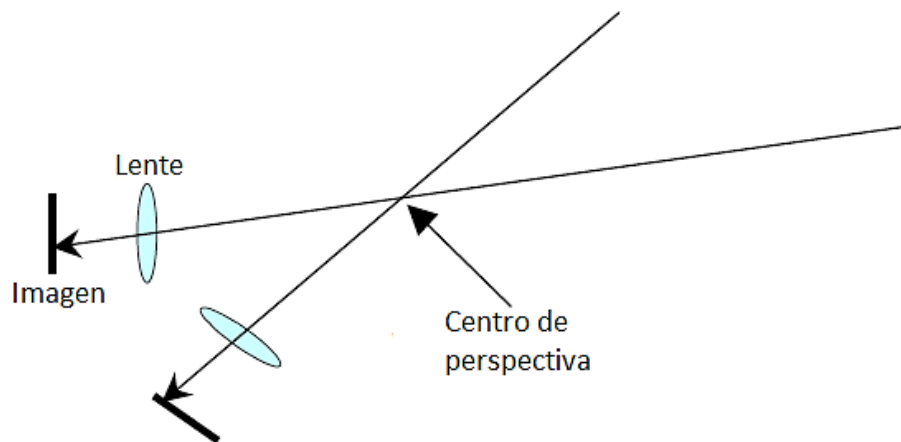
A continuación, se describen en detalle las dos primeras etapas mencionadas en los cuadros del diagrama de la Figura 3.1.

### 3.1 Desarrollo de DTM (*Digital Terrain Model*)

#### 3.1.1 Fotogrametría

La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS) define a la fotogrametría como 'La ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera lograr obtener y registrar las métricas y geométricas (dimensión, forma y posición, etc.) del objeto fotografiado' (Jauregui, 2001).

Para Birch (2006), la fotogrametría se encarga de la determinación de información 3D a partir de dos o más imágenes 2D de una escena o terreno. Esto se logra identificando el mismo punto en cada imagen y proyectando un rayo a la superficie registrada a través de un centro de perspectiva en cada captura para encontrar el lugar donde estos rayos coinciden, esto se observa en la Figura 3.2.



**Figura 3.2** Determinación de un punto único 3D mediante el cruce de dos rayos de luz a través de dicho punto (Modificado de Birch, 2006).

### **3.1.2 Mapeo digital 3D en la mina El Teniente**

El Mapeo digital 3D de labores es una aplicación directa del ‘Sistema de Fotogrametría Digital en desarrollos subterráneos’ implementado en la mina El Teniente durante diciembre del año 2011.

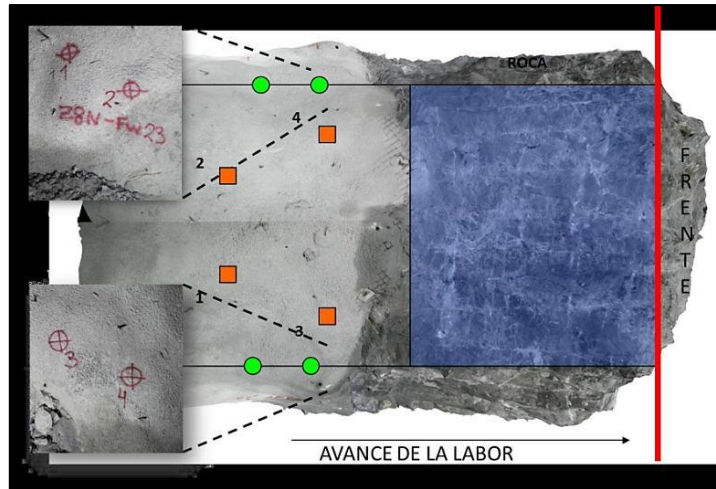
Antes de la implementación de este sistema se contaba solo con levantamiento de información geológica en las labores. Esta información se redujo desde un 95% a un 30-50% entre los años 2006 al 2011 debido a la instalación masiva de “*shotcrete* a la frente” y a la disminución del número de geólogos disponibles por sector. A raíz de esto se llegó a realizar el levantamiento geológico a un 30-50% del total de las labores horizontales disponibles lo que conllevó a que la información se encontrara segmentada. Esto sumado a la imprecisión en el levantamiento de datos debido al mapeo a distancia (por razones de seguridad), llevaron a la necesidad de implementar este sistema (*3DM Analyst System* – El Teniente, 2011).

Las virtudes del mapeo digital se centran en el detalle alcanzado en el levantamiento de información y en la mayor cantidad de datos que pueden ser tomados en menor tiempo, además de complementar la información levantada por geólogos en la mina y de remediar el problema de la información segmentada ya antes mencionado.

### **3.1.3 Modelo Digital de Terreno (*Digital Terrain Model*)**

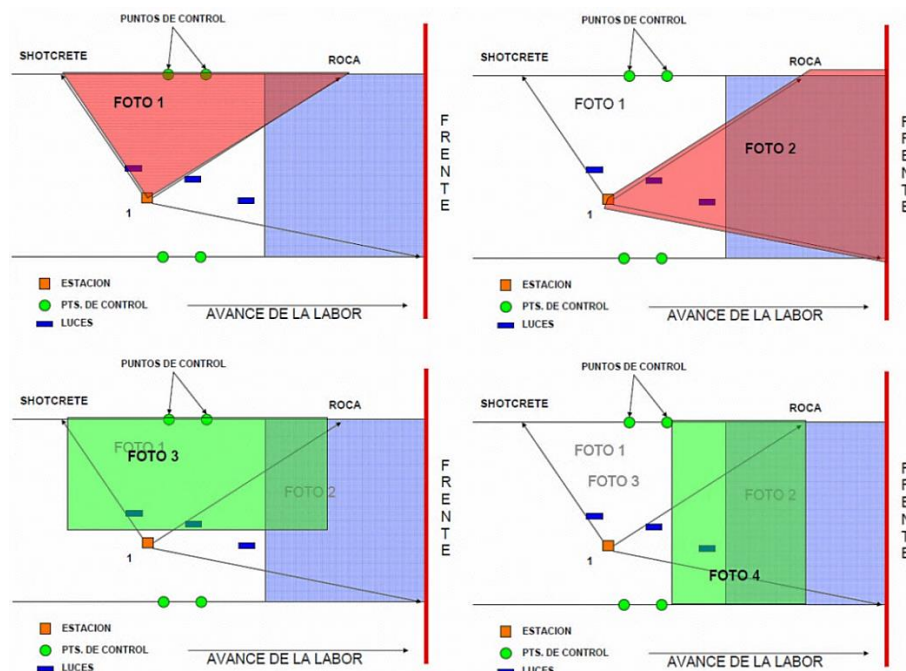
Un modelo digital de terreno (DTM en sus siglas en inglés) corresponde a la superposición de 16 fotografías digitales para obtener un modelo 3D aplicando los principios de la fotogrametría. Para obtener estos modelos o DTM, en la mina El Teniente, se siguen una serie de etapas, las cuales se tratan brevemente a continuación:

1. El primer paso consiste en tomar las fotografías en terreno. Para comenzar, es necesario marcar 4 puntos de control en las paredes de la galería para de este modo obtener imágenes del frente minero georeferenciadas en el espacio y luego poder hacer coincidir estos puntos de control. Esta tarea es realizada por personal del equipo topográfico. La Figura 3.3 muestra los puntos de control en una galería vista en planta.



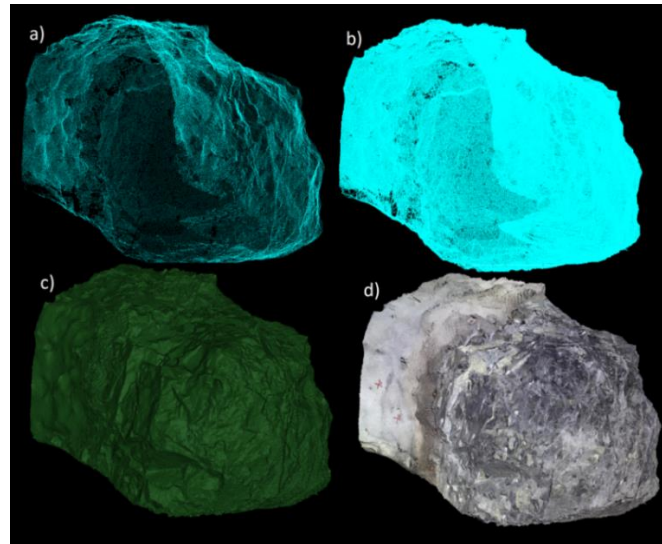
**Figura 3.3** Esquema del frente minero en planta, junto con la configuración de la ubicación de los puntos de control de terreno y las estaciones de fotografías (Modificado de Benado et al, 2010).

2. Una vez determinados los puntos de control se posicionan las cuatro estaciones, en las cuales se toman cuatro fotografías superpuestas. Así se obtienen las 16 fotografías traslapadas por avance (ver la Figura 3.4).

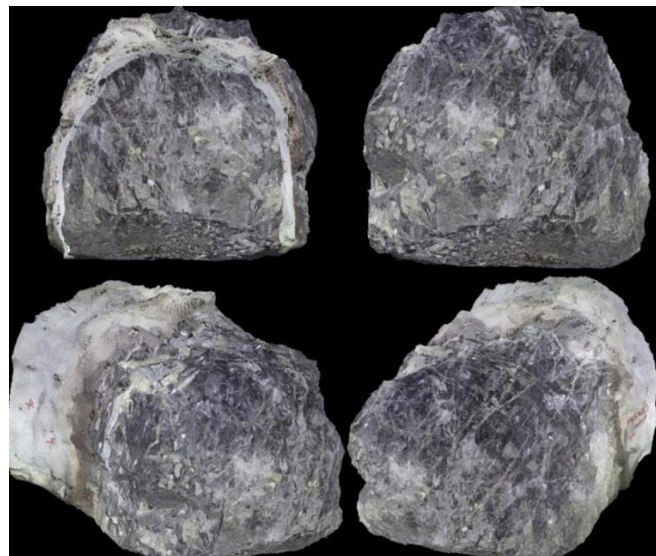


**Figura 3.4** Esquema de toma de fotografías de un frente minero (vista en planta). Cuatro fotografías superpuestas obtenidas desde una estación de captura de fotografías (estación 1) (Modificado de 3DM Adams Analyst System – El teniente, 2011).

3. Para procesar las fotografías se utiliza el sistema de fotogrametría digital *3DM Analyst* de la empresa *Adam Technology*, implementado en la Mina El Teniente. El sistema consta de dos módulos: *3DM Calibcam* y *3DM Analyst*. El primero se utiliza para calibrar la cámara y generar los DTM, que corresponde a una nube de puntos georeferenciados entre sí con una imagen 3D asociada (ver la Figura 3.5). El segundo módulo permite la manipulación del DTM (ver la Figura 3.6) y levantamiento de información geológica de interés (Benado *et al.*, 2010).



**Figura 3.5** Generación de Modelo digital de Terreno (DTM). a) Nube de puntos. b) Malla triangular. c) Superficie. d) Superposición de fotografías (Imágenes confeccionadas en *3DM Analyst*).



**Figura 3.6** Modelo Digital de terreno (DTM 7872 sector Esmeralda) de labor minera visto desde diferentes direcciones en *3DM Analyst* (Imágenes confeccionadas en *3DM Analyst*).

## 3.2 Adquisición de Datos

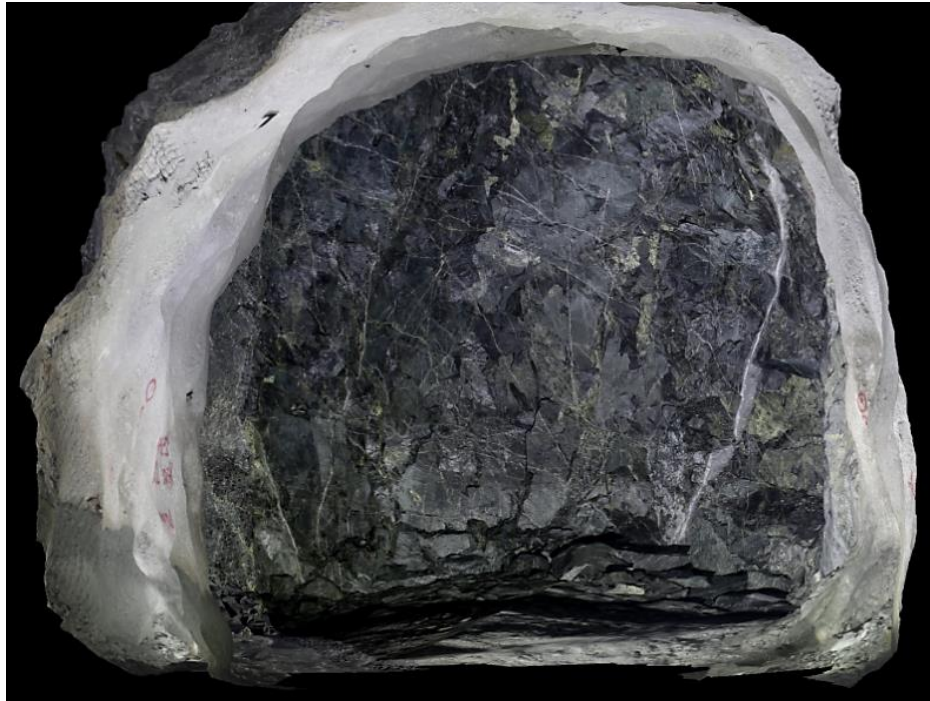
### 3.2.1 Selección de modelos digitales de terreno o DTM's

Para llevar a cabo el levantamiento y/o mapeo de estructuras geológicas se procedió por etapas. La primera consistió en la selección de los modelos digitales de terreno (DTM) de diferentes sectores de la mina. Esto se llevó a cabo con énfasis en los sectores Esmeralda (tanto del sector Hw “Cabeza”, al oeste, como del Fw “Patilla”, al este) y Reservas Norte (RENO) de la mina. En el caso del sector Esmeralda, se procedió de esta manera ya que existen evidencias descriptivas de que el *stockwork* observado posee características geométricas distintas para ambos sectores. Además, la selección de estos DTM's se desarrolló con énfasis en los niveles de Reservas Norte (Reno) Producción y Esmeralda Producción, aunque, debido a la calidad, también se incluyeron algunos DTM's del nivel de Transporte.

Para asegurar una cantidad de datos que genere buenos resultados se le dio prioridad al mapeo de labores con litología tipo CMET (Complejo Máfico El Teniente), ya que estos poseen, en general, una cantidad considerable de estructuras (necesario para obtener buenos ajustes a distribuciones probabilísticas de tamaños) y, además, el contraste entre el color de la roca CMET y el color del relleno del *stockwork* asegura la identificación de estructuras y un mapeo relativamente sencillo, no así para otras litologías presentes en la mina en donde el mapeo se complejiza debido al bajo contraste de colores entre litología y el relleno de vetillas. Un DTM cuya litología corresponde al CMET se puede observar en la Figura 3.7.

El principal criterio de selección fue la calidad del DTM. En la división se maneja una clasificación de la calidad basada en tres categorías: buena, regular y mala. Además, se reconocen una serie de posibles problemas que podrían presentar los DTM's, los cuales son: polvo, agujeros, humedad, sombra, cambio de luz y/o mala resolución. Algunos de los DTM mapeados y su caracterización de calidad se incluyen en la 'Estadística ADAMS 2012-2014' facilitada por la División. Además, es posible generar listados actualizados de los DTM construidos a partir de la base de datos disponible en una plataforma web destinada para este objetivo. Luego se seleccionaron, preliminarmente desde ambas fuentes, los DTM que se clasificaron con calidad óptima y/o buena en los listados, de litología CMET, que no presentaban problemas y que estuviesen construidos completamente (ver la Figura 3.7).



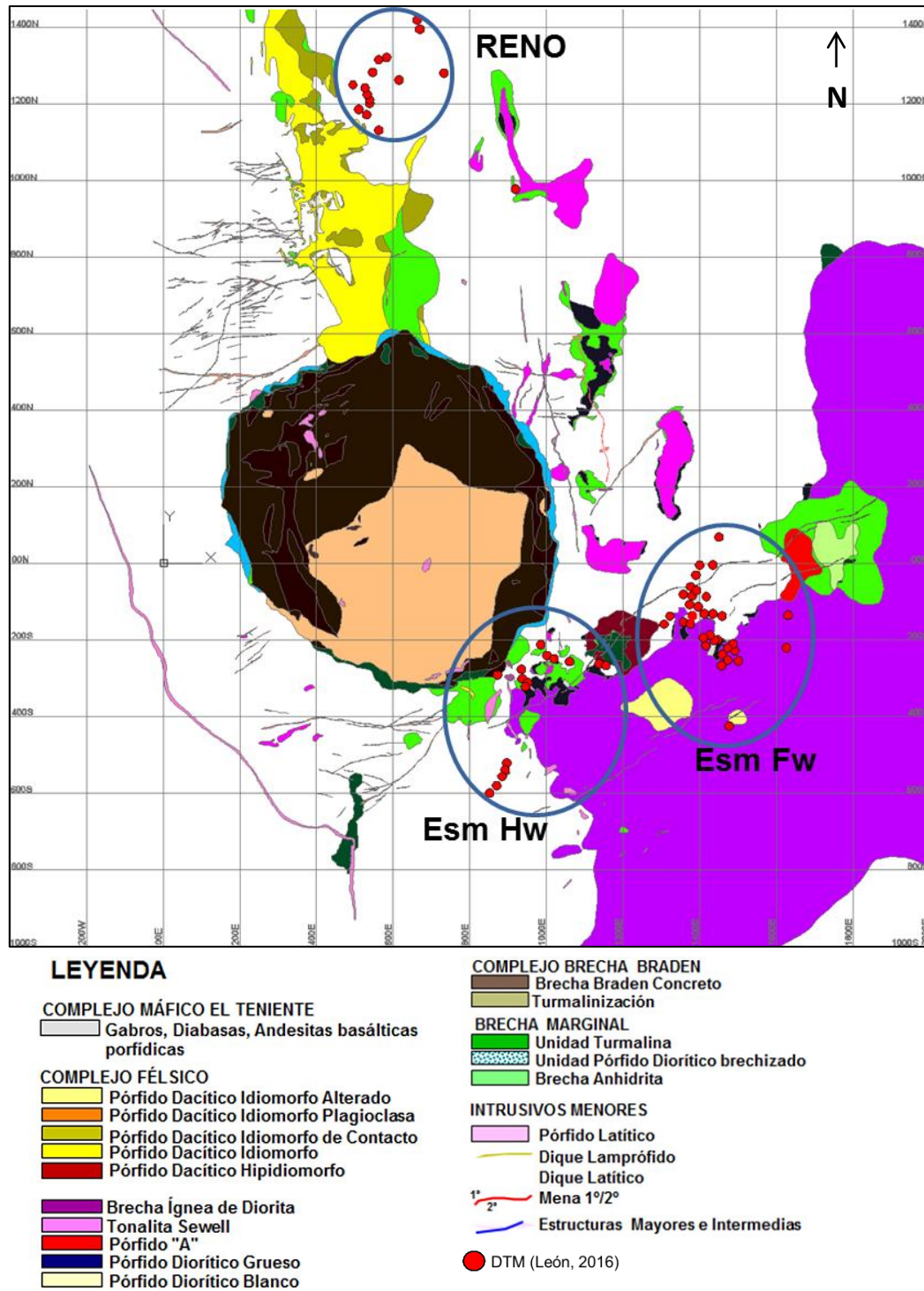


**Figura 3.7** Modelo Digital de terreno DTM 4909 – Esmeralda. DTM de calidad óptima. Se puede observar la litología correspondiente al CMET (Complejo Máfico El Teniente) y el claro contraste entre la matriz rocosa y el relleno de la estructuras (3DM Analyst).

### 3.2.2 Ubicación de los DTM mapeados

La Figura 3.8 a continuación muestra un mapa litológico de la mina en donde se destaca la distribución de los DTM's mapeados (puntos rojos) en este trabajo, en los sectores de la mina Reservas Norte - RENO (al norte, parte superior de la Figura 3.8) y Esmeralda (al sur, parte inferior de la 3.8 Figura).

La campaña de mapeo de DTM llevada a cabo en el marco de este estudio y realizada por el autor de este trabajo comprendió la revisión y evaluación de aproximadamente 600 DTM y la selección de 71 de estos bajo los criterios de calidad y litológico, de los cuales 53 corresponden a DTM extraídos de ambos sectores de la mina Esmeralda y los 18 restantes corresponden a la mina RENO. Se levantaron un total de 4822 estructuras (3852 en mina Esmeralda, 970 en mina RENO). Es relevante destacar que los puntos de extracción de información estructural están contenidos en la litología CMET (Complejo Máfico El Teniente), y tan solo cuatro corresponden a la litología Tonalita (Esmeralda Fw).



**Figura 3.8** Mapa litológico de la mina junto a la ubicación de los DTM mapeados (puntos rojos). Al norte, DTM mina RENO. Al sur, DTM mina Esmeralda Hw (a la izquierda), DTM mina Esmeralda Fw (a la derecha).

### 3.2.3 Mapeo de estructuras en DTM

Del mapeo de fotografías 3D se puede obtener información tanto cualitativa como cuantitativa de los frentes en desarrollo. El levantamiento de información estructural se llevó a cabo mediante las herramientas disponibles en el *software* 3DM *Analyst* de *Adam Technology*, el cual corresponde a una plataforma que permite manipular los DTM en tres dimensiones y digitalizar las estructuras a partir de sus trazas visibles en los afloramientos fotografiados.

Las estructuras levantadas corresponden a las vetillas que forman parte del *stockwork* observado en las galerías de la mina El Teniente, un ejemplo de este *stockwork* se observa en la imagen de la Figura 3.9. El *software* 3DM *Analyst* permite hacer un reconocimiento a grandes rasgos de la naturaleza genética de las vetillas, clasificándolas según el estándar propio de la División. Además, con la práctica y conocimiento de mapeo de interior mina, es posible llegar a reconocer algunos de los rellenos minerales de las vetillas como anhidrita, yeso, cuarzo, carbonatos, y algunos sulfuros como piritita, calcopiritita y bornita, molibdenita, etc., aunque esto escapa de los alcances de este estudio.



**Figura 3.9** Fotografía del enrejado de vetillas (*stockwork*) característico del macizo rocoso de la mina El Teniente en roca CMET (Complejo Máfico El Teniente) (Brzovic, 2005). Este tipo de enrejados corresponde a la fuente de información básica de este estudio.

Respecto a las litologías, si la calidad del DTM lo permite, se pueden reconocer las principales aunque solo haciendo una clasificación general, sin entrar en detalle en los aspectos petrográficos.

Este estudio se centra en el uso de la información geométrica cualitativa disponible en los DTM por lo cual todo tipo de vetillas observadas en el *stockwork* fueron mapeadas, sin hacer distinciones genéticas ni de relleno mineralógico. Dado que las fallas son consideradas de manera determinística en los modelos, este trabajo no consideró su levantamiento.

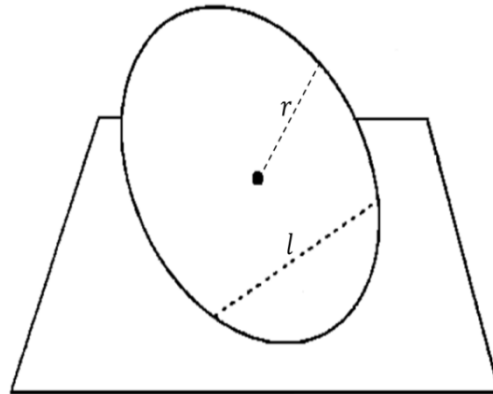
La información de carácter geométrico-estructural que se puede extraer de las fotografías 3D mediante el uso de las herramientas del *software* 3DM *Analyst*, corresponde a:

- Posición: correspondiente a un punto georeferenciado en el espacio que se identifica con el centro de un círculo mapeado y con coordenadas X, Y y Z (ver la Figura 3.10).
- Orientación (*Dip/DipDirection*): mediante el mapeo de las trazas de estructuras de la galería a partir de círculos que las contienen parcialmente (ver la Figura 3.11 a).
- Tamaño: asociado al radio del círculo mapeado (este radio es un equivalente al tamaño, considerando a las estructuras como discos planos finitos). Esta propiedad corresponde a uno de los principales *inputs* en la metodología presentada en este estudio (ver las Figuras 3.10 y 3.11a).
- Largo de traza: mediante el mapeo de polilíneas sobre las trazas de las estructuras contenidas en el DTM. Las trazas reales (ver Figura 3.11a) no siempre coinciden con la traza definida por el círculo mapeado, ya que una traza no es plana como sí lo es un círculo, es decir, una traza no está necesariamente contenida en un plano. Para los alcances de este trabajo se considera que la “cuerda” definida por una estructura circular plana al ser proyectado a un plano, es una buena aproximación de la traza de la misma (ver Figura 3.10).
- Rugosidad: mediante la extracción de la información morfológica de estructuras con superficies expuestas recortadas de los DTM, llevado a cabo con la metodología propuesta por Díaz (2013).

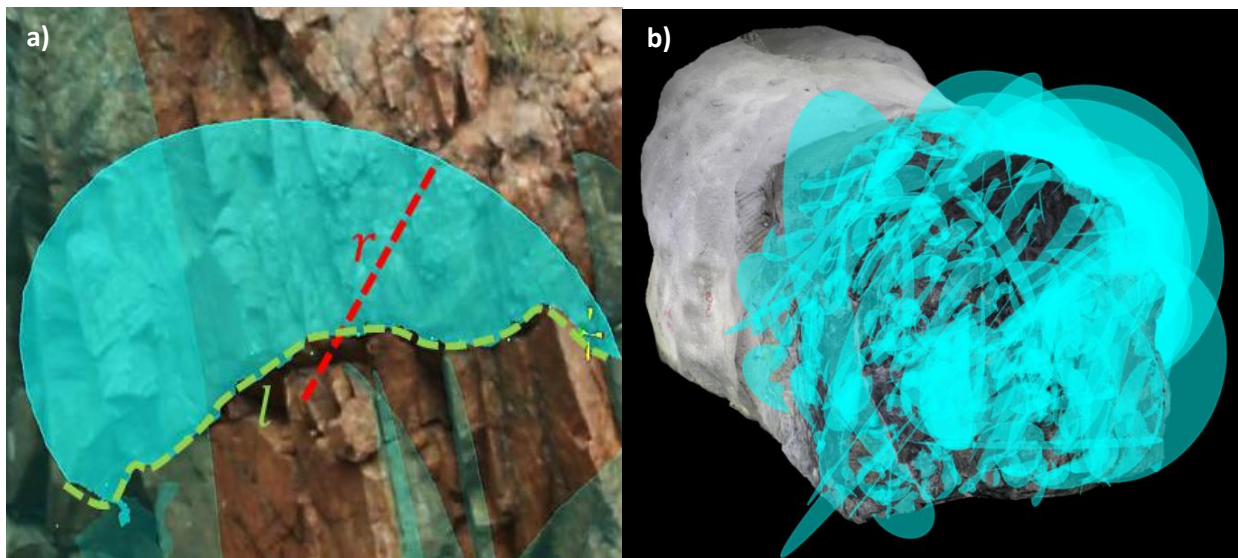
Para este trabajo se recopiló la información de las tres primeras propiedades de las listadas anteriormente. El módulo 3DM *Analyst* contiene herramientas que permiten abrir y manipular el Modelo Digital de Terreno (DTM), mapear las estructuras y exportar las propiedades de estas a otras plataformas o *softwares*. La Figura 3.11a muestra el proceso de



digitalización de una estructura mediante un círculo a partir del ingreso de puntos sobre su traza observada, y la Figura 3.11b muestra el DTM 4909 de la mina Esmeralda Hw con un total de 543 estructuras digitalizadas por el autor de este trabajo en *3DM Analyst*.



**Figura 3.10** Relación utilizada en este estudio entre el Tamaño (radio de un círculo) y el Largo de traza de una estructura (recta contenida en un plano, definida como una cuerda de un círculo producto de la intersección de la estructura circular con un plano). El punto central del círculo corresponde al dato de Posición. Esquema tomado de Birch (2006).



**Figura 3.11** a) Estructura digitalizada mediante un círculo a partir de puntos, diferencia entre las propiedades largo de traza y tamaño (Modificado de Birch, 2006). b) Estructuras mapeadas en el DTM 4909 (sector Esmeralda Hw, nivel Transporte).

En la mina El Teniente se observan estructuras selladas y, producto de las labores mineras también se observan estructuras abiertas con superficie expuesta, ambos tipos son útiles al momento de levantar la información respecto a la orientación y largos de traza de las estructuras, así que ambos tipos fueron mapeados.

En la sección 'ANEXO D: DTM's seleccionados en el marco de este estudio' se puede ver el detalle de los DTM escogidos, sector de la mina al que pertenecen, ubicación, y el número de estructuras levantadas en cada uno.

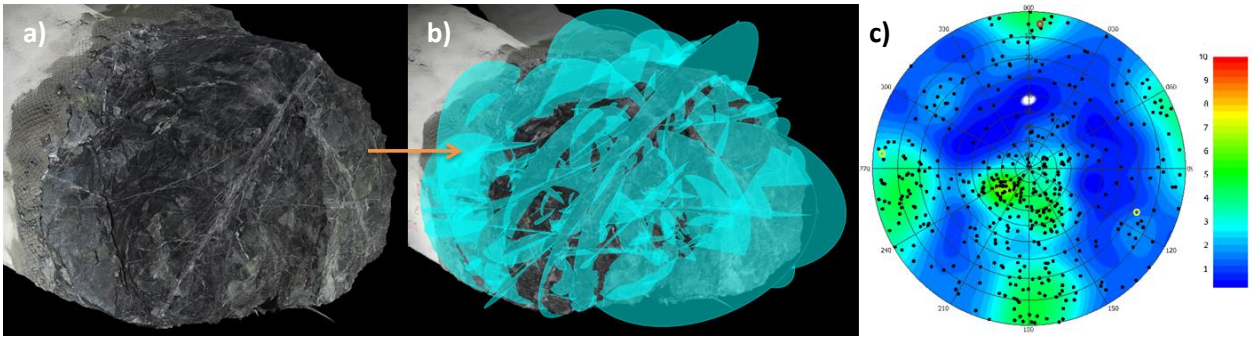
### **3.2.4 Levantamiento de orientaciones de discontinuidades**

La orientación de una discontinuidad en el espacio se refiere al rumbo y manto del plano de la estructura medido con respecto a la horizontal y respecto al norte, respectivamente. Como propiedad geométrica es importante ya que es un indicador de la anisotropía propia del fracturamiento del macizo rocoso.

Generalmente, su medición se hace mediante el uso de la brújula durante el mapeo presencial en el interior de la mina que hace el geólogo de la división, lo que está sujeto a errores de precisión debido a la distancia que debe mantener el geólogo al frente en desarrollo por razones de seguridad.

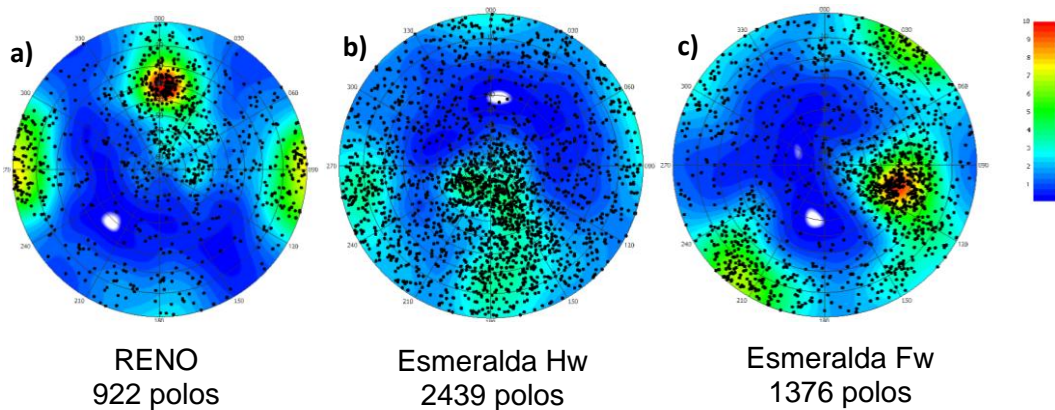
La aplicación de la fotogrametría digital en *3DM Analyst* permite realizar esta tarea automáticamente al efectuar el levantamiento de una estructura. Este levantamiento es llevado a cabo por el usuario ingresando una serie de puntos que coinciden con la traza de la discontinuidad (vetillas, en este estudio) a mapear (ver Figura 3.11a). Debido a las irregularidades de la superficie del afloramiento rocoso, no es necesario que la estructura posea una superficie abierta, dado que la relación entre la traza y dichas irregularidades de la superficie del afloramiento definen la orientación. Por lo tanto, estructuras selladas como abiertas fueron mapeadas para obtener el dato de orientación. A partir de los puntos digitalizados en las trazas, el *software* interpola el plano circular georeferenciado más ajustado, con una posición y orientación determinadas. Esto conlleva a que la certeza del dato de orientación obtenido a partir del mapeo digital sea alta y lo suficientemente confiable, reduciendo los sesgos en el mapeo de orientaciones propio del mapeo interior mina (ver 'ANEXO A.1 Sesgos en el levantamiento de orientaciones'). En la Figura 3.12 se observa un

mapeo de estructuras detallado en el DTM 3476 completo y el *stereonet* con los respectivos polos de las estructuras mapeadas.



**Figura 3.12** a) DTM 3476 del sector Esmeralda – nivel Transporte, b) 433 estructuras mapeadas en 3DM Analyst, c) *stereonet* con los 433 polos pertenecientes a las estructuras mapeadas.

Todos los polos de las orientaciones levantadas en el marco de este estudio se pueden observar en los *stereonets* de la Figura 3.13, separados por sector de la mina analizado (RENO, Esmeralda Hw y Esmeralda Fw), se incluye el número de estructuras mapeadas por sector.



**Figura 3.13** *Stereonets* con el número de polos de orientaciones de las estructuras mapeadas en este estudio. a) Reno, b) Esmeralda Hw, c) Esmeralda Fw.

### 3.2.5 Levantamiento del largo de traza de estructuras

Persistencia es un término usado para describir el tamaño de una discontinuidad dentro de un plano, lo cual puede ser descrito con la observación del largo de la traza de la discontinuidad expuesto en el afloramiento (Zhang, 2006). El ISRM (1978) usa la longitud de traza modal de cada set de discontinuidades medidas en la roca expuesta para clasificar la persistencia de acuerdo a la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Clasificación de la persistencia de las discontinuidades (ISRM, 1981).

Descripción	Longitud de traza modal (m)
Persistencia muy baja	< 1
Persistencia baja	1 – 3
Persistencia media	3 – 10
Persistencia alta	10 – 20
Persistencia muy alta	> 20

La persistencia o largo de traza de las discontinuidades es uno de los parámetros más importantes en la descripción del macizo rocoso pero uno de los más difíciles de determinar, y tiene una gran influencia en la resistencia al cizalle desarrollado en el plano de éstas (Zhang, 2006). Debido a que en la mayoría de los casos la superficie de la discontinuidad no está expuesta, no es posible medir la persistencia en la dirección del manto y se debe trabajar con el largo de traza según un buzamiento aparente (Gonzalez de Vallejo, 2002).

En el Teniente se ha elaborado una descripción propia respecto a la extensión de la traza de las vetillas, subdividiéndola en 3 clases (Brzovic, 2001), estas se detallan en la Tabla 3.2.



**Tabla 3.2** Clasificación de vetillas en El Teniente según la extensión de la traza mapeada observada (Brzovic, 2001).

Descripción	Largo	Espesor	Observaciones
Vetillas mayores	Abarcan el ancho de al menos dos labores.	Hasta 200 mm. Típicamente 5 a 25 mm.	Usualmente vetillas HT o HP.
Vetillas intermedias	Cruzan una labor.	Hasta 50 mm. Típicamente 1 a 10 mm.	HT, HP o TM.
Vetillas menores	No alcanzan a cruzar una labor.	Menores a 10 mm.	HT, HP o TM.

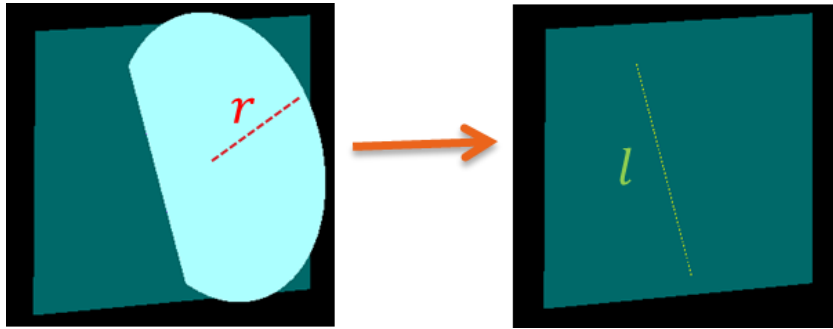
Para poder definir la distribución de tamaños – una propiedad 3D definida sobre el plano de la discontinuidad – contamos solo con la información del largo de traza de la discontinuidad, lo que es una propiedad 2D definida en un plano. Lograr establecer esta relación (uno de los objetivos centrales de este trabajo) depende de muchas variables y está sujeta a bastantes fuentes de sesgos que dificultan el análisis, y que tienen que ver con limitaciones propias de la observación (ver ‘ANEXO A.2 Sesgos en el levantamiento de largos de trazas y/o tamaños’).

### 3.2.6 Tamaño o radio equivalente de estructuras

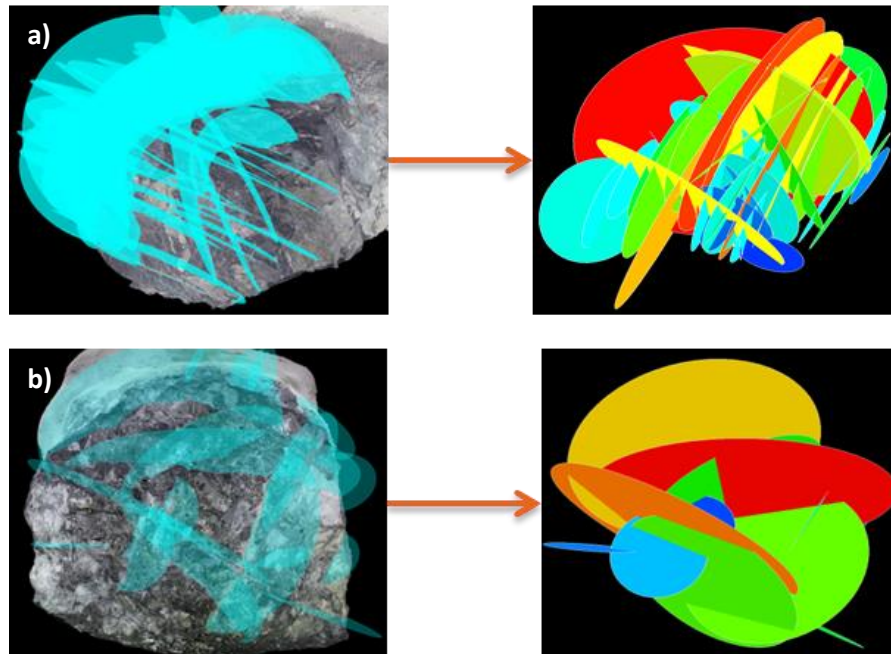
Al levantar las estructuras mapeables presentes en un DTM en 3DM *Analyst* se observaron diferencias grandes en la cantidad de estructuras levantadas entre un caso y otro (dados los ya mencionados posibles problemas de calidad presentes en los DTM), por lo cual se optó por diseñar un sistema de mapeo que pudiese ser representativo y que considerara los sesgos presentes al abordar este trabajo. El sistema consistió en mapear cada DTM a partir de un largo mínimo de traza que estuviese bien representado, así pudiese ser considerado el sesgo por truncamiento (ver ‘ANEXO A.2 Sesgos en el levantamiento de largos de trazas y/o tamaños’).

Como la variable manejada por el usuario (la usada en este trabajo) al mapear en 3DM *Analyst* es el tamaño o el radio equivalente de la discontinuidad (vetilla) no el largo de traza (se controla una propiedad 3D no una 2D), se establece la necesidad de truncar por ‘tamaño mínimo mapeado’ (se considera que el tamaño mapeado es un estado previo a ser expresado

como largo de traza, ver Figura 3.14). Así mismo, para facilitar el trabajo se presentan los datos levantados en función del radio equivalente mínimo mapeado, aproximando la forma de la estructura a un círculo plano finito. La Figura 3.15 muestra dos DTM mapeados a partir de un mismo radio equivalente mínimo.

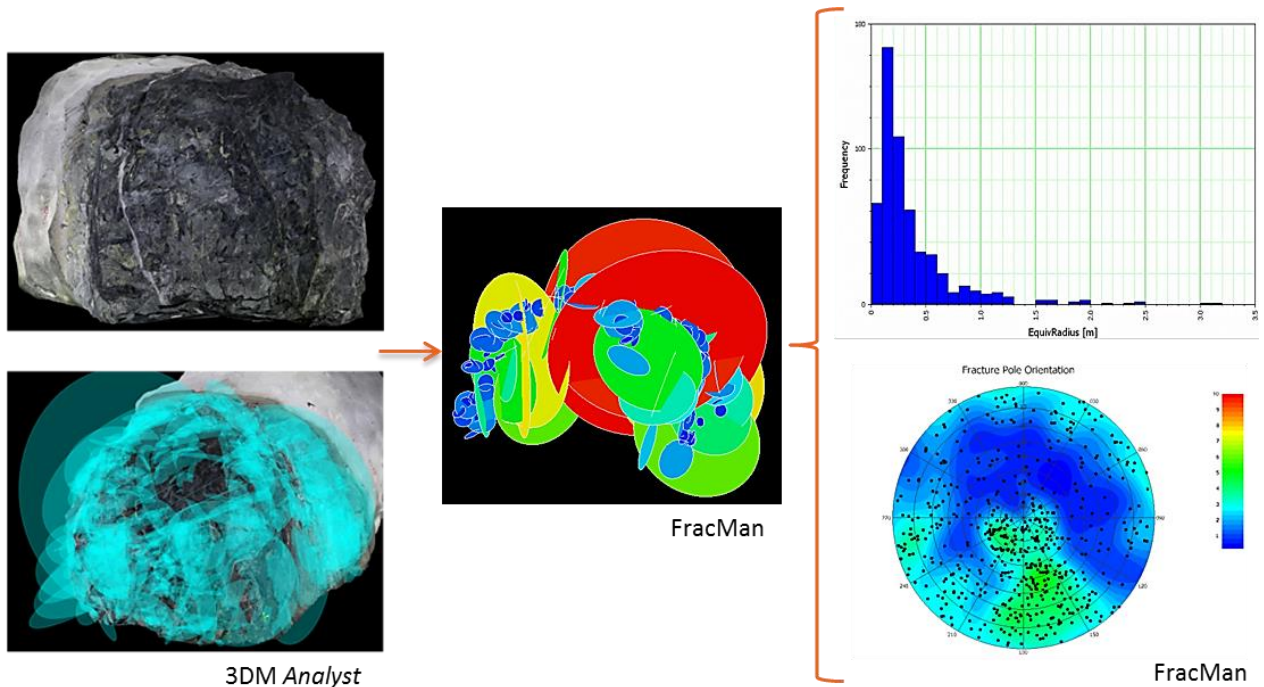


**Figura 3.14** Relación tamaño-largo de traza. En este estudio se levantan las estructuras mediante círculos que definen un radio el cual se expresa como un largo de traza al intersectar el círculo con un plano determinado (Imagen obtenida de FracMan).



**Figura 3.15** Dos DTM mapeados a partir de tamaño mínimo de radio 1 m. a) DTM 7511 (Esmeralda Fw), b) DTM 7441 (Esmeralda Hw). A la izquierda, estructuras en 3DM Analyst. A la derecha, estructuras en FracMan (Esquema confeccionado en 3DM Analyst y FracMan).

Definidas y comprendidas las fuentes de sesgo posibles, el trabajo consistió en cuidar que el levantamiento estructural de las trazas de estructuras de la mina se pueda realizar disminuyendo los errores y sesgos al mínimo, aplicando el mapeo truncado por tamaño mínimo de estructuras, y representando las estructuras como discos planos finitos. Luego, este método de mapeo permite obtener la información orientaciones y tamaños de las estructuras para ser utilizadas en los ajustes de los parámetros necesarios para definir Modelos Estocásticos del Arreglo Estructural. La Figura 3.16 muestra un esquema de la información de mapeada para un DTM específico.



**Figura 3.16** Esquema que muestra el levantamiento estructural en 3D Analyst para el DTM 4909, el traspaso de información al software simulador FracMan y un resumen de la información de tamaños y orientaciones mapeados obtenida (Esquema confeccionado en 3D Analyst y FracMan).

## CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO DEL ARREGLO ESTRUCTURAL O DFN.

El Presente capítulo se centra en las etapas 3 y 4 mencionadas en el diagrama de la Figura 3.1 presentada en el Capítulo 3. Estas etapas corresponden a: el método que permite construir un Modelo Discreto del Arreglo Estructural y al método que conduce a la extrapolación de los resultados obtenidos de la aplicación de esta metodología.

### 4.1 Concepto de DFN (*Discrete Fracture Network*)

Un modelo estocástico o probabilístico es aquel que está definido a través de parámetros descritos mediante distribuciones probabilísticas conocidas y definidas. Un modelo estocástico del arreglo estructural, por lo tanto, es aquel que se construye en base a variables aleatorias de parámetros geológicos-geométricos, cada una de ellas definidas mediante una forma de distribución de probabilidad y parámetros determinados.

Un 'arreglo estructural discreto del macizo rocoso' o *Discrete Fracture Network* (DFN) es un método estocástico de simulación de fracturas el cual permite la generación en tres dimensiones de fracturas probabilísticamente simuladas. Estos pueden producir modelos realistas, estocásticamente similares a los datos observados, basados en limitados datos de campo. Los modelos DFN tratan de describir la naturaleza heterogénea del macizo rocoso, representando características como la forma, tamaño y orientación de sets de fracturas usando funciones de distribución de probabilidad (Dershowitz & Einstein, 1988).

En este estudio, los parámetros necesarios para la construcción de un DFN son obtenidos de los datos estructurales levantados en DTM's pertenecientes a las galerías de las minas Esmeralda y RENO del yacimiento El Teniente (ver Tabla 4.1), aspectos revisados en el Capítulo 3 de este trabajo.

La plataforma utilizada para generar los DFN corresponde al *software* FracMan desarrollado por *Golder Associates* (Dershowitz *et al.*, 1998). Este *software* corresponde a un simulador de estructuras geológicas utilizado para determinación de los parámetros que definen los DFN, es decir, los parámetros de Orientación, Tamaño de estructura e Intensidad de

Fracturamiento  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ). Otros parámetros se pueden considerar al momento de definir un DFN dependiendo de los fines con que se lleven a cabo los análisis, como por ejemplo, el parámetro Porcentaje de estructuras con extremos visibles o Porcentaje de terminación.

**Tabla 4.1** Datos estructurales mapeados y parámetros derivados necesarios para un modelo estocástico o DFN (Modificado de Staub et al, 2002). En negrita la fuente de los datos en este estudio.

Dato estructural	Fuente	Parámetro DFN
Orientación de fractura ( <i>Dip/Dipdirection</i> )	Sondajes, afloramientos, <b>túneles</b>	Sets de fracturas, orientación de fracturas en cada set
Largo de traza	<b>Túneles</b> , afloramientos, lineamientos	Tamaño de distribución
Intensidad de fractura	Sondajes, líneas de mapeo ( $P_{10}$ ), <b>afloramientos (<math>P_{21}</math>)</b>	Intensidad de fracturas ( $P_{21}$ o $P_{32}$ )

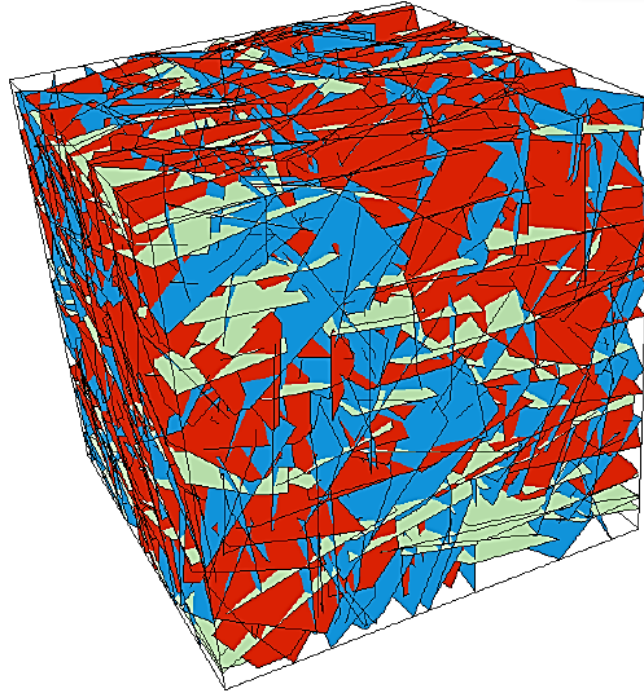
La construcción de estos modelos se basa en realizaciones o iteraciones simuladas que asumen distribuciones de probabilidad para los parámetros en cuestión. Así, tras generar una cantidad elevada de iteraciones discretas se determina un valor simulado que coincida con el dato observado.

Para la construcción de estos modelos, el *software* se basa en algunas ecuaciones fundamentales, que asumen que las estructuras cumplen con un Proceso de Poisson Volumétrico, y que éstas en el modelo sean planas y de forma circular (Herrera, 2012). En el marco de este estudio, esto coincide con el tratamiento que se les da a las estructuras al ser mapeadas en *3DM Analyst*, ya que al ser levantadas se consideran como círculos planos con un tamaño determinado por el radio del círculo. Luego, en este punto hay consistencia entre el dato *input* y el valor *output*.

Cabe destacar que cada iteración de estos modelos, al ser de naturaleza estocástica, tiene infinitos posibles resultados discretos para el arreglo estructural (considerando parámetros constantes para las iteraciones). Pese a esto, los resultados obtenidos de un gran número de realizaciones o iteraciones provee la mejor opción para crear modelos de fracturamiento realistas (Elmo, 2006). Un Modelo DFN se presenta en la Figura 4.1.

Un DFN permite tener una mejor representación del arreglo estructural observado, y uno definido para una galería en particular permite obtener valiosa información del arreglo

estructural de la periferia del túnel en cuestión. El conocimiento de la geometría del *stockwork* de la galería mediante métodos probabilísticos posee aplicaciones tanto geológicas como geotécnicas.



**Figura 4.1** Ejemplo de un DFN (Digital Fracture Network) generado en FracMan (Tomado de Golder Associates Ltd., 2011)

## 4.2 Proceso de Poisson

El proceso de Poisson es un proceso estocástico que consiste en contar eventos complejos. Este proceso propone que todas las estructuras o puntos en un espacio (volumétrico) son independientes entre sí, ósea, se encuentran dispuestas aleatoriamente en el espacio. Es un proceso puntual que da una buena descripción de variados procesos naturales debido a que es el proceso estocástico más aleatorio, por lo tanto, entre más complejo sea el proceso, será modelado más cercano al Proceso de Poisson.

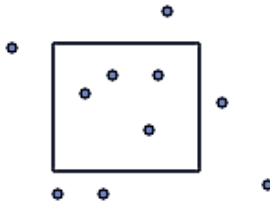
Entre sus características destacan ser estacionario, simple e independiente en todos los puntos del espacio. Las dos últimas características son fundamentales para definir un proceso aleatorio como Proceso de Poisson Volumétrico (tomado de apuntes de Padilla, 2001). La primera característica no es indispensable para definir un Proceso de Poisson, pero en el caso que ocupa a este estudio se cumple debido a la naturaleza misma del problema geológico.

Asumir un proceso de Poisson Volumétrico para describir la geometría del arreglo estructural no es correcto geológicamente ya que los procesos de fracturamiento son determinísticos y se deben a la mecánica y fallamiento de las rocas. No obstante, asumir que este proceso es aleatorio permite utilizar una solución matemática para definir los arreglos estructurales en un volumen determinado (Herrera, 2012).

Matemáticamente, la distribución probabilidad de Poisson  $X$ , que representa el número de sucesos en un intervalo o en una región específica 't' (ver Figura 4.2), se representa como:

$$f(x) = \frac{e^{-\lambda}(\lambda t)^x}{x!}$$

donde  $\lambda$  es el promedio de sucesos por unidad de la región (distancia, área o volumen) y  $X$  es la variable aleatoria que representa la distancia entre conteos sucesivos de un Proceso de Poisson con media  $\lambda > 0$ .



**Figura 4.2** Proceso de Poisson, datos en una región (tomado de apuntes de Padilla, 2001).

### 4.3 Parámetros estadísticos necesarios para definir un DFN.

Los modelos estocásticos construidos en este estudio necesitan de tres parámetros para ser definidos: Distribución de Orientación, Distribución de Tamaño de estructuras e Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ .

Lo primero que se debe asegurar es que los datos de orientaciones simulados sean similares a los datos levantados en los DTM. Luego, la distribución de tamaño debe ser tal que genere trazas que representen a las trazas observadas en las galerías de las minas Esmeralda y RENO, esto mediante la intersección de un mismo plano determinado con las estructuras mapeadas y simuladas. Por último, se deben utilizar los valores de Intensidad de Fracturamiento 2D  $P_{21}(\text{m}/\text{m}^2)$  de cada galería para ajustar el valor de Intensidad de







#### 4.4 Simulación de Orientación en modelos estocásticos.

Las simulaciones de la orientación se llevan a cabo a partir de las orientaciones mapeadas contenidas en la superficie de un DTM. Para facilitar la interpretación, a menudo se supone que los datos de orientación siguen alguna distribución de probabilidad estándar. La más usada comúnmente es la distribución de Fisher ya que es análoga a la distribución normal y por la facilidad al derivar sus parámetros a partir de los datos de campo (Staub *et al.*, 2002). Una distribución de probabilidad de Fisher modela la distribución de vectores de orientación 3D como la distribución de vectores de polos en una esfera (Fisher, 1953). La función de probabilidad de Fisher puede ser expresada como

$$f(\theta) = \frac{k \sin(\theta) e^{k \cos(\theta)}}{e^k - e^{-k}}$$

donde  $\theta$  es la desviación angular al vector promedio, en grados, y  $k$  es el factor de dispersión. Este último factor describe la proximidad o dispersión de un grupo de orientaciones respecto a un polo (Fisher, 1953).

FracMan permite establecer un valor para el factor  $k$  para abordar las simulaciones. Para conocerlo es necesario agrupar sets estructurales y calcularlo mediante una expresión sencilla. En este estudio, la cantidad limitada de datos de orientaciones extraídos de los DTM, al truncar sucesivamente los mapeos por tamaño de corte mínimo, no permite establecer bien estos sets por lo que no siempre fue viable realizar el cálculo de dicho factor a partir de los mapeos. Luego de realizar pruebas, se determinó que el valor que FracMan asigna por defecto para el factor  $k$  ( $k = 80$ ) arroja buenos resultados en las simulaciones. Luego, en este trabajo se utilizó este valor por defecto.

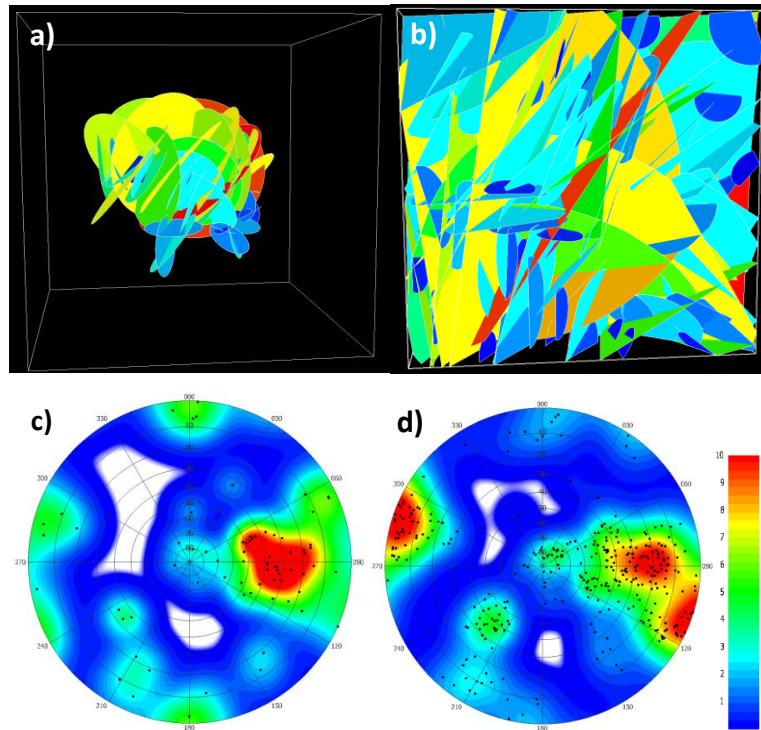
En la práctica, la mayoría de las metodologías de selección de sets establecen la suposición de que los datos deben seguir un tipo de distribución conocida a priori. En el caso de que ninguna distribución analítica puede representar los datos de orientación de discontinuidad, se pueden utilizar distribuciones empíricas (Zhang, 2006).

#### 4.4.1 Simulación de la orientación – Método del *Bootstrapping*

El *Bootstrapping* (o *bootstrap*) es un método de remuestreo propuesto por Efron (1979). Está basado en el muestreo aleatorio múltiple con reemplazo desde la muestra original para crear una muestra pseudo-replicada de datos simulados (en este caso, orientaciones). El *bootstrapping* estima inductivamente la forma de la distribución muestral de los datos simulados, a diferencia de una distribución teórica asumida a priori, que es lo que comúnmente se ocupa en la estadística clásica (Gil, 2005). El *bootstrapping* es básicamente usar los datos mapeados para producir una población de fracturas similar pero ligeramente diferente (tomado de *Golder Associates Ltd*, 2008). De esta manera, es posible construir una distribución empírica de la orientación, en la que se simulan un número elevado de muestras aleatorias creadas a partir de las orientaciones originales.

El uso de este método es recomendable cuando los datos de orientación son altamente dispersos y la definición de sets de fracturas es compleja. En el caso que ocupa a este estudio, es posible encontrar DTM's cuyas orientaciones graficadas en *stereonets* indican sets estructurales bastante marcados como también otros en que no es posible identificar dichos sets, mostrando patrones en la distribución de polos de orientaciones bastante homogéneos en los *stereonets*. Para definir sets estructurales también es necesario poseer polos agrupados en conjuntos lo suficientemente densos como para que los sets estén bien definidos, lo cual es difícil de lograr si el número de datos es limitado como sucede al ir truncando por un tamaño mínimo. Por estas razones en el *bootstrapping* se tiene una herramienta metodológica útil para la simulación de orientaciones de estructuras en el contexto restringido del mapeo de un frente de desarrollo parte de una galería de la mina El Teniente.

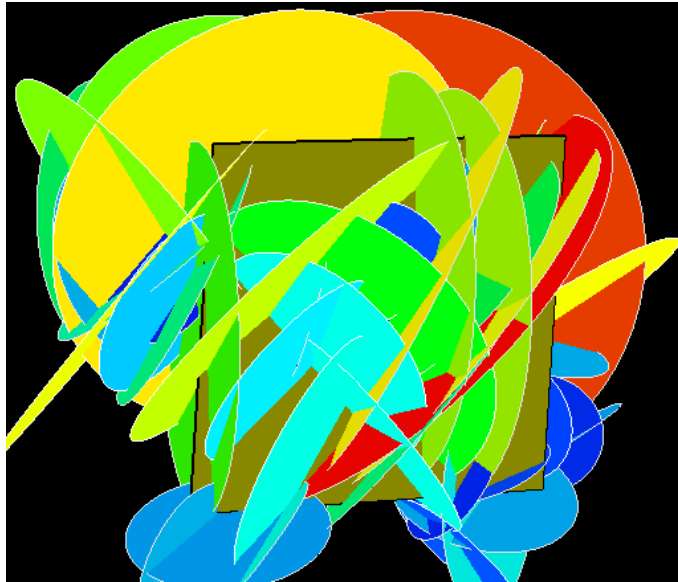
Mediante el uso de FracMan, se determinó que la simulación de la orientación de las estructuras observadas en los mapeos de DTM de las minas Esmeralda y RENO sea realizada a través de este método de muestreo estadístico (disponible en el código de FracMan). La Figura 4.4 muestra el mapeo de estructuras digitalizadas en FracMan para el DTM 2715 junto a las estructuras simuladas a partir de ellas con parámetros de Tamaño e Intensidad arbitrarios, y Orientación mediante *bootstrapping* (para una iteración elegida de forma aleatoria). También se presentan los *stereonets* de las estructuras originales y simuladas.



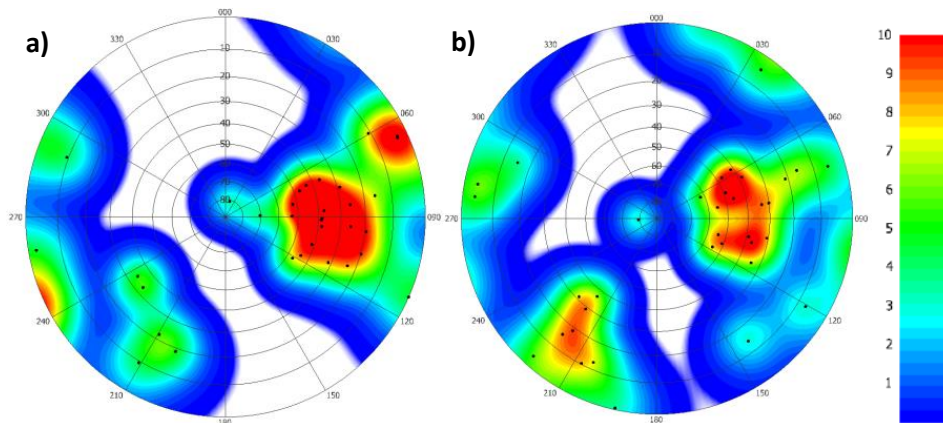
**Figura 4.4** a) 73 estructuras levantadas en el DTM 2715, con radio equivalente mínimo 0,3 m (Esmeralda Hw - Nivel Acarreo). b) 340 estructuras simuladas (40 iteraciones) mediante *bootstrapping* en un volumen de  $729 m^3$ , con radio equivalente mínimo 0,3 m. c) *stereonet* con 73 polos de datos mapeados en a). d) *stereonet* con las 340 orientaciones simuladas en b) (Confeccionado en FracMan).

Para hacer una buena comparación de los datos observados y simulados es necesario intersectar tanto las estructuras observadas como las simuladas con el mismo plano utilizado como ventana de mapeo y muestrear las orientaciones de las estructuras que cortan este plano. La Figura 4.5 muestra la ventana de mapeo subvertical (plano de muestreo) insertada en los datos mapeados, simulando el frente de desarrollo. El mismo procedimiento se hace con las estructuras simuladas.

La Figura 4.6 detalla los *stereonets* que contienen los datos observados y los de una simulación mediante *Bootstrapping* del DTM 2715 escogida al azar, donde se logra observar la distribución de los polos es similar en ambos casos y que el número de trazas (estructuras que cortan el plano) es bastante cercano (34 estructuras mapeadas; 35 estructuras simuladas). Esto refuerza la idea de la utilidad del método *Bootstrapping* en la simulación de orientaciones en este contexto. Tras realizar varias pruebas, se escogió el *Bootstrapping* como el método más idóneo para abordar la simulación de las orientaciones y, por lo tanto, fue el utilizado en este estudio.



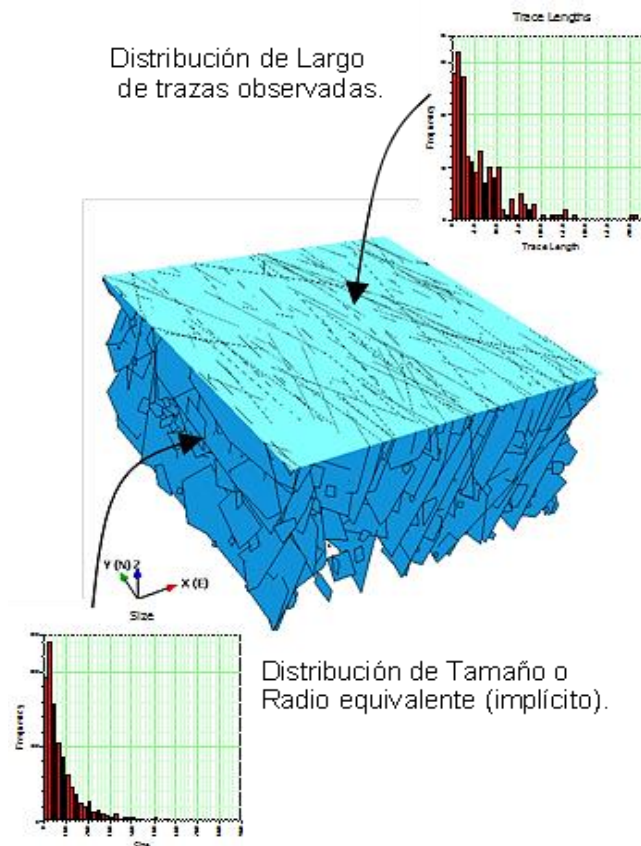
**Figura 4.5** Plano (en verde oliva) insertado en el set de estructuras mapeadas en el DTM 2715.



**Figura 4.6** a) *Stereonet* con los datos mapeados (34 estructuras) que intersectan el plano de la Figura 4.5, b) *stereonet* con los datos de una simulación escogida al azar (35 estructuras) que intersectan el plano de la Figura 4.5.

#### 4.5 Simulación del Tamaño en modelos estocásticos

La simulación del tamaño de estructuras mediante una función de distribución es un tema complejo, y es el problema principal a resolver en este estudio. La dificultad principal radica en obtener la relación existente entre una propiedad 2D como lo es la distribución de largo de traza real y una propiedad 3D como lo es la distribución de tamaño real de la estructura en cuestión. La Figura 4.7 muestra un esquema de la relación entre las propiedades tamaño y largo de traza.



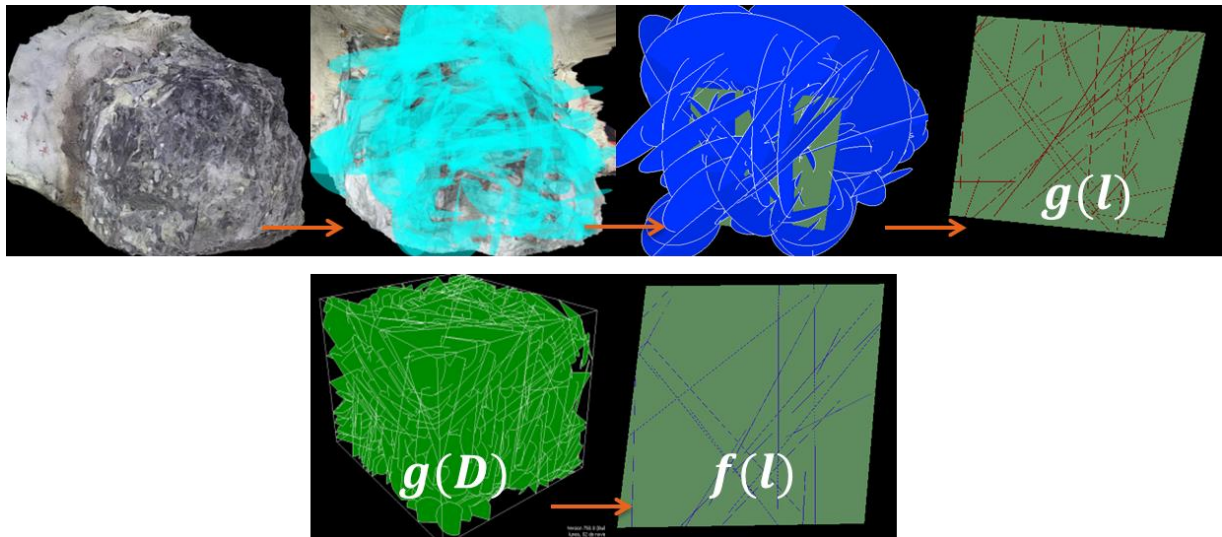
**Figura 4.7** Relación entre la distribución de largo de traza y distribución de tamaño. (Modificada de Golder Associates Ltd., 2011).

Existe una variedad de metodologías aplicadas por FracMan para resolver este problema, entre las que destacan: Métodos analítico, Leyes de escalamiento, Muestreo Simulado Manual y Muestreo simulado Automatizado (Golder Associates Ltd., 2011). Gran parte de la bibliografía desarrollada de este tema se basan en métodos analíticos pero tras realizar

pruebas virtuales se decidió desechar esas opciones y optar por la técnica del Muestreo Simulado que dio mejores resultados en dichas pruebas.

Tanto el método analítico como los métodos de muestreo simulado se encargan de resolver la relación entre la distribución de largos de traza y la distribución de tamaños implícita, relación expresada mediante la ecuación fundamental de Warburton (1980). Todos estos métodos coinciden en diferenciar las distintas funciones de distribución (ver Figura 4.8) involucradas en el problema:

- $g(l)$  – función de densidad de probabilidad (fdp) de los largos de trazas observados (mapeados), sujeto a sesgos de muestreo (ver ANEXO).
- $f(l)$  – función de densidad de probabilidad (fdp) de los largos de trazas simulados. La forma de la distribución se asume igual a la de  $g(l)$ .
- $g(D)$  – función de densidad de probabilidad (fdp) de tamaño. La forma de la distribución se escoge de forma arbitraria con el fin de encontrar la que mejor represente los datos del mapeo. Esta distribución de tamaños debe generar una distribución de largos de traza parecida a  $g(l)$  al cortar las estructuras con un plano.

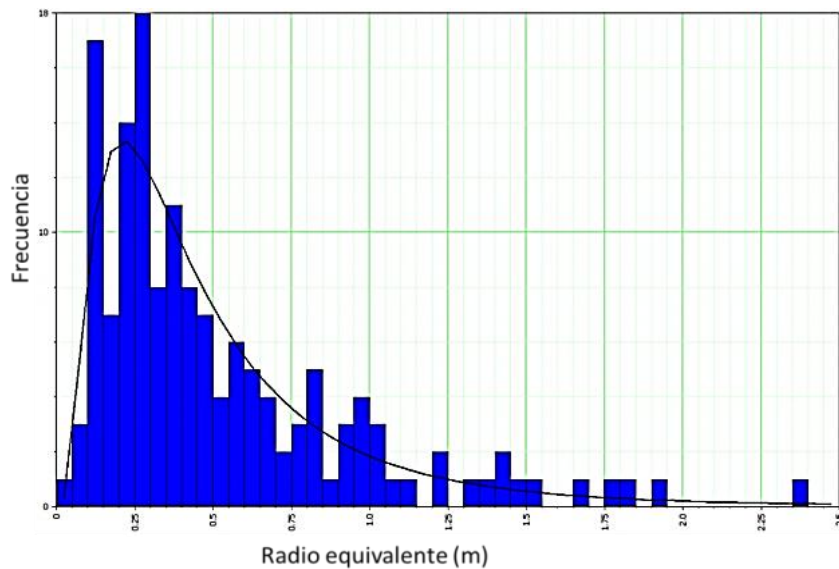


**Figura 4.8** Funciones de densidad de probabilidad definidas en este estudio.  $g(l)$ : fdp de largos de trazas mapeados,  $g(D)$ : fdp de tamaños,  $f(l)$ : fdp de largos de traza simulados (esquema confeccionado en 3DM Analyst y FracMan).

#### 4.5.1 Ajuste de histogramas de tamaños mapeados

En este estudio se trabaja con un dato inicial asociado a un tamaño (radio mapeado) no a un largo de traza (las metodologías sugieren hacer este ajuste previo a las trazas). Para solucionar esto, en este estudio se asumió que la distribución de tamaños mapeados (radios equivalentes mapeados) y la distribución del largo de las trazas  $g(l)$  tienen la misma forma (ver 'ANEXO B.1 Ajuste de histogramas de tamaños mapeados').

Al graficar en histogramas los tamaños de las estructuras levantadas en cada DTM y ajustar dichos histogramas mediante curvas de distribución, se escogió cuál era la forma de distribución de tamaño mejor ajustada. Para llevar a cabo esta tarea, FracMan cuenta con una herramienta que ajusta automáticamente los parámetros de una curva de función de densidad de probabilidad para un histograma de tamaños con una forma de distribución preestablecida escogida, ya sea lognormal, exponencial, gamma, normal o *power-law*. La Figura 4.9 muestra este ajuste llevado a cabo en FracMan.

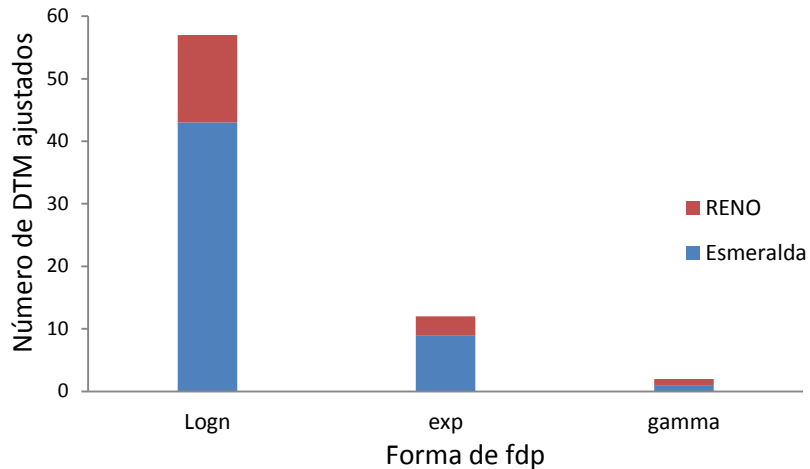


**Figura 4.9** Histogramas de radio equivalente mapeado. DTM 4748, ajuste lognormal para 149 estructuras (Imagen tomada de FracMan).

La forma de escoger el mejor ajuste es a través del uso del estadístico de Kolmogorov-Smirnoff ( $k-s$ ), bajo el criterio de que a menor valor del estadístico es mejor el ajuste entre el histograma y la curva de distribución escogida. La Figura 4.10 muestra el mejor ajuste logrado



en todos los mapeos de tamaños realizados en este estudio (el detalle se puede consultar en la sección ANEXO A.). Luego, se concluyó que la distribución lognormal se ajusta de mejor manera a poblaciones de datos truncadas por tamaño por lo que representa mejor los datos mapeados. El interés de hacer este ajuste previo es que se utiliza esta forma de distribución como idéntica a la distribución de largos de traza real o simulada  $f(l)$ , aspecto que es revisado en '4.5.3 Técnica de Muestreo Simulado'.



**Figura 4.10** Distribuciones de probabilidad de mejor ajuste a los datos tamaño mapeados según estadístico k-s para ambos sectores de la mina revisados en este estudio.

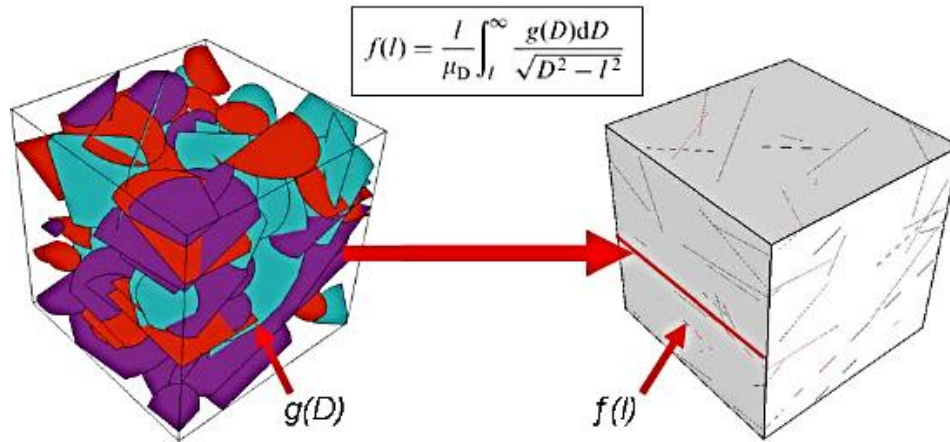
#### 4.5.2 Ecuación fundamental de Warburton

El tamaño de las estructuras se determinó mediante la aplicación la expresión de Warbuton (1980), que relaciona la distribución de tamaño real de las estructuras y la distribución de largo de trazas real (ver Figura 4.11). Esta expresión es:

$$f(l) = \frac{1}{\mu_D} \int_1^{\infty} \frac{g(D)dD}{\sqrt{D^2 - l^2}}$$

donde  $D$  es el diámetro de las discontinuidades;  $l$  es el largo de traza de las discontinuidades contenidas en un plano infinito;  $g(D)$  es la función de densidad de probabilidad de los diámetros;  $f(l)$  es la función de densidad de probabilidad del largo de traza real de las discontinuidades y  $\mu_D$  es la media de los diámetros de las discontinuidades (Zhang & Einstein, 2000). Esta expresión es resuelta por FracMan.





**Figura 4.11** Ecuación de Warburton (1980). Relación entre  $f(l)$ : distribución de largo de traza real, y  $g(D)$ : distribución de tamaño real (Modificado de Herrera, 2012).

#### 4.5.3 Técnica del Muestreo Simulado

La técnica del “Muestreo Simulado” o “*Simulated Sampling*”, creada por La Pointe et al. (1993), es un método de muestreo que consiste en generar modelos de DFN con un tipo de distribución y parámetros de tamaño arbitrarios y que permite solucionar la ecuación de Warburton (1980) para modelos de tamaños asumidos de manera arbitraria.

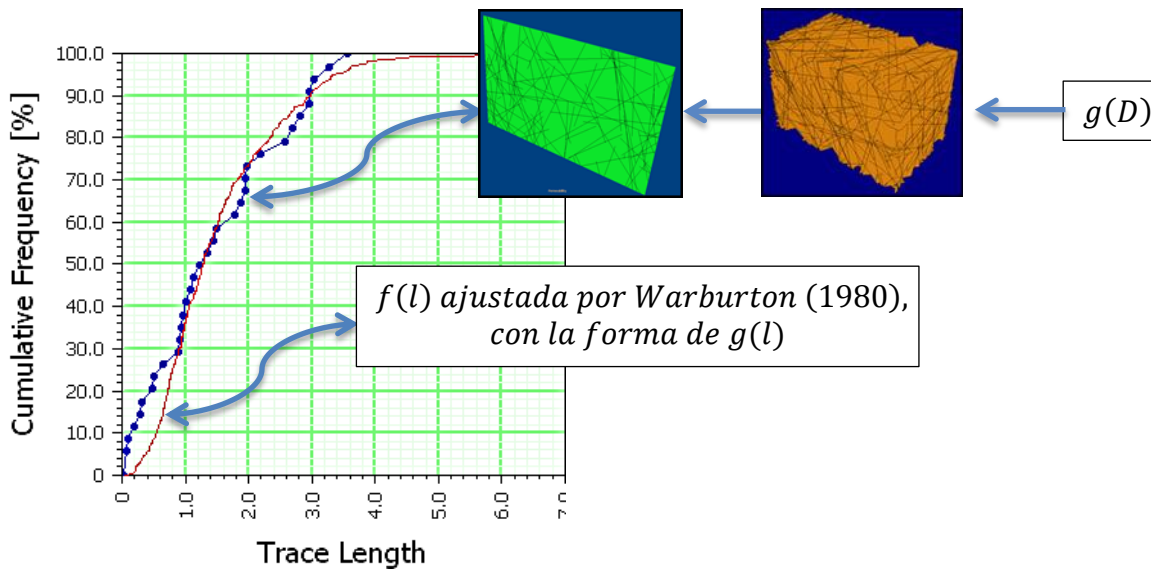
Este método es utilizado para hacer el ajuste de  $f(l)$ . Esta es la función de densidad de probabilidad de los ‘largos de traza en una superficie infinita’ o también llamado distribución de ‘largo de traza real’ (Zhang & Einstein, 2000). La forma de  $f(l)$  es inferida de la forma de  $g(l)$ , esta corresponde a la función de densidad de probabilidad de ‘largos de traza en un superficie finita’ y su forma fue discutida en ‘4.5.1 Ajuste de histogramas de tamaños mapeados’. A partir de esos resultados, se asumió una forma lognormal para  $f(l)$ .

Básicamente, el muestreo simulado asume distintos DFN’s con distribuciones de tamaño  $g(D)$  con una forma de densidad de probabilidad arbitraria para parámetros arbitrarios.

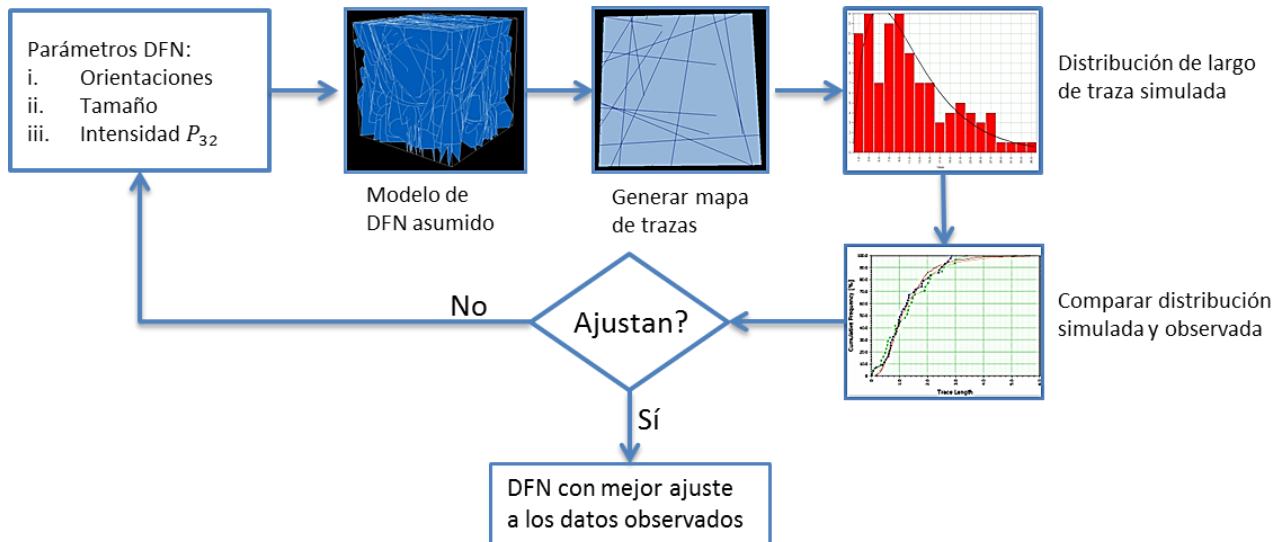
Para empezar, las orientaciones fueron resueltas mediante el método del *bootstrapping* como fue detallado en la sección ‘4.4.1 Simulación de Orientación’ y para la Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  se escogió arbitrariamente un valor de  $5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (ver ‘ANEXO B.2 Determinación de un valor  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  inicial para abordar las simulaciones de Tamaño real en DFN’s’). Para asegurar la aleatoriedad de los resultados se generaron 20 iteraciones de DFN

para cada tamaño con una distribución lognormal de tamaño real  $g(D)$  (por razones de simplicidad, la desviación estándar del tamaño se asume igual a la media del tamaño).

Luego de generados los DFN's, se cortaron los sets con el mismo plano escogido para obtener las trazas de los mapeos (ver 'ANEXO A.4 Determinación de la dirección del plano de mapeo') y se obtuvo un mapa de trazas del cual se pudo obtener una media y desviación estándar de largo de traza (trazas de las estructuras de los DFN's medidas) con una curva de frecuencia acumulada para los tamaños con una forma determinada (ver Figura 4.12). Esta curva es ajustada mediante la solución a la ecuación Warburton (1980) obteniendo la función de distribución de largo de traza simulada  $f(l)$  y sus parámetros (media y desviación estándar de largo de traza). Este proceso debe ser repetido para distintos valores de los parámetros de tamaño hasta obtener una relación entre tamaño y largo de traza simulado. La Figura 4.13 muestra un diagrama esquemático de la aplicación de esta metodología de ajuste del tamaño real mediante el método del "Muestreo simulado".



**Figura 4.12** Curvas de frecuencia acumulada para largos de traza medidos (en azul) y largos de traza simulados (en rojo) mediante la expresión de Warburton (1980), con forma lognormal para la distribución de tamaño real y distribución de largo de traza real (asumida igual a las trazas observadas) (esquema confeccionado por el autor de este trabajo).



**Figura 4.13** Diagrama esquemático de la aplicación del método de “Muestreo Simulado” para el ajuste de la distribución de tamaño real de las estructuras de la mina El Teniente (Confeccionado por el autor de este trabajo).

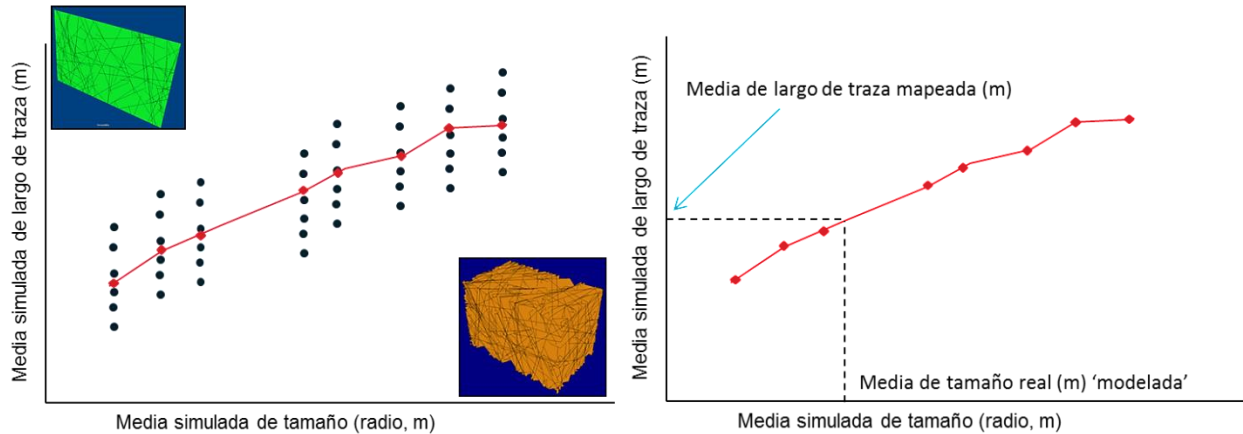
Luego, el ajuste depende de la forma de distribución de tamaños que se escoge al generar los DFN, que en este estudio se considera la forma lognormal (con el fin de simplificar la cantidad de cálculos que se deben hacer al considerar la forma exponencial y/o gamma). La relación obtenida mediante el muestro simulado se expresó en un gráfico de ‘Media de Tamaño versus Media de Largo de Traza Simulada’ como se muestra en el esquema de la Figura 4.14.

Cada punto en el gráfico a la izquierda representa una iteración de DFN generado con parámetros de tamaño determinados (en el eje de las abscisas del gráfico de la Figura 4.14, a la izquierda) y una forma lognormal de distribución de tamaño. Pruebas demostraron que para más de 20 iteraciones por tamaño, el promedio de las medias simuladas de largo de traza se mantiene aproximadamente constante.

Para determinar el tamaño de las estructuras es necesario calcular el valor de la media de largo de traza observada obtenida al intersectar las estructuras mapeadas con el plano de mapeo truncando previamente al mismo tamaño mínimo que las iteraciones. Esta media de largo de traza observada es proyectada a la curva del valor promedio de las iteraciones para encontrar el valor de la “Media de Tamaño Real Modelada” (ver Figura 4.14, a la derecha). Para el ajuste de la desviación estándar se procede de manera similar proyectando la desviación

estándar observada del largo de traza a una curva de desviación estándar del largo de traza simulado.

De esta manera se logró ajustar los parámetros de tamaño modelados a partir de la relación entre medias de largos de traza observadas y simuladas. Cada vez que se lleva a cabo esta acción es necesario ajustar a un tamaño mínimo de corte los datos mapeados como de las estructuras de los DFN generados en cada iteración.



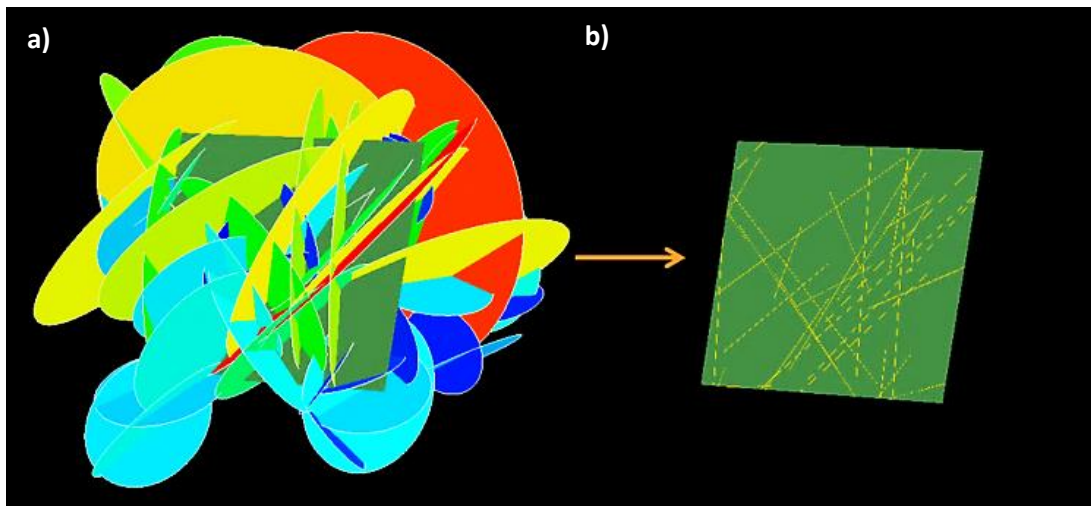
**Figura 4.14** Esquema del muestreo simulado. A la izquierda, gráfico que relaciona Media Simulada de Tamaño asumida en los modelos con la Media de Largo de Trazas Simulada. Cada punto representa una iteración para un valor de tamaño. La línea en rojo representa el promedio de las iteraciones. A la derecha, proyección de la Media de Largo de Trazas Mapeadas y la determinación de la Media de Tamaño Real Modelada (Gráficos esquemáticos confeccionados por el autor de este trabajo).

#### 4.6 Simulación del parámetro de Intensidad de Fracturamiento $P_{32}$ ( $m^2/m^3$ )

Para terminar de definir un DFN se debe proceder a determinar el valor de la Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ). Este valor no es medible directamente en afloramientos y solo puede ser ajustado a partir de datos mapeados de  $P_{10}$  (ff/m) o  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ), teniendo resueltos los parámetros de simulación de la orientación y el tamaño (Dershowitz & Herda, 1992). En este estudio se utilizó el valor del  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) que corresponde al cociente entre el largo de traza total (m) contenido en un plano y el área de ventana de mapeo ( $m^2$ ) que contiene las trazas, tal como se observa en la Figura 4.15.

Luego, se aprovechó una correlación lineal existente entre los parámetros de Intensidad de Fracturamiento Planar y Volumétrico simulados,  $P_{32}$  y  $P_{21}$ , respectivamente. Este proceso para determinar el valor de  $P_{32}$  sigue el método descrito por Staub *et al.* (2002).

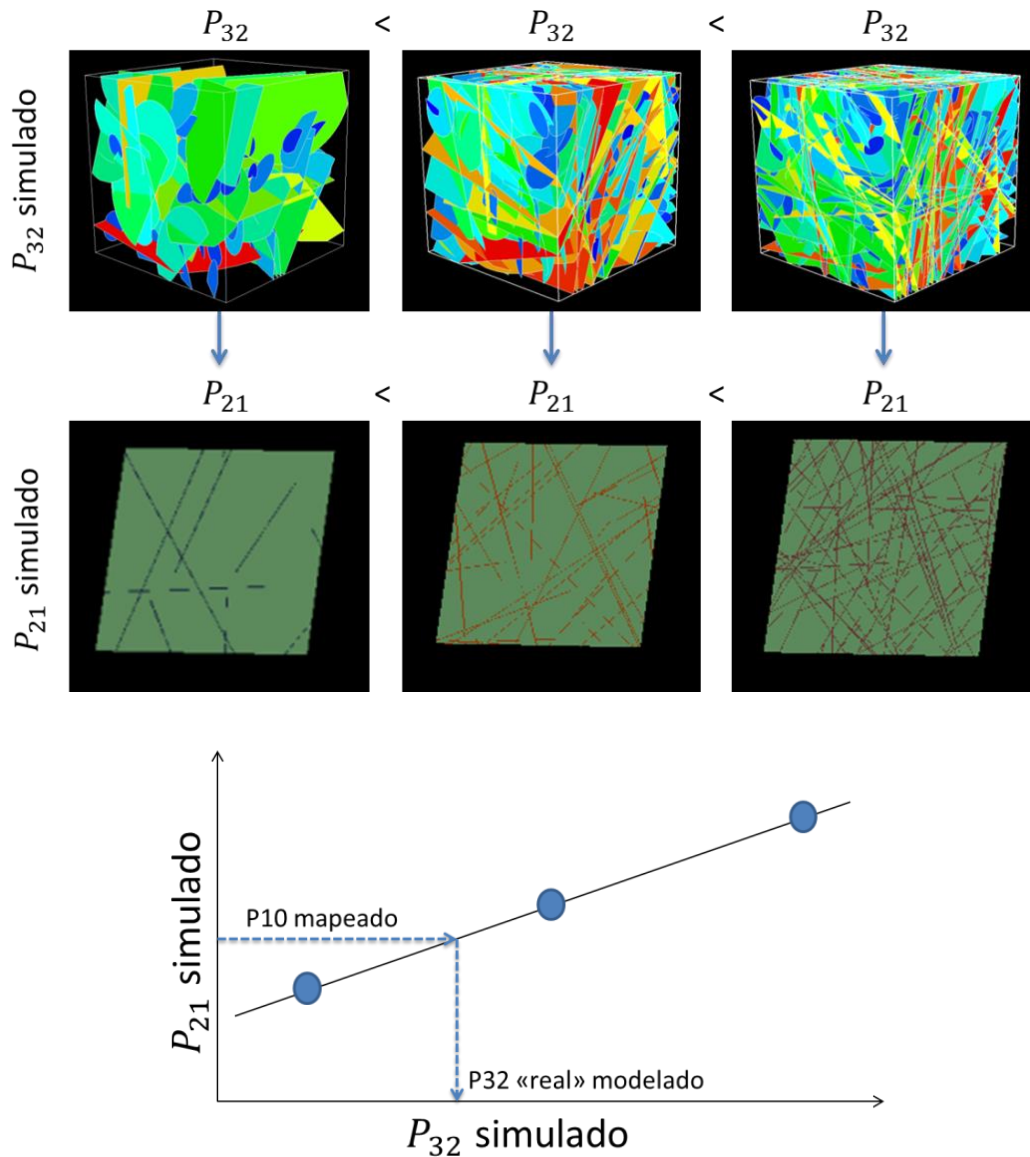
Los principales cuidados considerados al hacer los cálculos de ésta propiedad derivan de que la medición del valor de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) está sujeta a sesgos direccionales debido a la anisotropía general que tiene su medida (Elmo, 2006) y que su valor está sujeto a las dimensiones escogidas de la ventana de mapeo. Para esto se generó un criterio de mapeo que considera una dirección establecida de la ventana de mapeo constante y una dimensión de 3x3 m para todas las ventanas de mapeo utilizadas (ver 'ANEXO A.3 Sesgos en el levantamiento de la Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ )').



**Figura 4.15** a) Estructuras mapeadas con plano-ventana de mapeo de 3x3m (DTM 2715). b) mapa de trazas generado para el cálculo del  $P_{21}$ .

Luego de simular la orientación y el tamaño de las fracturas, se procedió a simular modelos de DFN con un valor de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ) inicial arbitrario. Para asegurar buenos resultados y una correlación exacta fue necesario generar al menos 10 DFN aleatorios con estos parámetros. Al muestrear estos DFN de la misma manera que se hizo con los datos mapeados (usando el mismo plano) fue posible obtener el valor de Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) promedio simulado para un valor Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ) determinado. Se debió repetir este procedimiento para un número determinado de valores de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$  ( $m^2/m^3$ ). En este trabajo se establece que basta

con 3 valores lo suficientemente dispersos (1, 5 y 10  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) para que la cantidad de datos sea suficiente para una buena estimación. Con esto es posible determinar la correlación lineal entre los promedios de ambos valores de Intensidades de Fracturamiento,  $P_{32}$  y  $P_{21}$ . Con esta correlación se procede a ajustar un valor de intensidad de fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  modelado (“real”) a partir de una intensidad de fracturamiento  $P_{21}(\text{m}/\text{m}^2)$  observada, de manera similar a la que se ajustó el tamaño en la sección anterior. La Figura 4.16 muestra un esquema de este procedimiento.



**Figura 4.16** Arriba: esquema del procedimiento de derivación del valor de la intensidad  $P_{32}$ , relación entre ambas medidas de Intensidad de Fracturamiento. Abajo: Correlación lineal entre los parámetros de Intensidad de Fracturamiento. Los círculos azules corresponden al valor promedio de 10 iteraciones por cada valor de intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ .

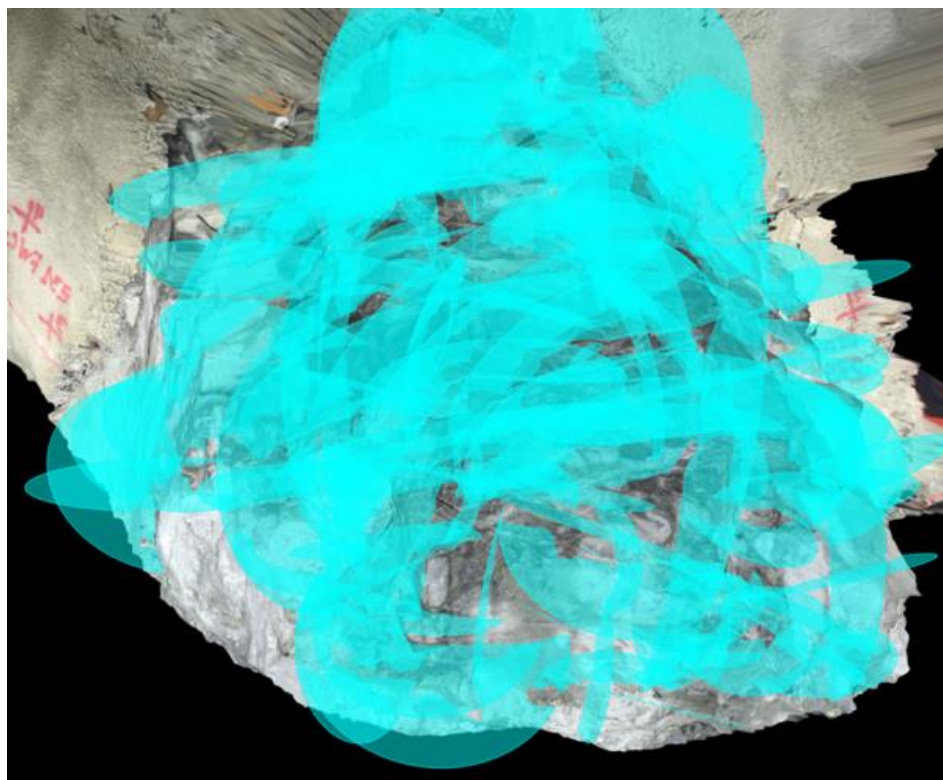


#### 4.7 Ejemplo de aplicación de la Metodología de ajuste de Parámetros

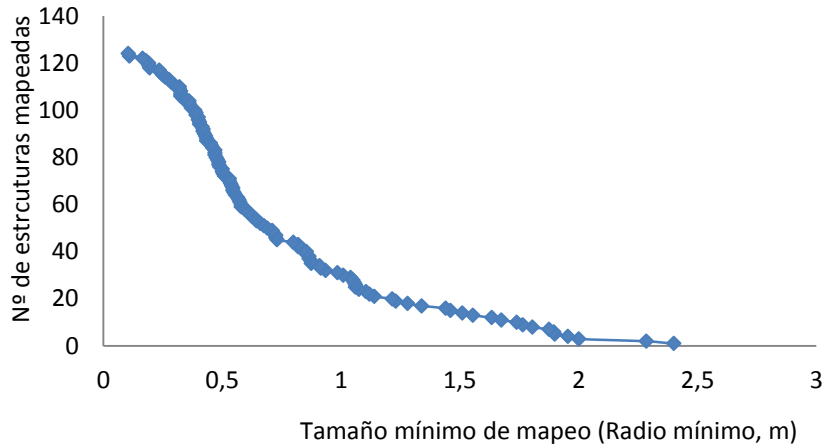
Para graficar el uso de la metodología de construcción de DFN presentada en este capítulo se muestra la aplicación para uno de los mapeos realizados en este trabajo. El 'Modelo digital de terreno' utilizado en este ejemplo corresponde al DTM 2715 del sector Esmeralda Hw – nivel Transporte.

##### I. Levantamiento de estructuras en 3DM Analyst

Las estructuras levantadas mediante el uso de 3DM Analyst se presentan en la Figura 4.17. Se levantaron un total de 124 estructuras, con un radio máximo igual a 2,4 m y un radio mínimo igual 0,1 m. Un detalle de estas estructuras se presenta en la Figura 4.18 mediante un gráfico de curva acumulativa inversa, éste relaciona el número de estructuras mapeadas a partir de un tamaño (radio) mínimo de mapeo.



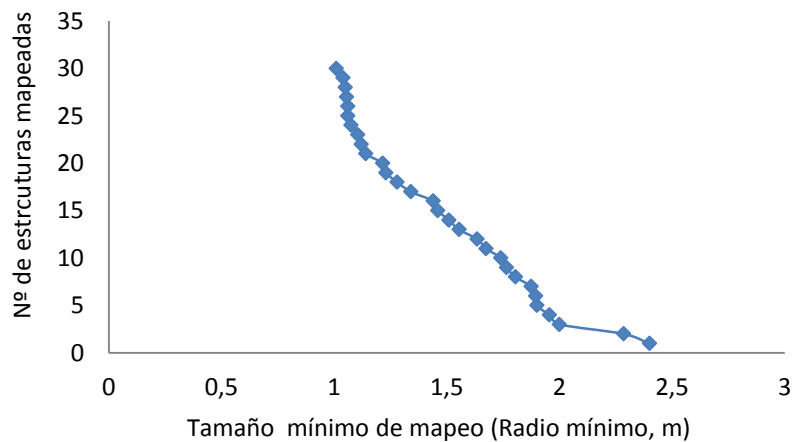
**Figura 4.17** Estructuras mapeadas en 3DM Analyst en el DTM 2715, sector Esmeralda Hw – nivel Transporte, 124 estructuras mapeadas.



**Figura 4.18** Gráfico de frecuencia acumulada inversa de N° de estructuras mapeadas a partir de un tamaño mínimo de mapeo. 124 estructuras mapeadas en 3DM *Analyst* en el DTM 2715, sector Esmeralda Hw – nivel Transporte.

## II. Establecer tamaño mínimo de corte

Este ejemplo se llevó a cabo para un tamaño mínimo de corte de 1 m. Para esto se procedió a eliminar las estructuras menores a 1 m de radio con lo que se obtuvo 30 estructuras. Éstas serán utilizadas en todos los pasos correspondientes a la construcción de los DFN. Un gráfico de Frecuencia Acumulada Inversa para estas 30 estructuras se muestra en la Figura 4.19.



**Figura 4.19** Gráfico de frecuencia acumulada inversa de N° de estructuras mapeadas a partir de un tamaño mínimo de mapeo. 30 estructuras mapeadas en 3DM *Analyst* en el DTM 2715, sector Esmeralda Hw – nivel Transporte. Tamaño mínimo 1m.



### III. Simulación de Orientaciones (FracMan)

En la sección '4.4 Simulación de Orientación en modelos estocásticos' se estableció que es el método de *Bootstrapping* el utilizado para la simulación de las orientaciones. Luego, solo es necesario establecer en los códigos de FracMan que es el método de simulación de orientaciones utilizado y que se respeta la condición de que los DFN deben ser generados con un tamaño mínimo de 1 m.

### IV. Simulación de Distribución de Tamaño (FracMan)

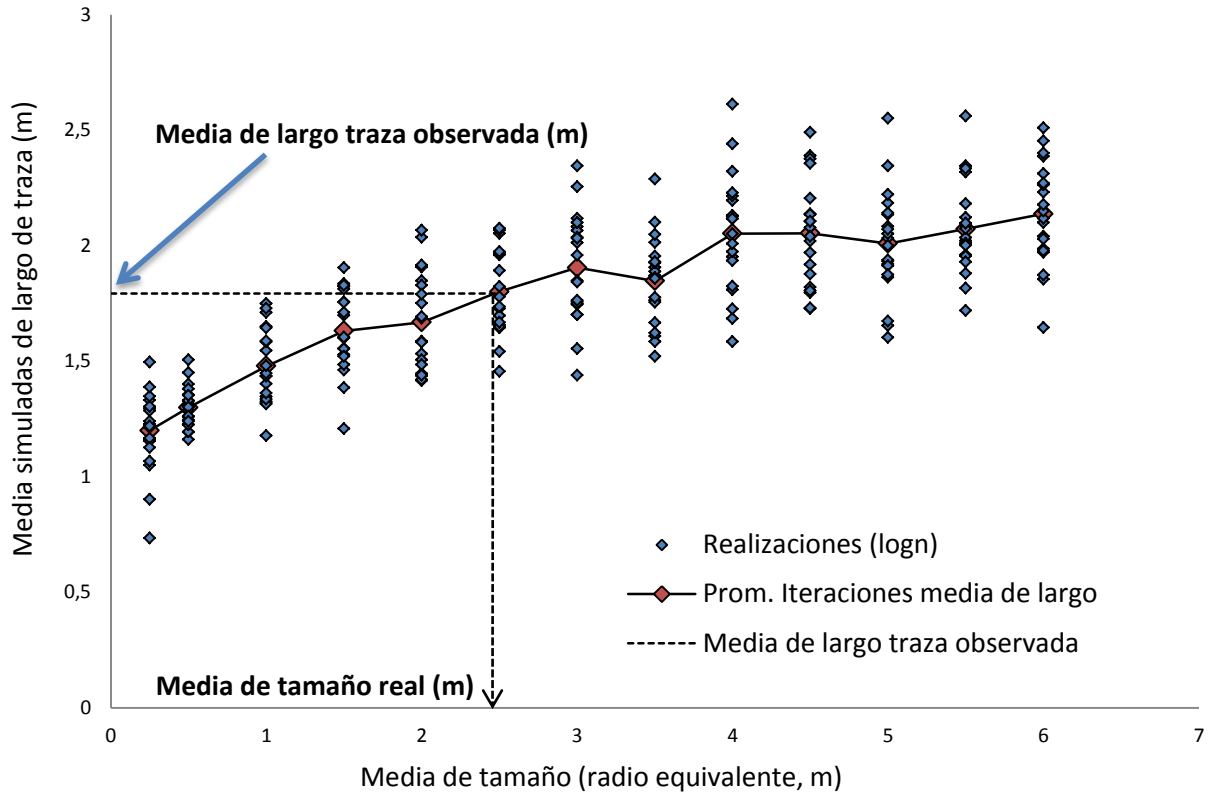
#### a. Ajuste de los tamaños mapeados a una forma de distribución

Como se discutió en la sección '4.5.1 Ajuste de histogramas de tamaños mapeados', la metodología de ajuste de tamaño requiere, previamente, conocer la forma de la distribución de tamaños o radios equivalentes observados o 'función de densidad de probabilidad de largos de traza observados ( $l$ )'. Este paso se debe abordar antes de establecer un tamaño mínimo de corte. Esto no representa un problema y la razón se discute en detalle en la sección ANEXO.

Luego, para el mapeo de 124 estructuras del DTM 2715 se establece que la forma de distribución lognormal ajusta de mejor manera el histograma de estructuras mapeada.

#### b. Simulación del tamaño real "modelado"

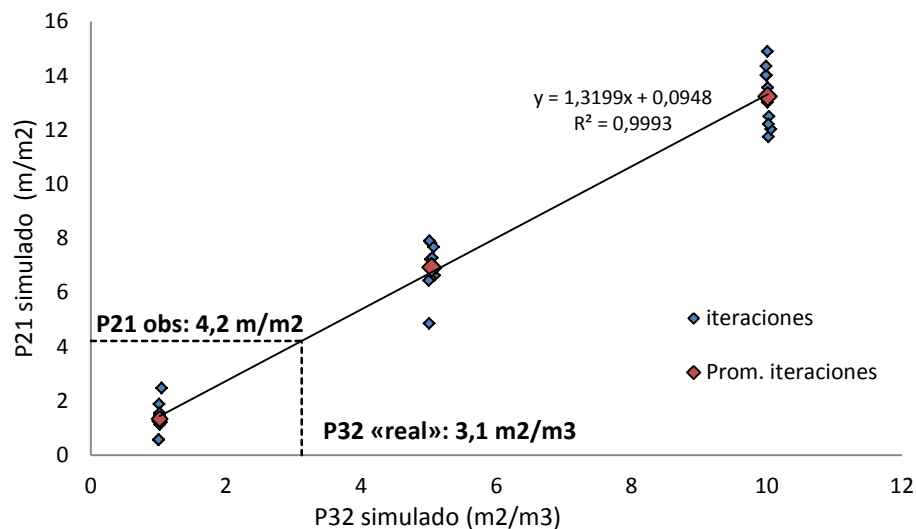
La simulación del tamaño para un tamaño mínimo de 1 m se resuelve mediante la solución a la ecuación de Warburton (1980) haciendo uso del método de '*Simulated Sampling*' (La Pointe *et al.*, 1993). Luego de generar iteraciones para distintos modelos de DFN con una distribución de tamaño de forma lognormal de parámetros arbitrarios, se procede a obtener las Medias Simuladas de Largo de Traza solucionando la ecuación de Warburton (1980). El último paso es proyectar la Media de Largo de Traza Mapeada que corresponde, en este ejemplo, a 1,8 m. De esta manera se ajusta una Media de Tamaño Real 'Modelada' igual 2,5 m. Este proceso se muestra en el gráfico de la Figura 4.20.



**Figura 4.20** Metodología de ajuste de media de tamaño real (radio equivalente, m) a partir de la media de largo de traza observada (m) mediante el método de 'Muestreo Simulado'. DTM 2715, sector Esmeralda Hw, nivel Transporte, tamaño mínimo 1 m.

## V. Simulación de Intensidad de Fracturamiento $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ (FracMan)

Para resolver esto, tal como se describió en la sección '4.6 Simulación del parámetro de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ ', se aprovecha la correlación existente entre los parámetros de Intensidad de Fracturamiento simulados  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  y  $P_{21}(\text{m}/\text{m}^2)$ . Luego, con la Orientación simulada por *Bootstrapping* y el Tamaño simulado mediante el método de 'Muestreo Simulado', se procede a generar DFN con valores arbitrarios de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ . Por último, a partir de la proyección del valor de Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}(\text{m}/\text{m}^2)$  mapeado, que en este ejemplo corresponde a 4,2 ( $\text{m}/\text{m}^2$ ), se obtiene un valor de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  Real 'Modelado' igual 3,1 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ). Este procedimiento se muestra en el gráfico de la Figura 4.21. Un resumen de los resultados de la aplicación de esta metodología para el ejemplo DTM 2715 para un tamaño mínimo de 1 m (radio) se observan en la Tabla 4.2.



**Figura 4.21** Aplicación del método de derivación del parámetro de intensidad  $P_{32}$  a partir del parámetro intensidad  $P_{21}$  para el DTM 2715 con un tamaño de estructura mínimo de 1 m. Cada punto azul corresponde a un valor de  $P_{21}$  simulado para cierto valor de  $P_{32}$  escogido arbitrariamente. Los puntos rojos son los promedios de estas simulaciones.

**Tabla 4.2** Resultados de la aplicación de la metodología de ajuste de parámetros para la construcción de un DFN del DTM 2715 mapeado con un tamaño mínimo  $r = 1$  m.

Parámetro	Valor
Tamaño mínimo	1 m
Distribución de orientaciones	Simuladas por <i>Bootstrapping</i>
Distribución de tamaños	Media de tamaño: 2,5 m (dist. lognormal)
Intensidad de Fracturamiento $P_{32}$	3,1 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>

#### 4.8 Evaluación de la simulación de parámetros

Con los parámetros de distribución de orientación, tamaño e intensidad obtenidos mediante el procedimiento antes señalado, es esperable que al definir un número determinado de DFN con estos parámetros y muestrearlos en el mismo plano-ventana de mapeo, los resultados de las propiedades en un plano simuladas coincidan con los datos observados o

mapeados en dicho plano. Por lo tanto, es posible determinar el error relativo de cada ajuste de parámetros con el fin de evaluar la representatividad de las simulaciones.

La comparación del promedio de las propiedades simuladas con las propiedades observadas se hizo mediante el cálculo del error experimental, es decir, la diferencia existente entre la medida observada y la medida real esperada (en este caso corresponde a un promedio de las simulaciones). Este error se calcula mediante la expresión:

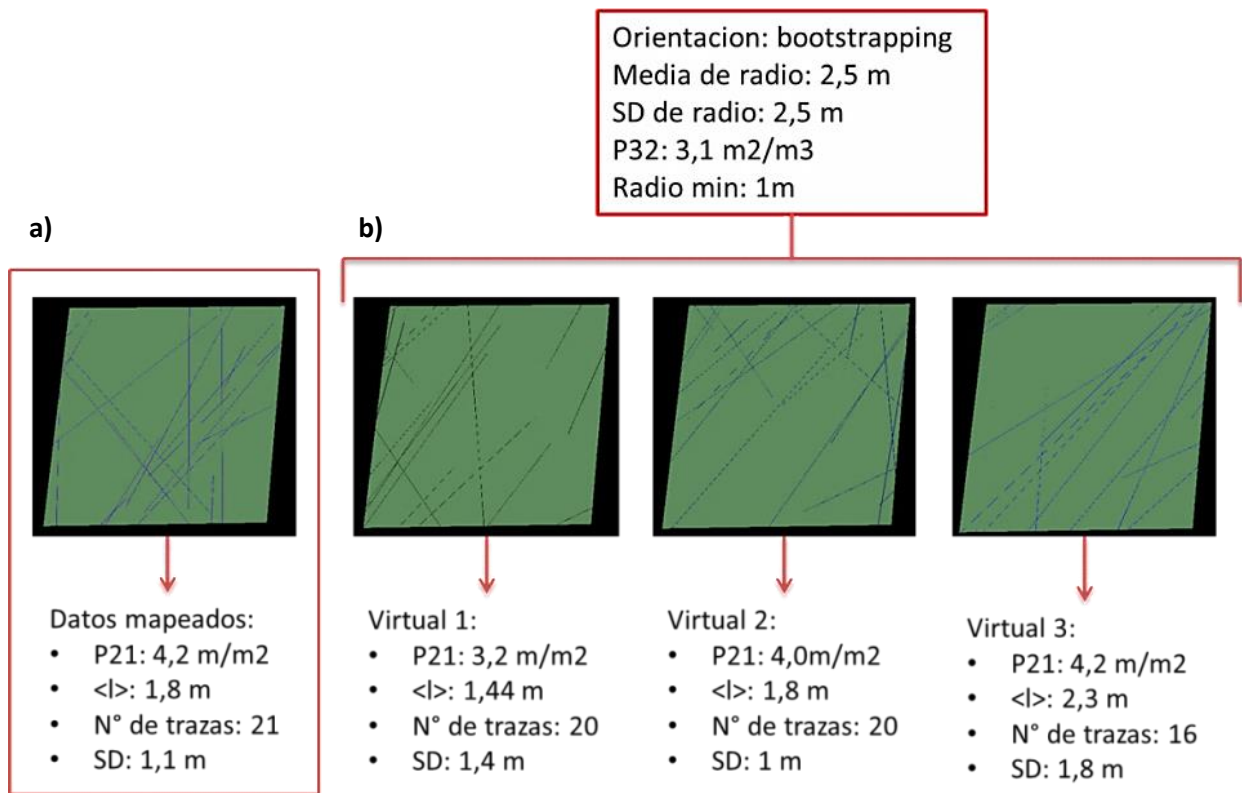
$$\varepsilon_r = \left| \frac{x_i - x_v}{x_v} \right| * 100\%$$

donde  $x_i$  corresponde al valor esperado o promedio de un número N de simulaciones con los parámetros obtenidos mediante la metodología de trabajo presentada en este capítulo, y  $x_v$  corresponde a valor observado, ambos medidos en un plano de 9 m<sup>2</sup>.

Para llevar a cabo esta evaluación de la simulación se llevan a cabo 40 iteraciones cuyos DFN se generan a partir de los parámetros obtenidos mediante la aplicación de la metodología. En el ejemplo de la sección '4.7 Ejemplo de aplicación de la Metodología de ajuste de Parámetros' llevado a cabo en este capítulo, los parámetros obtenidos, y que servirán para generar las iteraciones de DFN's, son:

- Orientaciones simuladas mediante *bootstrapping*
- Media de radio equivalente de 2,5 m y desviación estándar de radio equivalente de 2,5 m para un forma de distribución lognormal
- Intensidad de fracturamiento  $P_{32}$  igual a 3,1 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) .
- Radio mínimo de corte de 1 m.

Luego, es necesario muestrear estas iteraciones de la misma forma (mediante el plano vertical) y obtener valores de propiedades medidas en un plano: Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>), Media del largo de traza simulada (m), Desviación estándar del largo de traza (m) y N° de trazas contenidas en el plano. La Figura 4.22 muestra un esquema donde se detalla el mapa de trazas con los datos mapeados y 3 de estas iteraciones elegidas de forma aleatoria con sus respectivas propiedades simuladas.

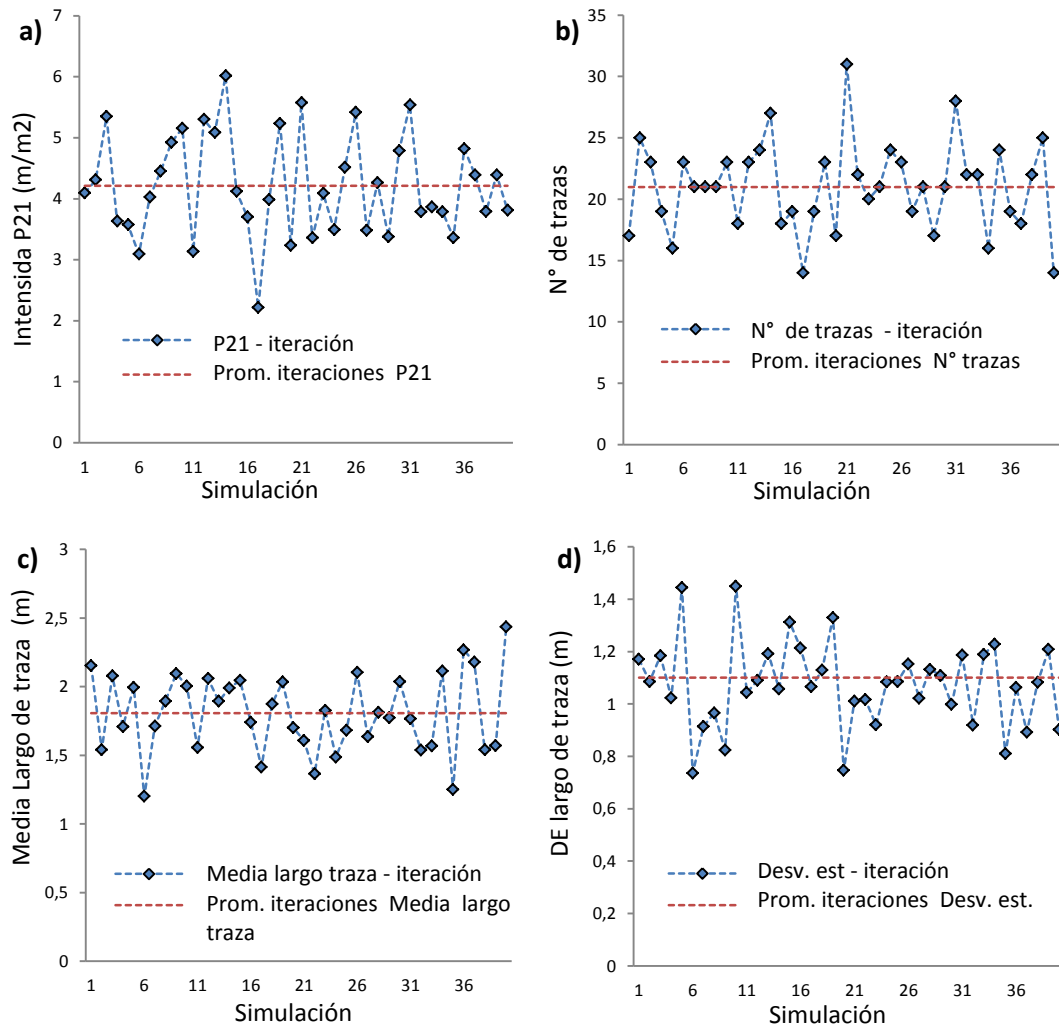


**Figura 4.22** a) Datos mapeados. b) datos simulados medidos a partir de 3 iteraciones aleatorias generadas a partir de los parámetros obtenidos mediante la metodología presentada en este trabajo.

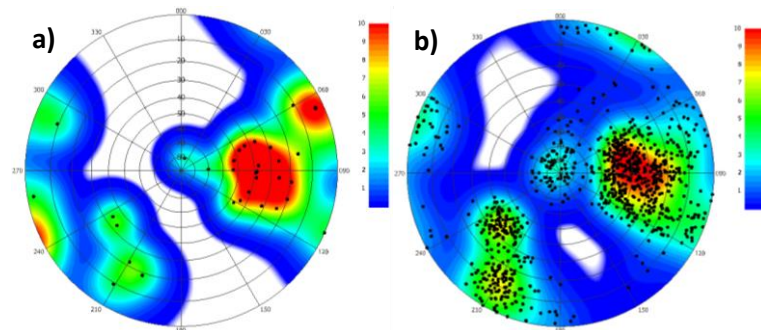
En la Figura 4.23 se muestran los gráficos de las cuatro propiedades medidas en el plano de 40 iteraciones usadas para establecer la validez de la metodología aplicada al mapeo del DTM 2715. Los puntos azules son las iteraciones y la línea roja segmentada corresponde al promedio de estas simulaciones.

La Tabla 4.3 muestra la comparación entre el promedio de las simulaciones y el valor observado para cada propiedad medida en cuestión. Además, se muestran los *stereonets* de los polos de las estructuras mapeadas y simuladas, respectivamente (ver Figura 4.24).

Según estos resultados, los errores relativos porcentuales, aplicados al ejemplo del DTM 2715, resultan no sobrepasar el 2,7%, lo que valida la simulación para este caso. Además, el *stereonet* de los datos simulados (Figura 4.24) muestra que los polos se distribuyen alrededor de vectores polo promedio que representan bien las orientaciones observadas, validan el método de *bootstrapping* de simulación de orientaciones.



**Figura 4.23** Propiedades medidas en el plano de muestreo y sus resultados para 40 iteraciones (metodología aplicada para el DTM 2715). a) Intensidad de fracturamiento  $P_{21}(m/m^2)$ , b) N° de trazas contenidas en el plano, c) media del largo de traza medida en el plano, d) desviación estándar del largo de traza medida en el plano



**Figura 4.24** a) Stereonet con polos de estructuras mapeadas, b) stereonet con polos de estructuras simuladas (40 iteraciones) con *bootstrapping*.

**Tabla 4.3** Comparación entre propiedades simuladas (40 iteraciones) y observadas (datos y simulaciones a partir del DTM 2751).

Propiedad	Observado	Simulado	Error relativo (%)
Intensidad P21 (m/m <sup>2</sup> )	4,20	4,20	0,2%
Media de largo de traza (m)	1,79	1,74	2,7%
Desv. est. de largo de traza (m)	1,10	1,13	2,7%
N° de trazas en plano	21,00	21,28	1,3%

#### 4.9 Extrapolación de Tamaño e Intensidad de Fracturamiento $P_{32}(m^2/m^3)$

En la mina El Teniente, debido al tipo de explotación utilizado en la roca primaria, el problema del factor escala constituye uno de los factores más difíciles de resolver (lo que se mide en un sondaje no es lo mismo que se mide en una galería). Lo anterior es debido, principalmente, a la dificultad para capturar información que permita visualizar claramente el arreglo estructural en 3D a una escala mayor de lo que permiten actualmente las galerías (GRMD-SGL-INF-61, 2014). Este problema, como se estableció en la introducción de este trabajo, también se observa en el caso de estudios de estabilidad, ya que el mapeo estándar de la mina levanta estructuras de un tamaño mayor de las que, en ocasiones, controlan los problemas de estabilidad.

Al aplicar la metodología en un mismo DTM mapeado para distintos tamaños de corte mínimo es posible obtener los parámetros necesarios para generar los DFN para distintos tamaños mínimos de estructura y con estos resultados establecer tendencias para los parámetros de intensidad  $P_{32}(m^2/m^3)$  y tamaño real (radio, m) de la estructura, lo cual otorga una herramienta que permite la generación de DFN a tamaños de corte mínimo fuera del rango visible y/o de mapeo en galería, como también para estructuras mayores a 1 m (que es el límite establecido por el autor de este trabajo con el objetivo de eliminar el sesgo provocado por las dimensiones de la ventana, problema tratado en el capítulo '6 Discusión').

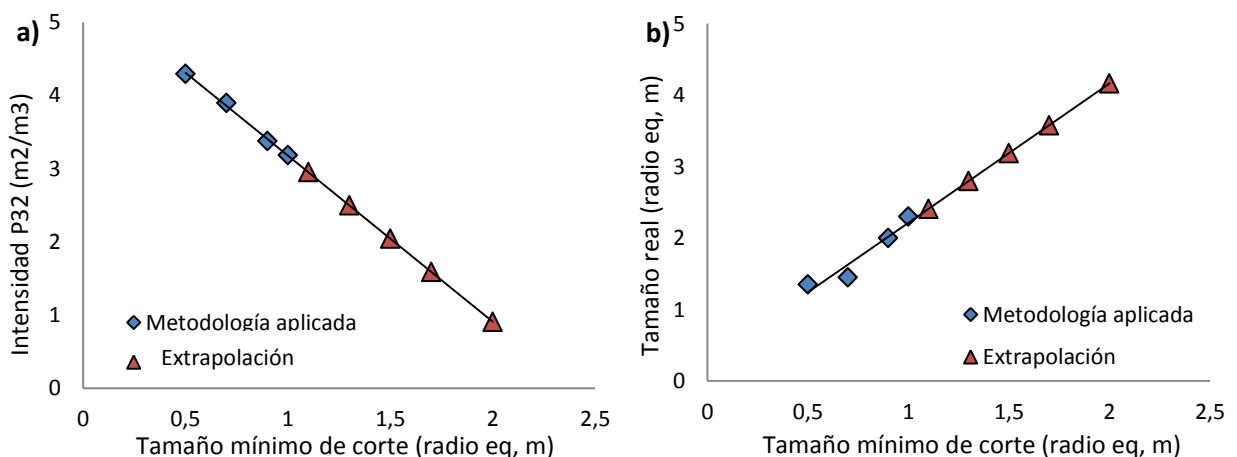
El procedimiento consiste en repetir la metodología completa para cada tamaño de corte elegido arbitrariamente y según las características propias del mapeo, obtener el mayor número de parámetros de Tamaño e Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$  y graficarlos. Al

visualizar ambos parámetros en función de los tamaños mínimos de corte, se obtienen tendencias lineales las cuales pueden ser extrapoladas para tamaños mínimos de corte que no pueden ser observados en la ventana de mapeo, o para aquellos tamaños mínimos que, aunque visibles, no producen buenas estimaciones debido a las limitaciones por las dimensiones de la ventana. La Tabla 4.4 muestra los resultados de la aplicación de la metodología para 4 tamaños de corte para el DTM 2715.

**Tabla 4.4** Resultado de la aplicación de la metodología para cuatro tamaños de corte mínimo.

Radio min (m)	Media radio (m)	D. E. radio (m)	P32 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	P21 (m/m <sup>2</sup> )
0,5	1,35	1,45	4,29	5,50
0,7	1,45	1,45	3,89	4,98
0,9	2,00	1,80	3,38	4,61
1,0	2,30	1,50	3,18	4,21

Estos resultados son graficados en la Figura 4.25 mediante rectas que relacionan el Tamaño mínimo de corte con los parámetros de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$  y Tamaño real. Los primero cuatros valores de tamaño (puntos azules) corresponden a la aplicación de la metodología propuesta, los restantes cinco (puntos rojos), a la extrapolación de la correlación lineal obtenida.



**Figura 4.25** Aplicación de la metodología para 4 tamaños mínimos (entre 0,5 y 1 m, en azul). DTM 2715. Valores de intensidad  $P_{32}$ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) y tamaño real (m) para 5 valores extrapolados de tamaño mínimo (entre 1,1 y 2 m, en rojo).



Luego, mediante la extrapolación es posible, por ejemplo, determinar los valores de los parámetros para generar un DFN para tamaño un mínimo de corte igual a 1,5 m de radio:

- Orientación: *bootstrapping* para estructuras mapeadas truncadas.
- Tamaño (radio equivalente): 3,19 m
- Intensidad  $P_{32}$ : 2,04 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

En el caso particular de este ejemplo. El tamaño de corte de 1,5 m de radio es visible pero al aplicar la metodología sin extrapolar tiene resultados para el ajuste de tamaño muy sobreestimados. Debido a esto, 1,5 m es un buen candidato para hacer la extrapolación ya que, además, es posible hacer comparaciones observado-simulado.

Luego, mediante el mismo procedimiento utilizado en la generación de simulaciones para tamaños mínimos, se procede a generar 40 iteraciones y comparar los resultados entre las simulaciones generadas con los parámetros extrapolados y los datos observados esperados para tamaño mínimo 1,5 m. Los resultados que se deben comparar, como se ha ido haciendo en todo el estudio, son los medibles en un plano, es decir, el  $P_{21}$ , la media de largo de traza, la desviación estándar del largo de traza y el N° de trazas contenidas en el plano. La Tabla 4.5 indica la comparación entre datos observados y los promedios de resultados simulados para 40 iteraciones.

**Tabla 4.5** Comparación entre datos observados y promedios de simulaciones. DTM 2715. Tamaño mínimo extrapolado: 1,5 m.

Propiedad	Observado	Prom. Simulado	Error relativo (%)
N° de trazas	11,00	13,68	24,3
Media largo traza (m)	2,09	1,71	18,5
Desv. est. largo traza (m)	1,17	1,10	6,1
Intensidad $P_{21}$ (m/m <sup>2</sup> )	2,57	2,59	0,8

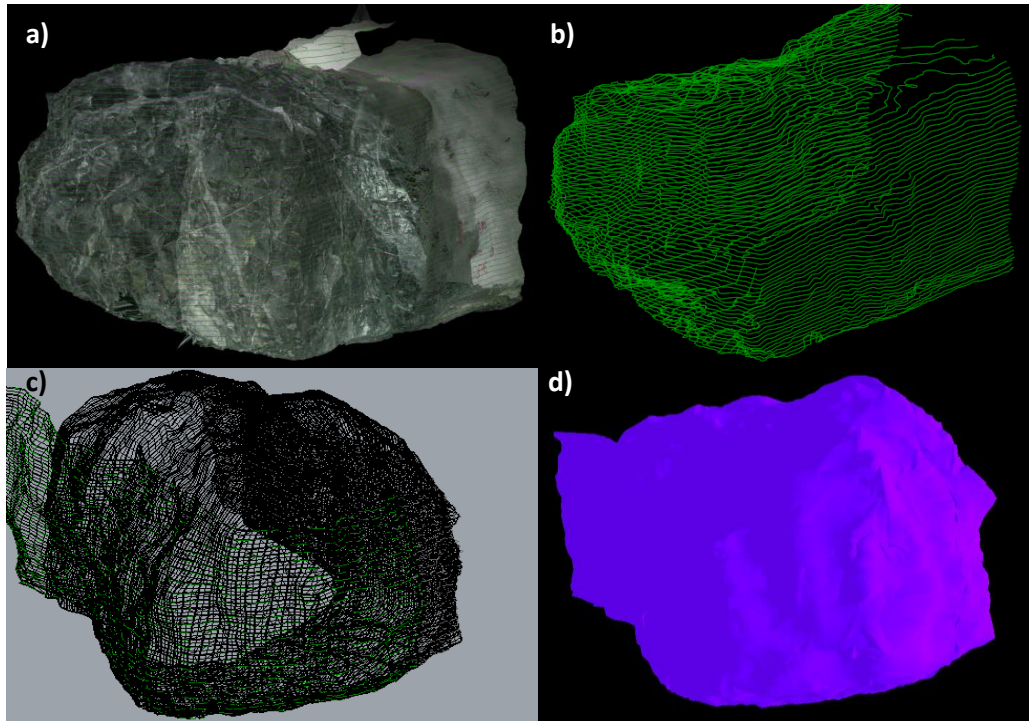
El aumento en el error asociado al número de trazas se debe a que al ser mayor el tamaño de corte mínimo las simulaciones producen menos estructuras, por lo que la probabilidad de que intersecten la ventana de mapeo de 3 x 3 m se reduce. Esto se debe a la

aleatoriedad en que se crean las estructuras en un volumen de 729 m<sup>3</sup> que contiene dicha ventana.

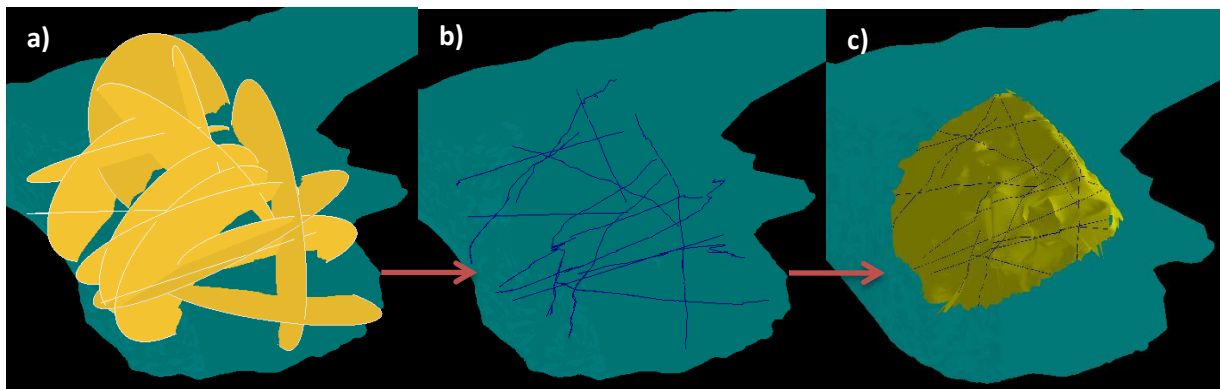
#### **4.10 Validación de la extrapolación de datos**

Otra forma de hacer una evaluación y validar la extrapolación de datos como una metodología que refleje lo observado en las galerías es utilizar la superficie de la galería digitalizada como “ventana de mapeo”. Mediante el uso del *software* Rhinoceros 3D, se pueden construir superficies a partir de una grilla generada en 3DM *Analyst* mediante curvas de nivel verticales y horizontales creadas para los DTM. Luego, se debe exportar dicha grilla a FracMan donde es posible manipularla como una superficie. En la Figura 4.26 se muestra las etapas de construcción de estas superficies de galerías.

Con la superficie generada en FracMan, se realiza una comparación cuantitativa al intersectar las estructuras observadas y las simuladas en 40 iteraciones. Debido a que las medidas de  $P_{21}$ , medias de largo de traza y N° de estructuras están sujetas a un área de observación en el caso de la información mapeada, es importante reducir el área de observación de la superficie de la galería digitalizada. Este procedimiento se puede observar en la Figura 4.27, donde se muestra el proceso de reducción del superficie de mapeo a la superficie que contiene las trazas de las estructuras mapeadas.



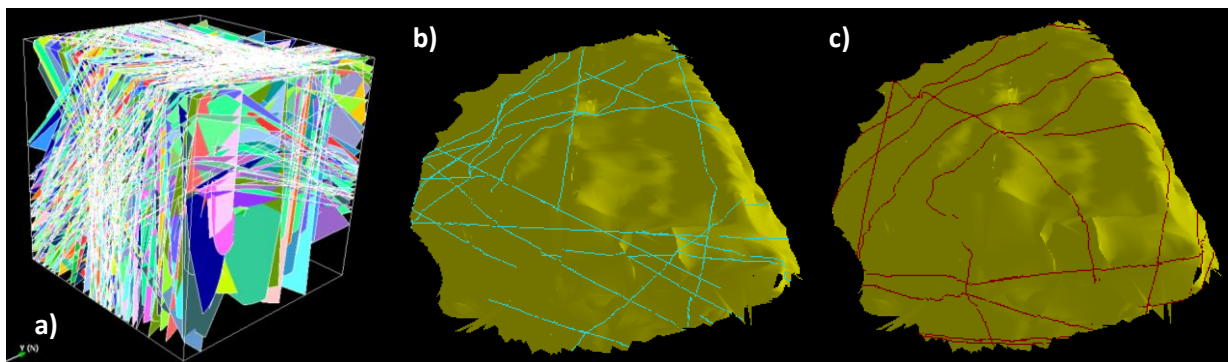
**Figura 4.26** Construcción de una superficie digitalizada de la galería. a) DTM 2715. b) curvas de nivel en 3DM Adams. c) grilla creada en Rhinoceros. d) superficie en FracMan.



**Figura 4.27** a) Estructuras mapeadas, y galería del DTM 2715; b) trazas de datos mapeados; c) ajuste aproximado de la galería para eliminar errores.

Luego de reducida el área de mapeo se procede a intersectar las estructuras mapeadas y las que son producto de las simulaciones con la galería cortada, tal como se observa en la Figura 4.28.

La comparación de los datos observados y simulados se realiza en los *stereonets* de la Figura 4.29 y en la Tabla 4.6. Independientemente de que el cortar la galería puede provocar un aumento en el error asociado, los resultados respaldan el uso de esta metodología y la extrapolación de resultados como una manera de generar modelos del arreglo estructural para tamaños mínimos de estructuras que no se observan en la galería o que por las dimensiones de la ventana de mapeo producen un sobreetimación de los parámetros necesarios para generar los DFN.

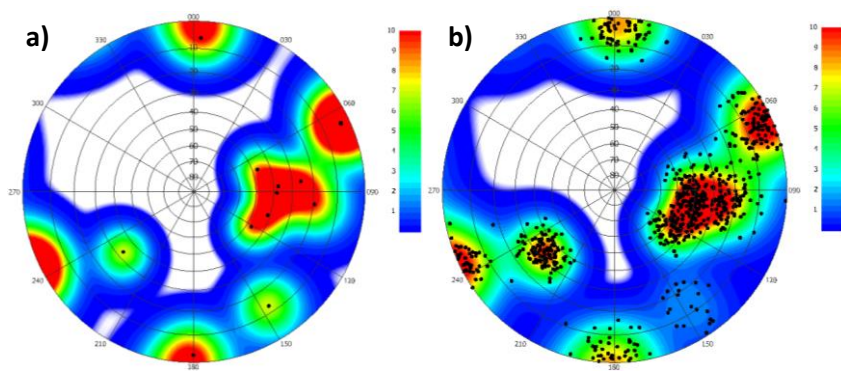


**Figura 4.28** a) Estructuras simuladas (40 iteraciones), b) y c) trazas de las estructuras simuladas intersectadas con fragmento de superficie de galería de DTM 2715, para un par de iteraciones escogidas aleatoriamente.

**Tabla 4.6** Comparación de propiedades entre datos observados y promedio de simulaciones.

Propiedad	Observado	Prom. iteraciones	Error relativo (%)
N° de trazas	14,00	18,25	30
Largo total traza (m)	68,37	66,25	3,1
Media largo traza (m)	0,73	0,67	7,6
Largo traza mínimo (m)	0,002	0,002	2,8
Largo traza máximo (m)	4,06	4,00	1,6
Desv. est. Largo traza (m)	0,90	0,83	8,7
Intensidad P21 (m/m2)	2,39	2,32	3,1

La extrapolación de resultados, además de demostrar ser un método para acceder a tamaños de mínimo de corte que nos permiten el ajuste del parámetro tamaño directamente, corresponde a un examen de la metodología y, junto a la intersección con una parte de la galería ajustada, revela la solidez de los procedimientos utilizados en la simulación de los parámetros necesarios para la construcción de los DFN's en este estudio. Este método de extrapolación, a su vez, corresponde a una herramienta para generar DFN's para tamaños de estructuras de interés en análisis de estabilidad de cuñas.

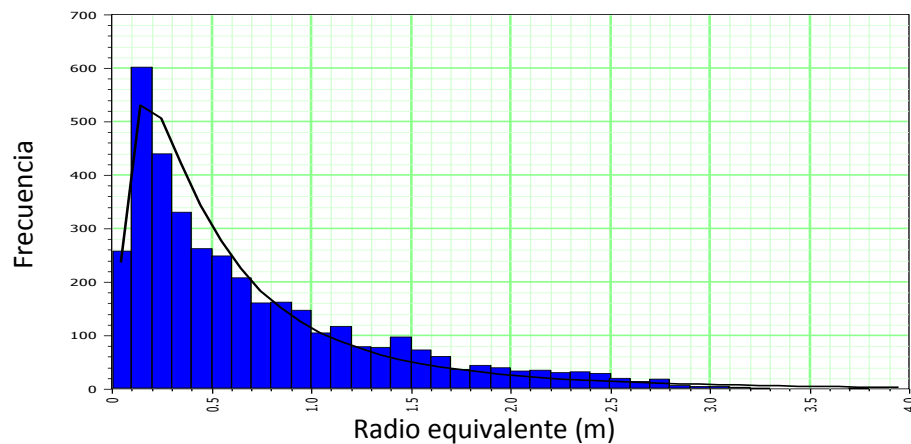


**Figura 4.29** a) *Stereonet* y polos de estructuras mapeadas en galería, b) *stereonet* y polos de estructuras simuladas (40 simulaciones) en galería.

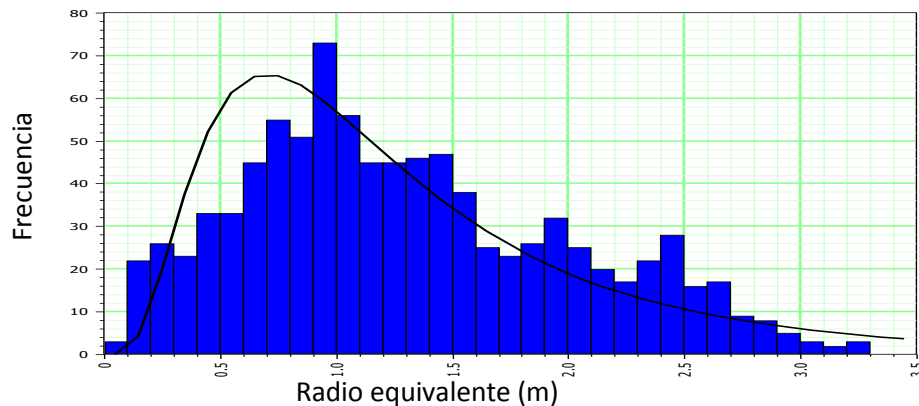
## CAPÍTULO 5: RESULTADOS

### 5.1 Resultados de datos de tamaños mapeados

Los resultados siguientes corresponden a la información extraída directamente del mapeo de los DTM's seleccionados haciendo uso del *software* 3DM Analyst. Los resultados de todos los datos de tamaños mapeados se grafican en histogramas de radio equivalentes para el sector Esmeralda y RENO en las Figuras 5.1 y 5.2, respectivamente. Además, se presenta un ajuste mediante una curva con una forma de distribución ajustada determinada.



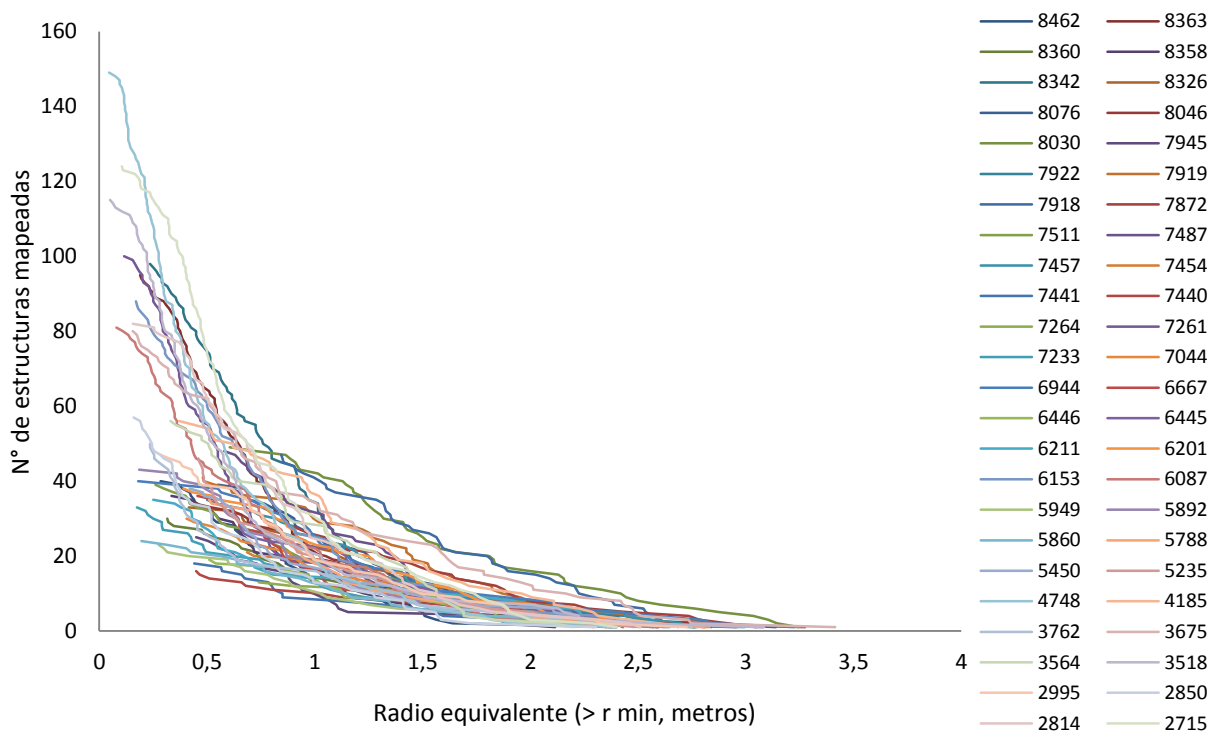
**Figura 5.1** Histograma de radios equivalentes de todas las estructuras mapeadas en el sector Esmeralda (53 DTM, 3852 estructuras). La curva en la figura presenta un ajuste de forma lognormal de parámetros: media 0,76 m y desviación estándar 0,98 m.



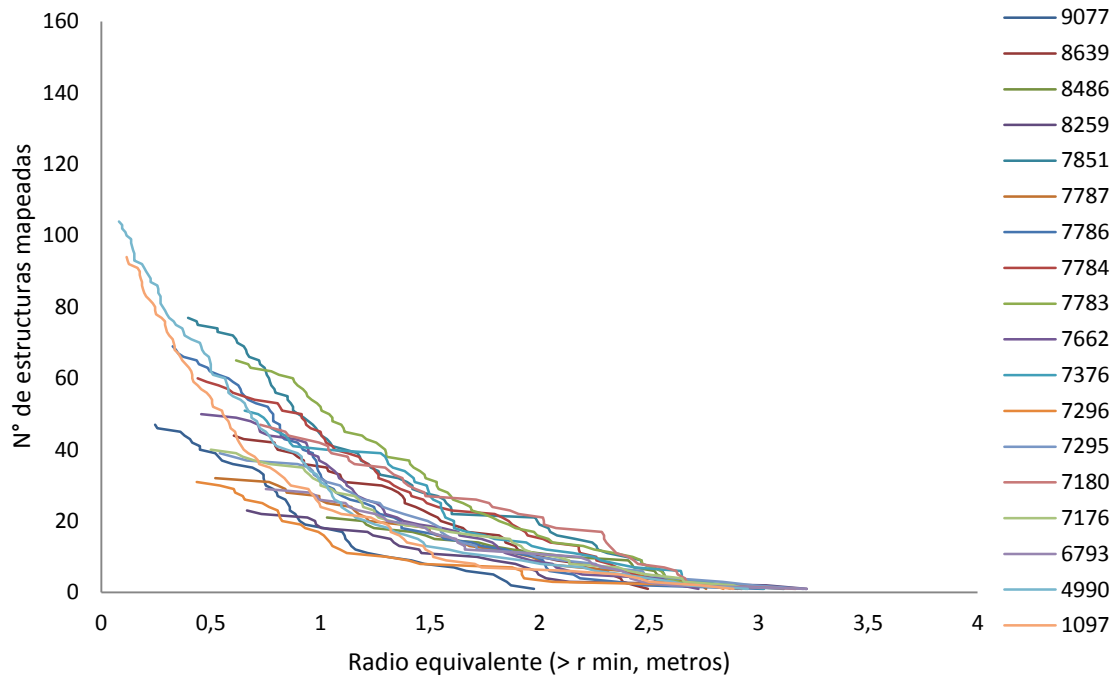
**Figura 5.2** Histograma de radios equivalentes de todas las estructuras mapeadas en el sector RENO (18 DTM, 970 estructuras). La curva en la figura presenta un ajuste de forma lognormal de parámetros: media 1,37 m y desviación estándar 1,02 m.

## 5.2 Resultados de datos de tamaños mapeado por DTM

Los datos mapeados en los DTM de Esmeralda y RENO se presentan a continuación en gráficos de curvas acumulativas inversas (Figuras 5.3 y 5.4). En estos gráficos los ejes de abscisas representan el tamaño mínimo mapeado o radio equivalente mínimo de mapeo y los ejes de ordenadas representan el número de estructuras levantadas a partir de un tamaño (radio) mínimo de mapeo. Cada línea representa una curva acumulativa del mapeo de tamaños de un DTM específico. Estos gráficos muestran los efectos del truncamiento por tamaño mínimo de los mapeos y un sesgo por tamaño muy marcado a partir de tamaños de radio equivalentes inferiores a 0.5 m aproximadamente debido a la complejidad en el levantamiento de estructuras de traza corta en los *stockwork* observados en los DTM. Otros gráficos relacionados a estos mapeos se pueden consultar en la sección 'Anexo F: Gráficos no incluidos en el cuerpo de este informe'.



**Figura 5.3** Radio equivalente mínimo de corte y número de estructuras mapeadas por DTM, mina Esmeralda, sectores 'cabeza' (Hw) y 'patilla' (Fw). Cada línea representa una curva acumulativa inversa de los tamaños mapeados para un DTM específico.

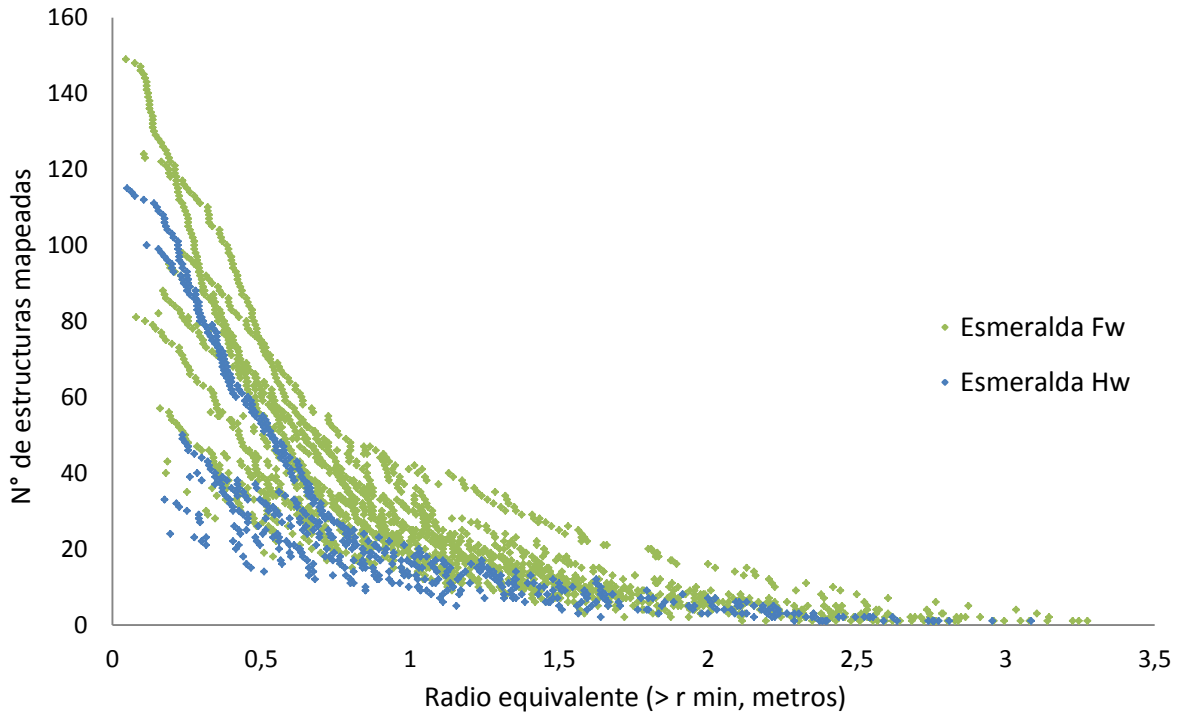


**Figura 5.4** Radio equivalente mínimo de corte y número de estructuras mapeadas, mina RENO. Cada línea representa una curva acumulativa inversa de los tamaños mapeados para un DTM específico.

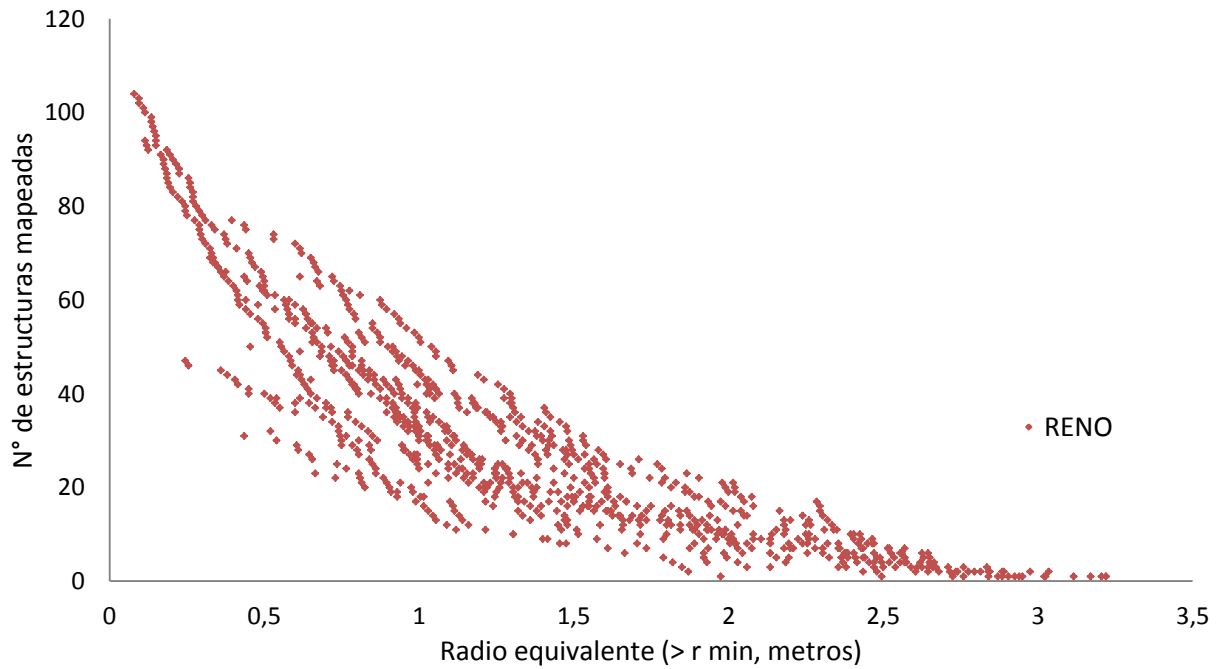
### 5.3 Resultados de tamaños por sector de la mina

Los gráficos presentados en la sección anterior que presentan el N° de estructuras levantadas en función del radio equivalente mínimo de mapeo permiten establecer una idea de la cantidad de estructuras que se pueden levantar para cada sector de la mina lo que, a primera vista, permite visualizar diferencias en los *stockworks* de cada sector. Estos gráficos corresponden a los ya presentados en el en las figuras 5.3 y 5.4, solo que aquí se presentan agrupados por sector de la mina. La Figura 5.5 muestra los resultados para las estructuras levantadas en el sector Esmeralda, tanto el sector ‘cabeza’ (Hw) como el ‘patilla’ (Fw) en un gráfico de N° de estructuras levantadas en función del radio equivalente mínimo de mapeo. Así mismo, en la Figura 5.6 se presenta un gráfico que relaciona las mismas propiedades para el sector Reservas Norte (RENO).





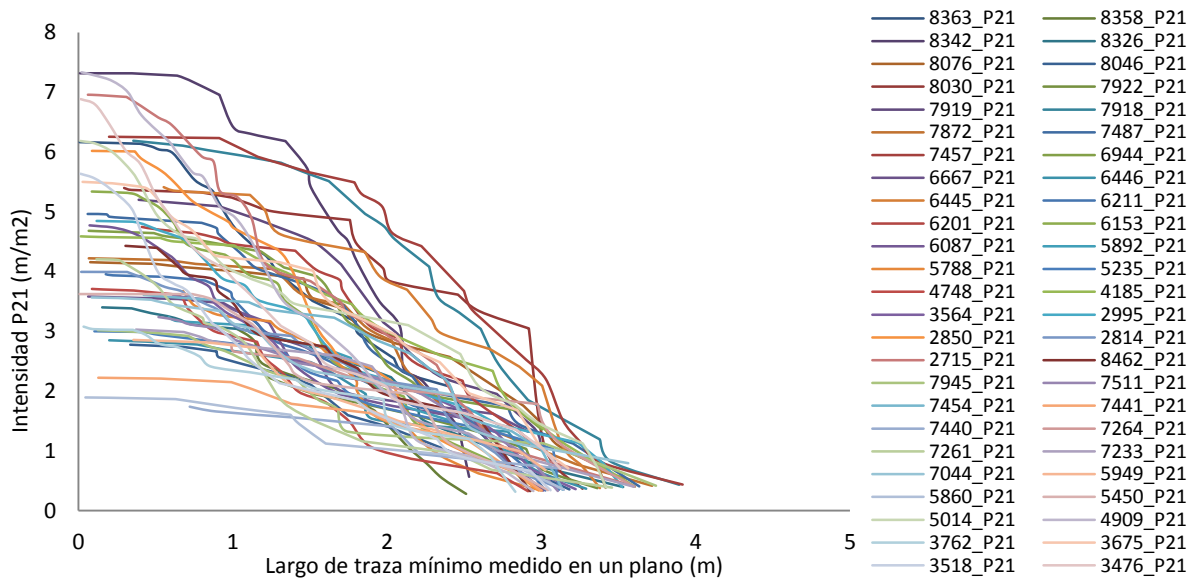
**Figura 5.5** Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio equivalente mínimo de corte mapeado, sectores mina Esmeralda Hw y Esmeralda Fw.



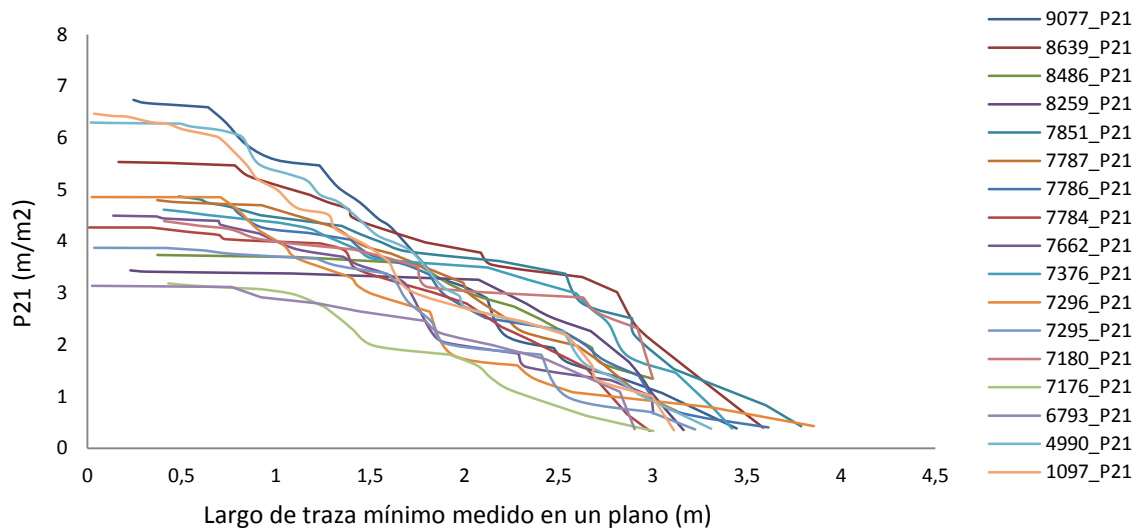
**Figura 5.6** Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio equivalente mínimo de corte mapeado, sector mina RENO.

#### 5.4 Resultados de valores de $P_{21}$ mapeados por DTM

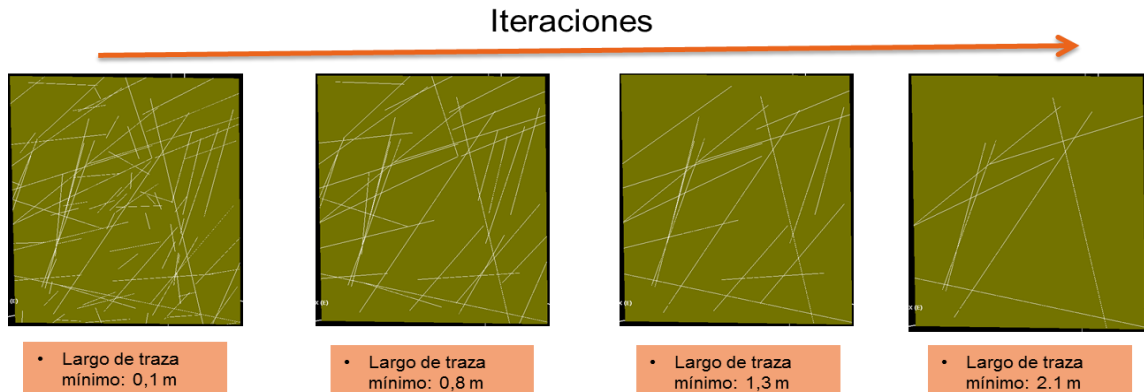
Los valores de intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ), considerando el criterio de largo de traza mínimo, para los distintos DTM mapeados en sectores Esmeralda y RENO de la mina, son graficados en las Figuras 5.7 y 5.8, respectivamente. Un esquema de este criterio de largo de traza mínimo se observa Figura 5.9.



**Figura 5.7** Intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) en función del largo de traza mínimo. Sector Esmeralda. Cada línea resulta a una curva acumulativa inversa para los valores de  $P_{21}$  observados en un DTM específico.



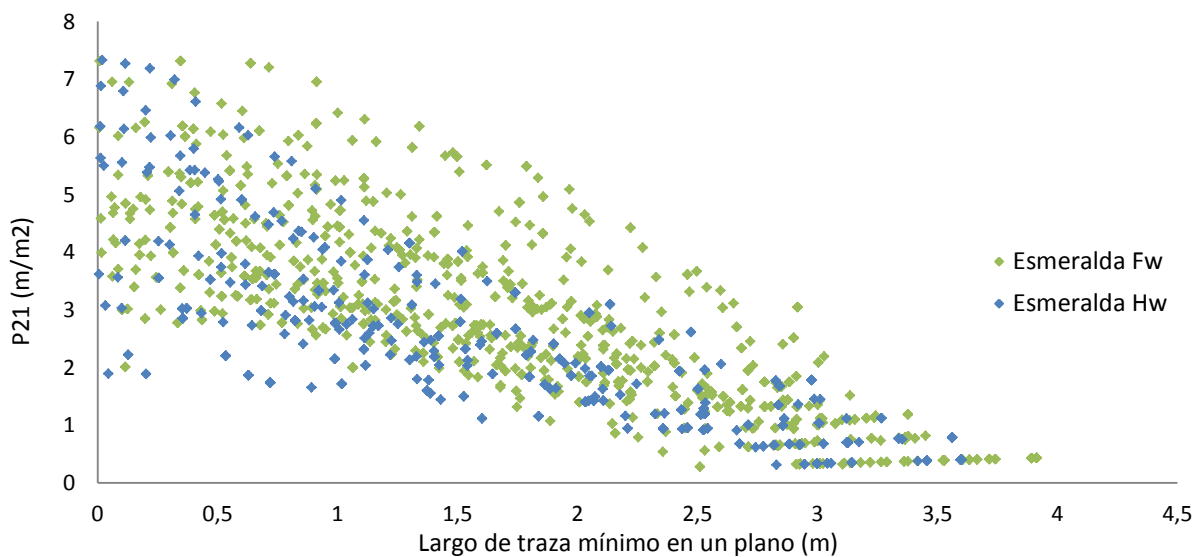
**Figura 5.8** Intensidad  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) en función del largo de traza mínimo. Sector RENO. Cada línea resulta a una curva acumulativa inversa para los valores de  $P_{21}$  observados en un DTM específico.



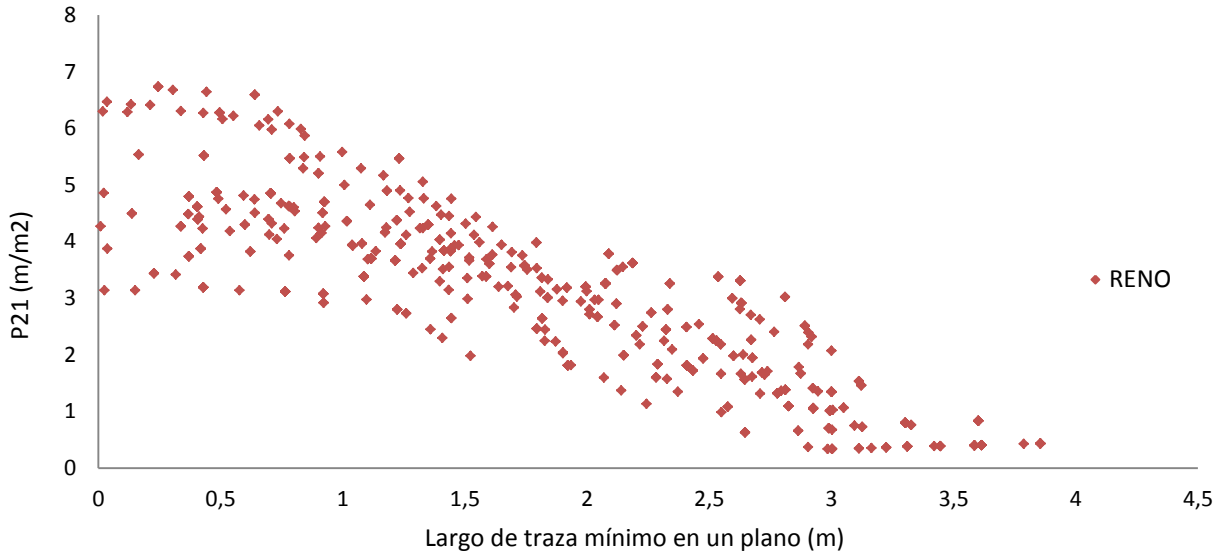
**Figura 5.9** Esquema de procedimiento de simplificación del mapa de trazas a partir del criterio de largo de traza mínimo (m).

### 5.5 Resultados de valores de $P_{21}$ mapeados por sector de la mina

Los resultados de intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  por sector son presentados en gráficos de frecuencia acumulada inversa de N° de trazas contenidas en un plano en función del largo de traza mínimo contenido en dicho plano. Estos gráficos diferencian datos por sector y son otra presentación de los gráficos de las Figuras 5.7 y 5.8. La Figura 5.10 presenta estos resultados para el sector Esmeralda Hw y Esmeralda Fw. Los resultados para el sector Reservas Norte RENO se presentan en la Figura 5.11.



**Figura 5.10** Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) observada en función del largo de traza mínimo de corte contenido en un plano, sectores Esmeralda Fw y Esmeralda Hw.

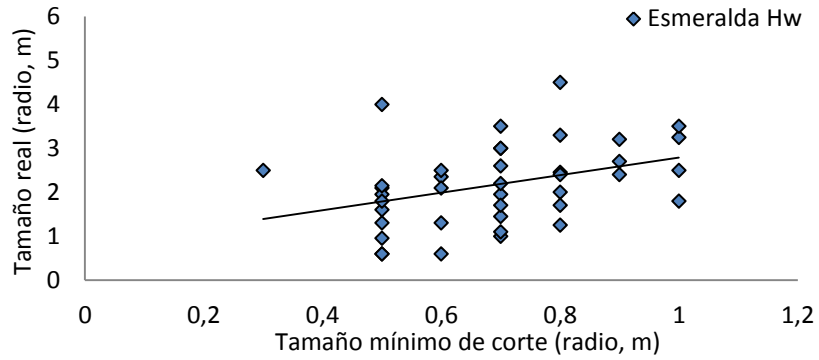


**Figura 5.11** Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) observada en función del largo de traza mínimo de corte contenido en un plano, sector RENO.

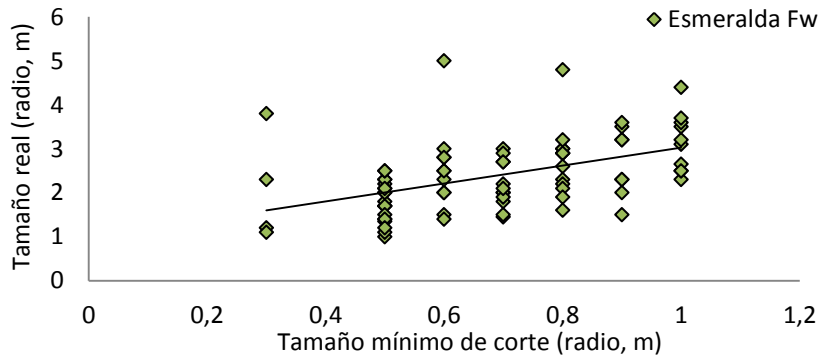
### 5.6 Resultados de la aplicación de la Metodología: Determinación del tamaño.

El tamaño real se refiere a la media de tamaño de radio equivalente ajustado, mediante la aplicación de la técnica del ‘muestreo simulado’ y la solución de la ecuación fundamental de Warburton (1980), para un tamaño mínimo de radio equivalente. Cabe destacar que los resultados a continuación solo incluyen aquellos mapeos con los cuales es posible aplicar la metodología, ya que, en algunos casos las dimensiones de la ventana de mapeo no permiten un buen ajuste. Esta limitación es explicada en la sección ‘6 Discusión’. Las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 presentan los resultados de tamaño real para los sectores Esmeralda Hw, Esmeralda Fw y RENO, respectivamente.

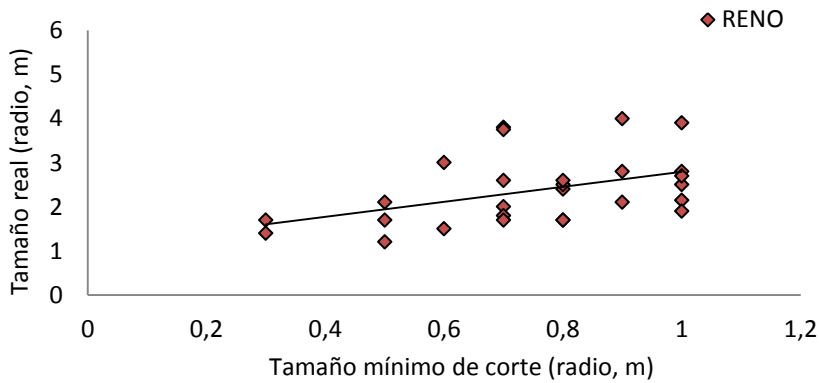
Cada punto de los gráficos a continuación corresponde a un valor de tamaño ajustado para determinado DTM a cierto valor de tamaño de corte mínimo, el detalle se puede revisar en la sección ‘ANEXO E: Tablas de resultados de la aplicación de la metodología’. Los ejes de ordenadas de los gráficos representan la Medias de Tamaños de las estructuras contenidas en los DFNs y los ejes de abscisas representan los tamaños mínimos de las estructuras contenidas en los DFN’s.



**Figura 5.12** Gráfico Tamaño real de radio equivalente (m) en función del Tamaño mínimo de radio equivalente (m), sector Esmeralda Hw.



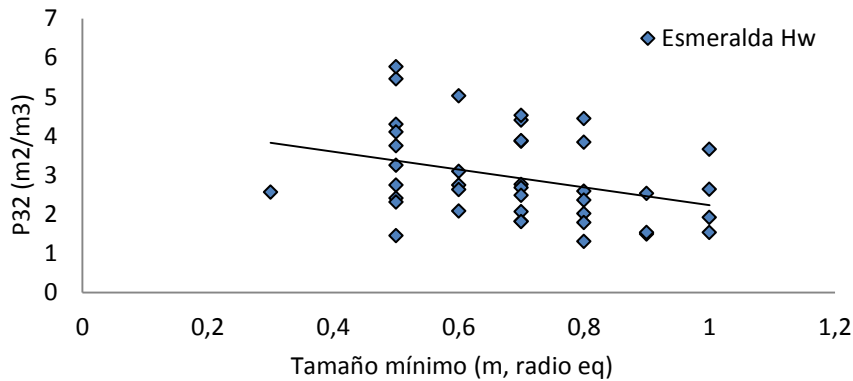
**Figura 5.13** Gráfico Tamaño real de radio equivalente (m) en función del Tamaño mínimo de radio equivalente (m), sector Fw.



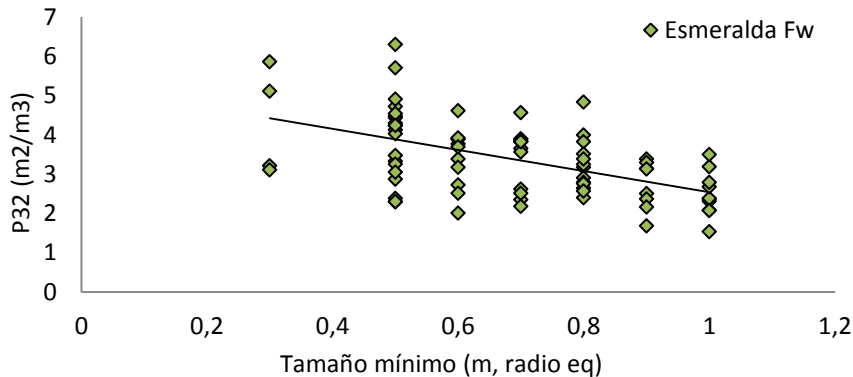
**Figura 5.14** Gráfico Tamaño real de radio equivalente (m) en función del Tamaño mínimo de radio equivalente (m), sector RENO.

### 5.7 Resultados de la aplicación de la Metodología: Determinación del parámetro de Intensidad de Fracturamiento $P_{32}(m^2/m^3)$ .

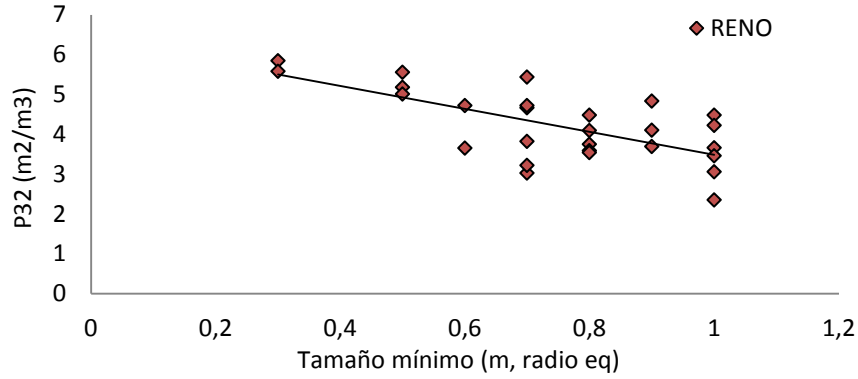
Los resultados de parámetros de intensidad de fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$  se presentan en gráficos que relacionan intensidad de fracturamiento con el tamaño mínimo de radio equivalente. Las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17 contienen los resultados para los tres sectores de la mina analizados. Cada punto en los gráficos corresponde a una aplicación de la metodología: Orientación simulada mediante *Bootstrapping*, Tamaño simulado mediante el método de 'Muestro Simulado' e Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$  modelado mediante la correlación lineal existente entre las distintas medidas de Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}(m/m^2)$  y  $P_{32}(m^2/m^3)$ . Un detalle de estos resultados pueden ser consultados en 'ANEXO E: Tablas de resultados de la aplicación de la metodología'.



**Figura 5.15** Gráfico de Intensidad de fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$  en función del tamaño mínimo de radio equivalente, sector Esmeralda Hw.



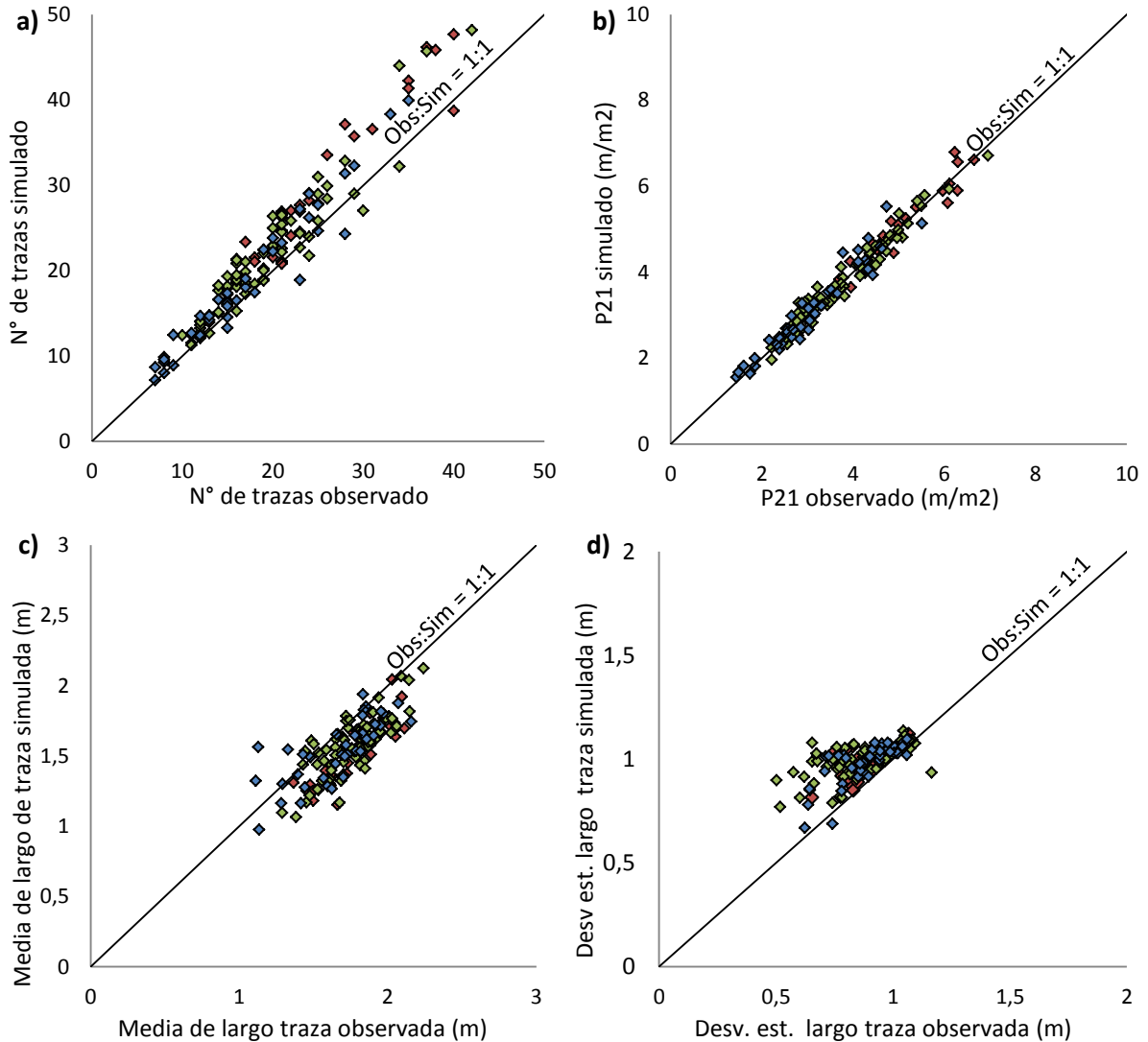
**Figura 5.16** Gráfico de Intensidad de fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$  en función del tamaño mínimo de radio equivalente, sector Esmeralda Fw.



**Figura 5.17** Gráfico de Intensidad de fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  en función del tamaño mínimo de radio equivalente, sector RENO.

### 5.8 Validación de resultados de las simulaciones

A continuación se presentan los resultados del método de validación de simulaciones aplicado a cada uno de los DTM mapeados para un tamaño mínimo de radio equivalente. En la Figura 5.18 se muestran los resultados de las cuatro propiedades que pueden ser observadas en un plano: N° de Trazas contenidas en el plano, Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}(\text{m}/\text{m}^2)$ , Media de Largo de Traza (m) y Desviación Estándar del Largo de Traza (m). La recta de  $45^\circ$  en cada uno de los gráficos representa la relación 1:1 entre valores observados (mapeados) y el promedio de 40 simulaciones.

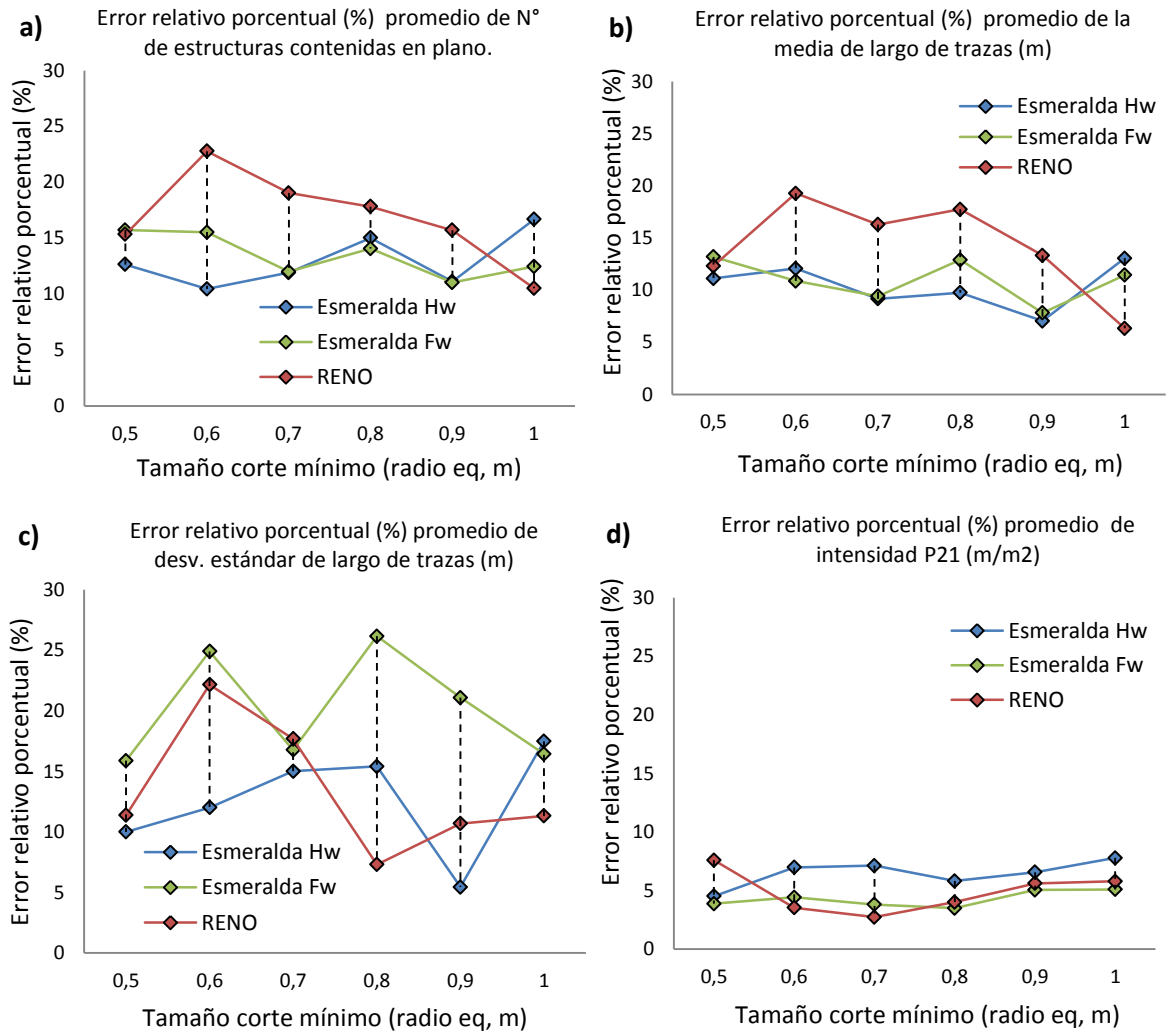


**Figura 5.18** Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones. a) N° de trazas observado-promedio simulaciones, b)  $P_{21}$  observado/promedio simulaciones, c) media de largo de traza/promedio simulaciones, d) Desviación estándar de largo de traza observado/promedio simulaciones. Polígonos azules - Esmeralda Hw, polígonos verdes - Esmeralda Fw, y polígonos rojos - RENO.

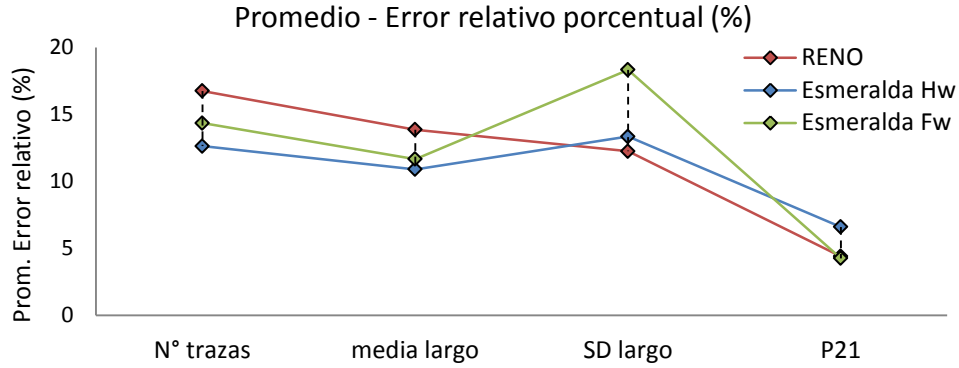
Resultados de los errores relativos porcentuales según el tamaño mínimo de corte para las cuatro propiedades revisadas, según sector de la mina analizado, se pueden observar en la Figura 5.19. Un detalle de los resultados de la evaluación puede ser revisado en 'ANEXO E: Tablas de resultados de la aplicación de la metodología'.



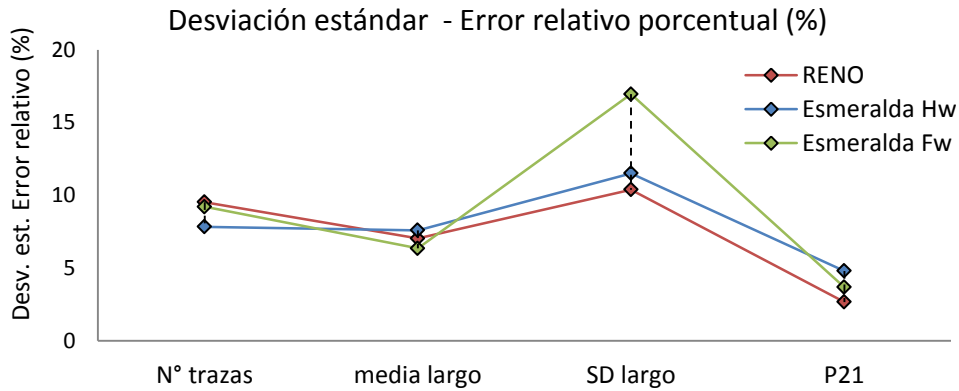
Un resumen del tratamiento del error por sector y propiedad medida se presentan en los gráficos de la Figuras 5.20 y 5.21. En la Figura 5.22 se observa un resumen del error relativo total agrupado por propiedad y en función del tamaño mínimo de corte.



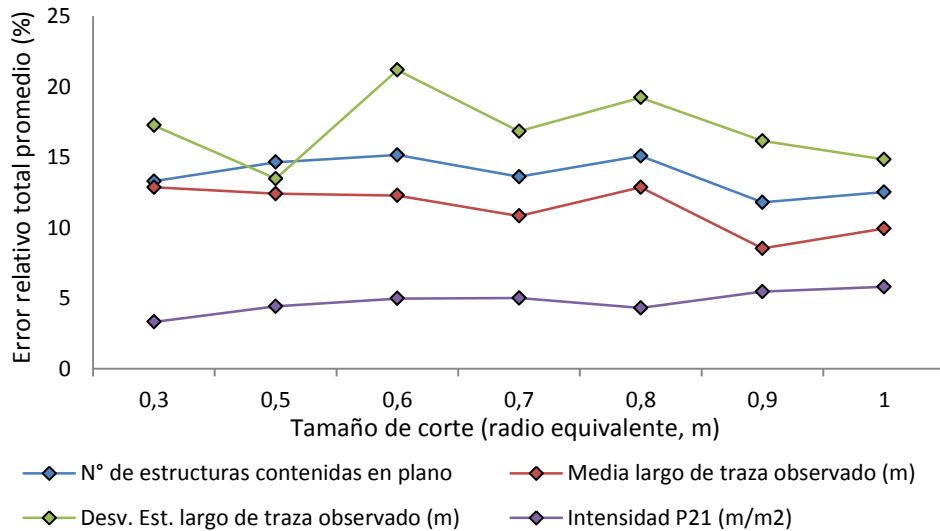
**Figura 5.19** Gráficos de Error relativo porcentual según el tamaño mínimo de corte (radio equivalente mínimo) para las propiedades medias en el plano (ventana de muestreo). a) N° de estructuras contenidas en un plano, b) Media de largo de trazas contenidas en un plano, c) desviación estándar del largo de trazas contenidas en un plano, d) Intensidad de fracturamiento  $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>).



**Figura 5.20** Promedio de los errores relativos de todos lo mapeos agrupados por propiedad medida. Tres sectores de la mina.



**Figura 5.21** Desviación estándar de los errores relativos de todos lo mapeos agrupados por propiedad medida. Tres sectores de la mina.

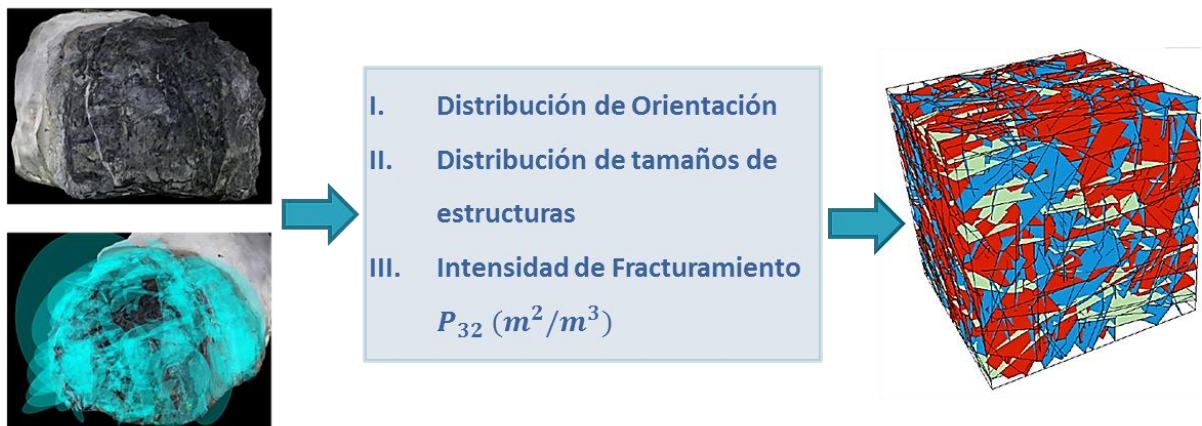


**Figura 5.22** Error relativo porcentual total de las 4 propiedades medidas en el plano de muestreo para los tres sectores analizados en función del tamaño de corte mínimo (radio equivalente).

## CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

### 6.1 Metodología de Trabajo

El principal aspecto a discutir en este estudio trata sobre la validez de la Metodología presentada la cual conduce a la mejor representación obtenida del arreglo estructural de un *stockwork* observado en un DTM. Esta Metodología consiguió, a partir de información levantada mediante métodos de fotografía 3D, una representación estocástica del arreglo estructural. Esto mediante el ajuste de los tres parámetros necesarios para la construcción de un DFN (ver Figura 6.1).



**Figura 6.1** Esquema resumen de la metodología presentada en este estudio. De izquierda a derecha: levantamiento estructural mediante métodos de fotografía 3D, ajuste de los parámetros necesarios para la construcción de un DFN, Modelo estocástico o DFN que representa mejor los datos mapeados (esquema confeccionado por el autor de este trabajo).

Los resultados de la evaluación de las simulaciones presentados en ‘5.7 Validación de resultados de las simulaciones’ muestran una fuerte correlación de las propiedades observadas y simuladas en la ventana de mapeo/simulación. Correlación observada en la baja dispersión de los puntos en torno a la curva de relación 1:1 entre valores observados y promedios de simulaciones (ver Figura 5.17). Un detalle de la discusión de estos gráficos se puede consultar en la sección ‘ANEXO C: Comentario sobre la evaluación de la metodología’. Además, los errores relativos porcentuales observados en los gráficos de la Figura 5.18 muestran que para

la propiedad medida Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) estos errores no superan 8%, y que la propiedad que mayor error relativo muestra corresponde a la Desviación Estándar de Largo de Traza (ésta alcanza hasta un 25% de error relativo porcentual, pero cabe mencionar que corresponde a una propiedad de difícil ajuste). El gráfico de la Figura 5.21 muestra el resumen de los errores totales promedio para cada propiedad medida. En éste se observa que los errores son relativamente independientes del tamaño mínimo de estructura considerado. Estos resultados avalan el uso de esta metodología, y muestran el cumplimiento del objetivo principal planteado en este estudio.

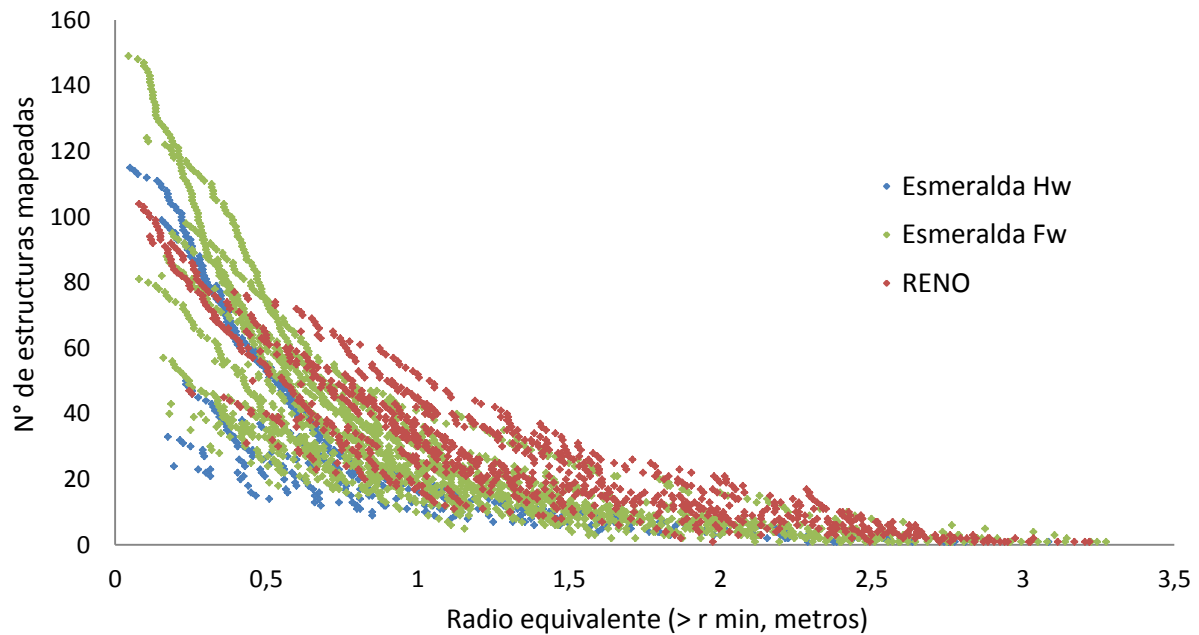
Es importante destacar que los Modelos Digitales de Terreno o DTM's mapeados representan una muestra aleatoria de la población. Pese a que dicha muestra se construye bajo un patrón de selección sistemática donde cada miembro se selecciona con criterios de calidad y litológico, dicha muestra es representativa debido a que las variables de interés (propiedades geométricas del *stockwork*) para este estudio no son controladas, por lo que el criterio de aleatoriedad en la selección de los DTM's se cumple.

## 6.2 Resultados de la Aplicación de la Metodología de Trabajo

Respecto al levantamiento de estructuras mediante círculos, la visualización de sus resultados permite reconocer diferencias entre los *stockworks* observados de distintos sectores de la mina. Los gráficos que mejor representan estos resultados corresponden a los de 'Frecuencia acumulada inversa v/s Número de estructuras levantadas' explicados en la sección '5 Resultados'. La Figura 6.2 muestra un resumen de toda la información de tamaños mapeados en este estudio, para los tres sectores de la mina analizados.

En este gráfico se puede observar que, por ejemplo, para un tamaño de radio equivalente mínimo de 1 m se levantaron entre 13 y 40 estructuras en los DTM's perteneciente al sector Esmeralda 'Fw', mientras que para el caso de los DTM's perteneciente al sector Esmeralda 'Hw', se levantaron entre 10 y 20 estructuras mayores a 1 m. Esta tendencia se observa a lo largo de todo el rango de tamaños, en mayor medida entre 0,7 a 2 m de radio equivalente mínimo de mapeo. Los datos para los radios equivalentes mapeados en RENO indican un rango mayor en el número de estructuras mapeadas por valor de radio mínimo truncado. Donde, por ejemplo, para un valor de radio equivalente mínimo de 1 m se levantaron entre 16 y 55 estructuras. Es complejo concluir algo respecto a tamaños de radio equivalente mapeados

menores a 0,5 m dado el sesgo en el levantamiento de estructuras pequeñas por lo que este rango de tamaños se ignora en este análisis.



**Figura 6.2** Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio equivalente mínimo de corte mapeado, tres sectores de la mina.

Luego, es posible establecer que, según los datos levantados en este estudio, el sector Reservas Norte (RENO) presenta un promedio de ‘Densidad de estructuras’ mayor a los sectores de la mina Esmeralda. Por otro lado, es Esmeralda ‘Hw’ el que presenta un promedio de ‘Densidad de estructuras’ menor que los otros sectores para todo el rango de tamaños en la Figura 6.2. El Término ‘Densidad de fracturamiento’ se refiere a una medida de conteo de fracturas en un espacio lo cual, pese a no entrega tanta información como las medidas de Intensidad de Fracturamiento que se introdujeron en este trabajo, refleja diferencias en los *stockworks* de distintos sectores.

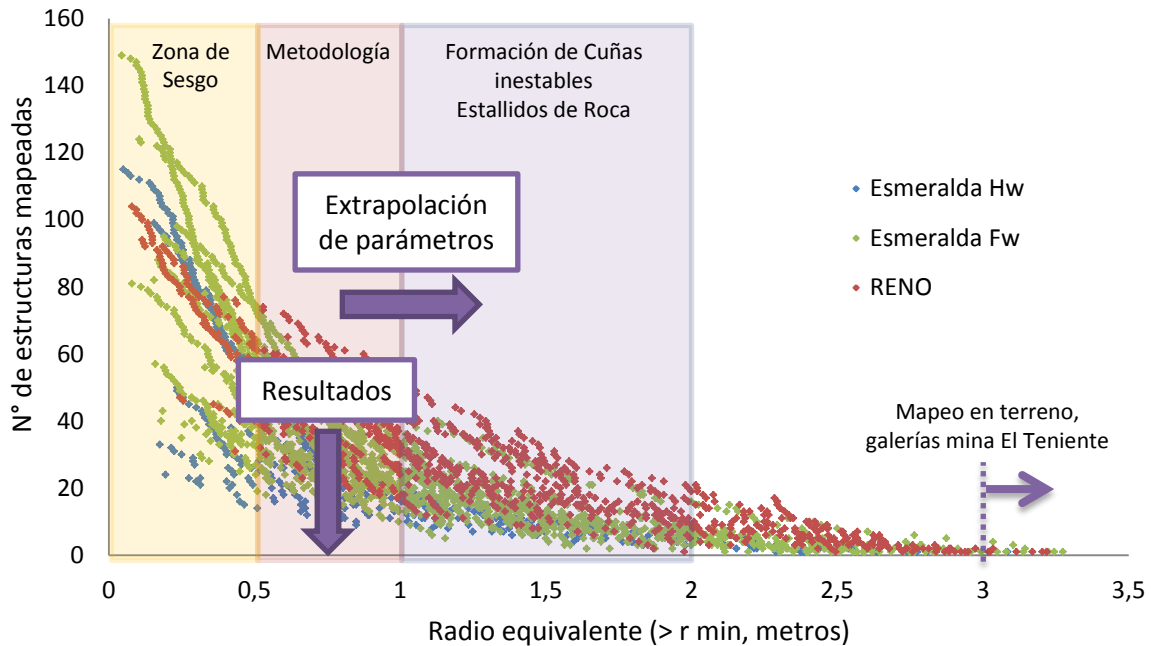
Para tamaños mayores a 2,5 m de radio equivalente mínimo la brecha se acorta entre los sectores, lo que implica que para tamaños que cruzan una labor (una estructura de 5 m de radio generalmente cruza gran parte de la galería en un DTM) el número de estructuras es similar en los sectores aunque siempre se levantan más estructuras de gran tamaño en Esmeralda ‘Fw’ y RENO. Estos gráficos no incluyen aquellos mapeos que sobrepasan las 150 estructuras debido a que distorsionan mucho su visualización.

En el caso del sector Esmeralda, estas diferencias en la densidad de estructuras indican una diferencia notable entre los *stockworks* de ambos sectores de la mina (Esmeralda 'Hw' y 'Fw'). Esto coincide con las observaciones hechas en informes internos de la división donde se han establecido valores para Intensidad de Fracturamiento lineal  $P_{10}$ (ff/m) distintos para cada sector, donde el CMET para el sector Esmeralda Hw tiene un  $P_{10}$ (fr/m) de 4,5 (ff/m) y el sector Esmeralda Fw tiene un  $P_{10}$ (fr/m) de 5,9 (ff/m) (GRMD-SGL.INF-61-2014). Es importante destacar que los resultados de intensidad de fracturamiento lineal  $P_{10}$ (fr/m) están basados en el mapeo de vetillas blandas (de dureza menor a 3 en la escala de Mohs) en sondajes, en cambio los mapeos llevados a cabo en este estudio no discriminan las vetillas respecto a su relleno mineralógico. Pese a esto, se observa cierta congruencia en los resultados.

El levantamiento de estructuras fue construido considerando las distintas fuentes de sesgos que podían influir en los datos recogidos. La generación de un sistema de mapeo que considere el factor de sesgo por Largos de trazas pequeñas permitió establecer cualitativamente un límite inferior de representatividad en los datos, límite que se estableció en un radio de 0,5 m. Bajo los 0,5 m se consideró, en este estudio, como zona de sesgo por levantamiento de estructuras de trazas cortas. Por lo tanto, este rango no fue utilizado en la aplicación de la metodología. Esto se puede observar en el polígono amarillo de la Figura 6.3 que establece esta zona de sesgo.

Aunque estas diferencias corresponden a un grupo de 71 DTM's que representan una muestra reducida de los *stockworks* de la mina, se establece que comparaciones hechas para tamaños de radio equivalente mínimo mayores a un 1 m son lo suficientemente confiables como para establecer diferencias ya que los sesgos en levantamiento de estructuras se esperan reducidos desde este tamaño mínimo de mapeo.

El gráfico de la Figura 6.3 muestra el rango en que se hacen las observaciones al interior de la mina, y que corresponde a la línea segmentada a la derecha de éste. También muestra el rango en que fue aplicable la metodología presentada en este estudio (debido a limitaciones por sesgo y dimensiones de la ventana de mapeo). Esto está marcado por el polígono rojo con la leyenda 'Metodología'. Por último, el polígono azul corresponde al rango de tamaños de estructuras que controlan los problemas de inestabilidad a escala de galerías en la mina El Teniente. Ya que la metodología no es aplicable en este rango, solo se accedió ella mediante la extrapolación de los parámetros de Tamaño Real y de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$ ( $m^2/m^3$ ), aspecto presentado en '4.9 Extrapolación de parámetros de Tamaño real e Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$ ( $m^2/m^3$ )'.

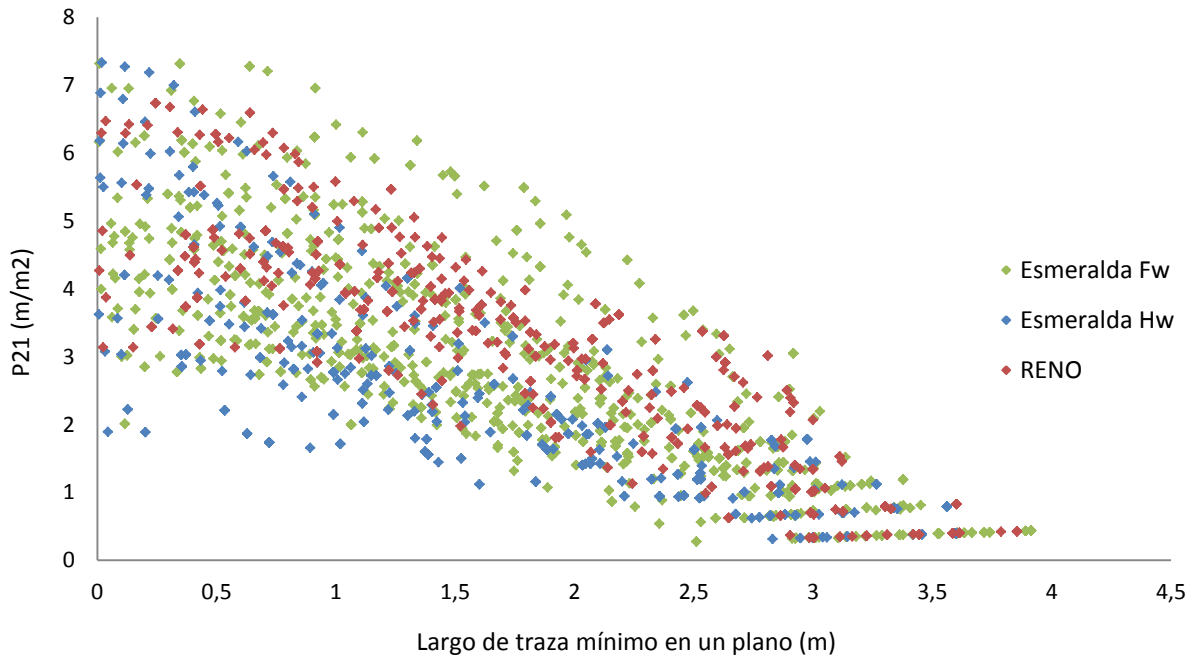


**Figura 6.3** Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Número de estructuras mapeadas en función del radio mínimo de corte de mapeo. Tres sectores de la mina. Metodología.

Aunque la ventana de observación del *stockwork* al interior de las galerías es limitada, es posible establecer diferencias. Si consideramos los resultados de medir la intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) a partir de intersección de las estructuras mapeadas con un plano de  $3 \times 3$  m, podemos observar que existe una diferencia entre sectores que apoya lo ya presentado y discutido anteriormente: en sus distintas medidas, la intensidad de fracturamiento en Esmeralda Fw es mayor que en Esmeralda Hw. Diferencia que varía dependiendo del largo de traza mínimo considerado pero que se mantiene en todo el rango de largos de traza (ver Figura 6.4).

En las curvas de 'Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) - Largo Traza Mínimo contenido en un plano (Figura 6.4)' se puede ver una tendencia a la horizontalidad para largos de traza menores a 0,7 m aproximadamente (ver Figura 6.4). Este efecto se debe al ya comentado sesgo por tamaño. Como el mapa de trazas es orientado al azar respecto a las características del *stockwork* del macizo rocoso (su dirección está condicionada por la dirección de la galería), se cumple con la condición de que es más probable que una estructura de gran tamaño corte dicho plano que una pequeña lo haga. Luego, un aumento en el tamaño de la estructura provoca un aumento relativo (no es absoluto por factores de dirección y posición de las

discontinuidades) del largo de la traza observado, y debido a esto, aumenta también la pendiente negativa de la curvas acumuladas inversas de  $P_{21}$  (ver Figura 6.4).



**Figura 6.4** Gráfico de frecuencia acumulada inversa. Intensidad de fracturamiento  $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>) observada en función del largo de traza mínimo de corte contenido en un plano, tres sectores de la mina.

Respecto a los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología para la obtención del Tamaño Real de la estructura (ver '5.5 Resultados de la aplicación de la Metodología: Determinación del tamaño real'), es destacable que para los tres sectores las curvas de los gráficos de las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 tienen una tendencia similar creciente y que en los tres gráficos se observa una gran dispersión en la 'Medias de Tamaño Real'. Esta dispersión viene a reflejar la gran variabilidad observada en las geometrías de los *stockworks*, lo que corresponde a un resultado esperado y planteado en la descripción del problema de este estudio. Por otro lado, las figuras 5.14, 5.16 y 5.17 reflejan, a su vez, una gran variabilidad en los valores de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}$ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) respecto al tamaño mínimo considerado. Esto refleja que para un mismo sector existen grandes variaciones en la geometría del *stockwork* observado, lo que apoya la necesidad de contar con la metodología presentada en este estudio.



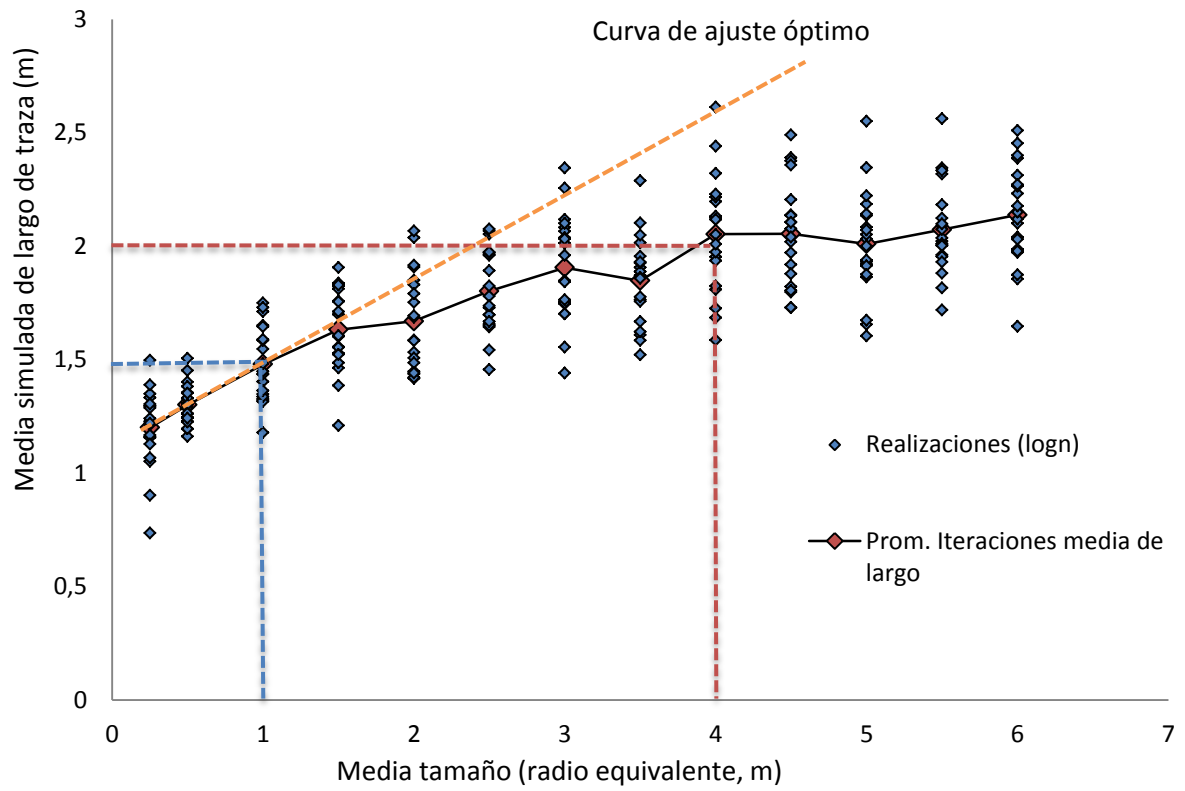
### 6.3 Limitaciones de la Metodología

Las limitaciones ligadas al levantamiento de estructuras son conocidas y propias de cualquier metodología que intenta resolver este problema. Los sesgos en el mapeo de largos de trazas son discutidos en la sección 'ANEXO A: Sesgos en levantamiento de información estructural' y esta metodología se caracteriza por considerarlos y reducirlos.

Por otro lado, es importante resaltar la limitación impuesta por las dimensiones de la ventana de mapeo/simulación. Al ser una ventana cuadrada de  $9 \text{ m}^2$  el valor de máximo para un largo de traza está restringido a ser de 4,24 m de longitud, en el caso ideal de una traza diagonal a la ventana cuadrada de mapeo. Esta restricción provoca que estructuras de tamaños mayores no se vean reflejadas en la ventana sino que se ven censuradas. Este efecto limita fuertemente a la simulación de los largos de traza y a la obtención del tamaño real de la estructura, ya que, a mayor largo de traza observado hay una sobreestimación del valor de tamaño.

Esto se observa en la disminución de la pendiente de la curva del gráfico de simulación del tamaño de estructuras en la Figura 6.5. Para trazas observadas de baja longitud (línea segmentada azul, en la Figura 6.5) hay un relativo buen ajuste del tamaño, pero a medida que aumenta la media de largo de traza observado (línea segmentada en rojo, en la Figura 6.5), ocurre la sobreestimación de la media del tamaño de la estructura debido a la limitación impuesta por el tamaño de la ventana.

Luego, para tratar de disminuir este error, solo se hicieron cálculos de ajuste para tamaños de corte mínimo entre 0,5 y 1 m de radios equivalente con el fin de que el largo de traza observado no sobreestime el tamaño, tratando de solo utilizar el segmento lineal inicial de las curvas tamaño estructura – largo de traza. El límite inferior de 0,5 m se establece para evitar el claro sesgo por tamaño mínimo observado para valores de radio equivalente menores a 0,5 m, asunto ya discutido a lo largo de este trabajo.



**Figura 6.5** Efecto de sobreestimación del tamaño de estructura debido al efecto tamaño de la ventana de mapeo. La línea segmentada naranja corresponde a la línea de ajuste óptimo esperado. La línea segmentada azul presenta un buen ajuste, en cambio, la línea segmentada roja sobreestima los parámetros de tamaño.

# CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 7.1 Conclusiones

1. Los resultados de la aplicación de la metodología de trabajo presentada en este estudio muestran una consistencia entre las propiedades del *stockwork* observadas y simuladas. Esto avala el uso de esta metodología para lograr una mejor representación del arreglo estructural en 3D. Los errores asociados al método no sobrepasan el 5% cuando se trata la intensidad de fracturamiento  $P_{21}(m^2/m^3)$ . Esto demuestra la validez de esta metodología al representar estocásticamente lo observado en galerías de la mina El Teniente.
2. Dado que la metodología cumplió con lo esperado, fue posible aplicarla para capturar la naturaleza propia del *stockwork* en cualquier lugar de la mina.
3. La generación de DFN a partir del ajuste de los parámetros de las distribuciones de orientación, tamaño e intensidad de fracturamiento mediante la metodología presentada, corresponde a una herramienta útil ya que permite extrapolar los parámetros de intensidad con el fin de representar el arreglo estructural a escalas no visibles en las galerías pero basados en las observaciones de galería.
4. Las diferencias en la Intensidad de Fracturamiento y en la media de tamaño de estructura dentro de un mismo sector revelan una gran variabilidad en las geometrías de los *stockworks*. Esto corresponde a algo que esperaba ser determinado y que se sustenta con observaciones directas al interior de la mina.
5. Existe una diferencia entre los *stockworks* de distintos sectores de la mina evidenciado en los resultados de número de estructuras levantadas según un tamaño mínimo y en los resultados de intensidad de fracturamiento  $P_{21}(m/m^2)$  observado según un largo de traza mínimo. En general los resultados indican que el sector Esmeralda Hw posee una densidad de estructuras menor al sector Esmeralda Fw. También Esmeralda Fw presenta una intensidad de fracturamiento, en sus distintas dimensiones, mayor a la de Esmeralda Hw. Los resultados de RENO indican que su densidad de estructuras es generalmente mayor pero al igual que intensidad de fracturamiento  $P_{21}(m/m^2)$  mayor a Esmeralda Fw. Este mismo orden se observa en los resultados de intensidad de fracturamiento volumétrico  $P_{32}(m^2/$

$m^3$ ). No obstante, la ventana de observación de  $9 m^2$  no permite ser concluyente en este aspecto, ya que grandes estructuras se encuentran censuradas.

6. La fotogrametría puede ser efectivamente aplicada como herramienta de obtención de datos para el desarrollo de modelos del arreglo estructural (DFN) del macizo rocoso. El *software 3DM Analyst* ofrece una herramienta eficiente para el levantamiento estructural en DTM's. Este estudio muestra el detalle alcanzado con un promedio de 68 estructuras levantadas por DTM.
7. En general, los DTM del sector Esmeralda Fw muestran una calidad mejor que los pertenecientes al sector Esmeralda Hw, pero ambos poseen una calidad por mucho inferior a los pertenecientes al sector RENO. Esto influye en que la dispersión de los resultados de RENO sea mucho menor que en los resultados mostrados por Esmeralda Fw, lo que provoca que las medias de éste último se vean subestimadas respecto a las medias de RENO, para distintas propiedades tanto 2D como 3D.
8. El mapeo de trazas de estructuras en galería a partir de círculos planos es una buena aproximación del tamaño observado, además de definir bien las trazas observadas.
9. El método *bootstrapping* entrega muy buenos resultados al modelar la distribución de las orientaciones de las estructuras. Al comparar *stereonets* de los planos ajustados al frente de desarrollo y obtener los polos de las estructuras que cortan aquellos planos, los resultados son aún más representativos de los observado, tanto en la distribución como en el número de polos.
10. El 'Muestreo Simulado' representa un método efectivo en la obtención de los parámetros de tamaño a partir de datos observados. Este método se ve limitado por el tamaño de la ventana de observación pero fue posible resolver aquel problema acotando el rango de tamaños entre 0,3 y 1 m de radio equivalente mínimo para aplicar la metodología.
11. La intensidad de fracturamiento  $P_{32}(m^2/m^3)$ , calculada mediante la correlación lineal con la intensidad de fracturamiento  $P_{21}(m^2/m^3)$ , proporciona un valor de gran utilidad para caracterizar el arreglo estructural de sectores en 3D.

## 7.2 Recomendaciones

1. Un producto de mucha utilidad es el lograr integrar los resultados arrojados por la metodología aplicada a escala de galerías con análisis de estabilidad y de probabilidad de generación de cuñas. FracMan cuenta con herramientas para hacer estos análisis, como también es posible llevarlo a cabo con otros *softwares*. No obstante, no todas las estructuras participan en los factores decisivos que afectan la labor minera. Por lo que se requiere determinar estos parámetros para vetillas blandas, lo cual es posible hacerlo mediante el mapeo de DTM en *3DM Analyst* pero con un error asociado alto. Una solución sería lograr integrar la información de mapeo de vetillas blandas en sondajes con la metodología revisada en este trabajo.
2. Para solucionar el problema de las dimensiones de la ventana de mapeo, que es la principal limitación que se observa en este estudio, las opciones siguientes son posibles:
  - a. Mapear galerías de mayores dimensiones, como las pertenecientes a los niveles de Acarreo y/o Nuevo Nivel Mina. mediante esta opción es posible intersectar ventanas de dimensiones mayores (ejemplo 6x6 m).
  - b. Mapear las estructuras que cortan al menos media galería de los DTM acoplados construidos por geólogos en la actualidad. Luego, se puede utilizar un plano subvertical paralelo a la dirección de la galería que pase por el centro de esta para generar el mapa de trazas de grandes dimensiones y hacer los ajustes necesarios, solucionando el problema del tamaño de la ventana. Es un análogo digital de una línea de mapeo pero con mucho mejor detalle y con información de tamaños, no solo trazas. Para esto es necesario generar estos DTM acoplados en las zonas de interés.
  - c. Utilizar las superficies de las galerías digitalizadas en *Rhinoceros* obtenidas de *3DM Analyst* como ventanas de mapeo. Esto significa aplicar exactamente la misma metodología pero a superficies “reales”. Esto resuelve el problema de las dimensiones de la ventana de mapeo y los sesgos direccionales existentes. Para poder aplicar esta propuesta es necesario que FracMan reconozca en sus macros estas superficies de galerías como si fueran planos, ya que pruebas realizadas demostraron este impedimento. De igual manera, se puede trabajar con galerías generadas en FracMan simplificadas e “ideales” de dimensiones similares a las reales.

- d. Realizar una cantidad considerable de ensayos virtuales en FracMan hasta obtener una ley empírica que resuelva el valor de la media de largo de traza real  $\mu_l$  a distintas escales y que pueda ser aplicada directamente a la ecuación de Warburton (1980), mediante mapeos en ventanas cuadradas. Esto para galerías de la mina El Teniente y para distintas litologías y sectores de la mina. En la bibliografía consultada hay ejemplos de este tipo de resultados pero no siempre son aplicables a las geometrías de los *stockworks*.
- e. Utilizar el método analítico propuesto por Zhang & Einstein (2000) para ajustar el tamaño real mediante un mapeo de ventanas circulares múltiples. FracMan aplica este método analítico pero sus resultados son ajustados mediante una ventana circular única lo que provoca una gran dispersión en los resultados dependiendo de la posición de la ventana o de sus dimensiones. Mauldon *et al.* (2000) propone un método basado en estimadores de la media de largo de traza, densidad e intensidad de intensidad fracturamiento, y a partir de del mapeo en ventanas circulares múltiples, resuelve un espacio parametral estadístico donde la probabilidad de encontrar los valores reales puede ser calculada.
- f. A partir del mapeo de trazas de un DTM en 3DM *analyst*, éstas se pueden utilizar para establecer una relación entre  $P_{32}(m^2/m^3)$  y  $P_{21}(m^2/m^3)$  similar a la correlación lineal de estos parámetros utilizada en este estudio pero aplicada a galerías digitalizadas. Esto permitiría establecer el valor de fracturamiento de forma directa para luego proceder a ajustar el tamaño.

## BIBLIOGRAFÍA

**3DM Analyst System - El Teniente. 2011.** Sistema de fotogrametría digital en desarrollos subterráneos. Implementación en Mina El Teniente. (Inédito). Unidad de Geotecnia, Superintendencia de Geología, Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo, División El Teniente, CODELCO-Chile.

**Aguirre, L. 1960.** Geología de Los Andes de Chile Central. Provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. vol. 9.

**Álvarez, L. 1990.** Perfil de alteración y mineralización Supérgena en el yacimiento El Teniente, Rancagua, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 99 pp., Antofagasta.

**Arévalo, A. y Floody, R. 1995.** Modelo global de alteración y mineralización. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 158 pp., Rancagua.

**Arévalo, A., Floody, R. y Olivares, A. 1998.** Modelo geometalúrgico. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo (GL-133/98). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 76 pp., Rancagua.

**Arredondo, C. 1994.** Distribución, caracterización y génesis de los cuerpos de brecha ubicados en el sector central este del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 99 pp., Santiago.

**Baecher, G. N., Lanney, N. A. 1978.** Trace length biases in joint surveys. In: Proceedings of the 19th US Symposium on Rock Mechanics, vol. pp. 56-65.

**Baecher, G. N., Lanney, N. A., Einstein, H. H. 1977.** Statistical description of rock properties and sampling. In: Proceedings of the 18th US Symposium on Rock Mechanics, 1977. 5C1-C8.

**Benado, D. 2010.** Levantamiento de información geológica básica: Evaluación técnica del sistema 3DM Analyst, en mina El Teniente. Nota Interna. CODELCO Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología.

**Birch, J. S. 2006.** Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite for Rock Face Characterisation. Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization. ARMA, American rock mechanics Association. ADAM Technology, Perth, Western Australia.

**Brzovic, A. 2001.** Fundamentos Geológicos para un Sistema de Clasificación Geotécnica del Macizo Rocosó Primario. Mina El Teniente. Hundibilidad Fase I, API-T01m101-GI187/01. Rancagua.

**Brzovic, A. 2005.** Characterization of the primary copper ore for caving at the El Teniente mine, Chile [Draft Dissertation]. Western Australian School of Mines.

**Brzovic, A., and Herrera, S. 2011.** Assessing geological vein size and intensity using discrete fracture network modeling at the El Teniente Mine, Chile. ARMA, American Rock Mechanics Association. Codelco, Rancagua, Chile.

**Brzovic, A., & Herrera, S. 2011.** Introducción a los Modelos Estocásticos del Arreglo Estructural en 3D (DFN) mediante el *software* FracMan. Inédito. Superintendencia Geología. Curso DFN y FracMan. GMRD. Mina El teniente. CODELCO Chile.

**Burgos, L. 2002.** Petrografía y geoquímica de la diabasa y diques basálticos que constituyen las “andesitas de la mina” en el yacimiento El Teniente. VI Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 108 pp., Concepción.

**Camus, E. 1975.** Geology of the El Teniente ore body with emphasis on wall-rock alteration. Economic Geology, Vol.70, N°8, pp. 1.341 - 1.372.

**Cannell, J. 2004.** El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile.

**Charrier, R. 1973.** Geología regional de la provincia de O'Higgins y Colchagua. Publicación Inédita, N° 7, pp. 1-69. Santiago.

**Charrier, R. 1981.** Mesozoic and Cenozoic Stratigraphy of the central Argentinean-Chilenean Andes (32°-35° S) and Cronology of their Tectonic Evolution. Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paleontologie. (3/4), pp. 344-355. Stuttgart.

**Charrier, R. 1983.** Carta Geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja El Teniente. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito), N° 929. Santiago.

**Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., Muñoz, N., Wyss, A. y Zurita, E. 2002.** Evidence for cenozoic extensional basin development and tectonic inversión south of the flat slab segment, Southern Central Andes, Chile (33°-36° L.S.). South American Earth Sciences, 23 pp.

**Charrier, R. y Munizaga, F. 1979.** Edades K-Ar en volcanitas Cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal, Chile (34°15' latitud sur). Revista Geológica de Chile, N°7, pp. 41 - 51. Santiago.

**Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Spichiger, S. y Zapata, F. 1994.** Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las Formaciones Coya-Machalí y Abanico, entre los 33°50' y 35°, Cordillera Principal chilena. Actas del VII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, pp. 1.316 – 1.319, Concepción.

**Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Mark, N., Zapatta, F., Mckenna, F., Novacek, N. 1996.** New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35° S, Central Chile). Journal of South American Earth Sciences, vol. 9, p. 393-422.

**Clark, A., Farrar, E., Camus, F. y Quirt, G. 1983.** K-Ar age data for the El Teniente porphyry copper deposit, Central Chile. Economic Geology, Vol. 78, N°5, pp. 1.003 - 1.006.

**Cuadra, P. 1986.** Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. Revista Geológica de Chile, N°27, pp. 3 - 26.



**Davidson, J. 1971.** Geología del área de las Nacientes del Teno, Provincia de Curicó. Memoria para optar al Título de Geólogo (Inédito). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile.

**Davidson, J. & Vicente, J. 1973.** Características paleogeográficas & estructurales del área fronteriza de las Nacientes del Teno (Chile) & Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35°15' latitud S). Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, vol. 5, pp. 11-55.

**Davis, G.H., Reynolds, S.J. 1996.** Structural Geology of Rocks and Regions, John Wiley, New York, pp. 724-726.

**Díaz, D. 2013.** Morfología de las estructuras geológicas para la caracterización geotécnica en mina El Teniente, VI Región, Chile. Memoria para optar Título de Geólogo (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile.

**Dershowitz, W. S. y Herda, H. H. 1992.** Interpretation of fracture spacing and intensity, In Tillerson, J. R. & Wawerik, W. R. (Editores). 33<sup>rd</sup> US Symp. On Rock Mechanics, pp. 757-766. Santa Fe, New Mexico, A. A. Balkena.

**Dershowitz, W. S., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P., Thomas, A. 1998.** FracMan, interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation. User Documentation, Version 2.6, Golder Associates Inc., Seattle, Washington.

**Dershowitz, W. & Einstein, H.H. 1988.** Characterizing rock joint geometry with joint system models. Rock Mech. and Rock Eng. Vol. 21. pp. 21-51.

**Efron, B. 1979.** Bootstrap Methods: Another look at the Jackknife University. Annals of statistics, vol 7, N° 1, pp 1-26. Stanford

**Einstein, H. H., Baecher, G. B. and Veneziano, D. 1979.** Risk Analysis for Rock Slopes in Open Pit Mines, Parts I-V. USBM Technical Report J0275015. Department of Civil Engineering, MIT.

**Elmo, D. 2006.** Evaluation of a hybrid FEM/DEM approach for determination of rock mass strength using a combination of discontinuity mapping and fracture mechanics modelling, with particular emphasis on modelling of jointed pillars. (Inedito). University of Exeter. School of Geography, Archaeology and Earth Resources.

**Enrione, A. 1972.** Estabilidad de los terrenos del área de Alto Colón. Sociedad Minera. (Inédito). CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología. 10 pp.

**Falcón, M. & Rivera, O. 1998.** Estudio geológico distrital de la División El Teniente de Codelco-Chile, escala 1:25.000. Vicepresidencia de exploraciones y asociaciones mineras, Corporación Nacional del Cobre Codelco-Chile (Inédito): 108 pp. Santiago.

**Faunes, A. 1981.** Caracterización de la mineralogía metálica y alteración de un sector del stock tonalítico del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica (Inédito): 175 pp., Santiago.

**Fischer, R. 1953.** Dispersion on a sphere. Proc. Roy. Soc, A217: 295-305 pp. London.

**Floody, R. 2000.** Estudio de vulnerabilidad geológica-geotécnica de la Chimenea de Brechas Braden. Fase 1, Geología de Brechas Braden (GL-044/00). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 90 pp., Rancagua.

**Garrido, I. 1992.** Resumen del nuevo modelo geológico-estructural y geotécnico del yacimiento El Teniente. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 10 pp., Rancagua.

**Garrido, I. 1995.** Proyecto geodinámico mina El Teniente. Geología estructural del distrito y mina El Teniente y situación geodinámica regional. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología (Inédito): Tomo 1, 61pp., Rancagua.

**Gil, J. 2005.** Aplicación del método Bootstrap al contraste de hipótesis en la investigación educativa. Revista de Educación, N° 336, pp. 251-265.

**Godoy, E. 1993.** Geología del área entre los ríos Claro del Maipo y Cachapoal. Proyecto Codelco-Chile y Servicio Nacional de Geología y Minería (Inédito): Vol. 1, 78 pp. Santiago.

**Godoy, E. & Lara, L. 1994.** Segmentación estructural andina a los 33°-34° S. Nuevos Datos en la Cordillera Principal. 7° Congreso Geológico chileno, Actas, Vol. 2, pp. 1344-1346.

**GOLDER ASSOCIATES, 2008.** FracMan 7. Golder Associates Ltd, Inc. (Inédito), Vancouver.

**GOLDER ASSOCIATES, 2011.** Technical Memorandum: FracMan Workshop (Inédito). By Elmo, D. Vancouver

**Gómez, R. 2001.** Geología de las unidades volcanogénicas Cenozoicas de área industrial de la mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología. Santiago (Inédito): 143 pp., Chile

**González, A. 2000.** Análisis estructural entre los valles del Río Tinguiririca & Teno, Cordillera Principal de Chile Central: Microsismicidad & Geología de superficie. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile. 85p.

**Gonzalez & Brzovic. 2015.** Características de las fallas con potencial de generar estallidos de rocas, en mina El Teniente. GEOMIN 2015. División El Teniente, Codelco, Chile.

**González de Vallejo, L. 2002.** Ingeniería geológica. Pearson Educación, Madrid. pp. 250, 246, 247, 206, 207.

**GRMD-SGL-INF-61, 2014.** Consolidación del Modelo Geotécnico para Proceso Productivo de la Roca Primaria. API T10E202. Informe Final. (Inédito). pp. 25,80. Superintendencia de geología, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División El Teniente, CODELCO-Chile.

**GRMD-SGL-INF-160407, 2016.** Levantamiento de información estructural en zona de daños por estallido NNM. Adit 74-75. Superintendencia de geología, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División El Teniente, CODELCO-Chile.

**Guzmán, C. 1991.** Alteración y mineralización de los Pórfidos Dioríticos del sector central, Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 145 pp., Santiago.

**Hamrin, H. 2001.** Underground mining methods and applications. Underground Mining Methods; Engineering fundamental and international case studies. Colorado, SME.

**Herrera, S. 2012.** Modelos estructurales estocásticos y su aplicación en la caracterización geotécnica del pórfido dacítico de la Mina El Teniente. Memoria para optar al título de geólogo. (Inédito). Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción.

**Howell, F. & Molloy, J. 1960.** Geology of the Braden Orebody, Chile. Economic Geology, Vol. 55, p. 863-905.

**Hudson, J.A., Priest, S.D. 1979.** Discontinuities and rock mass geometry. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 16, 1979, pp 339 - 362.

**ISRM, 1981.** Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 15, pp. 319-368. 225

**Jauregui, L. 2001.** Introducción a la Fotogrametría. (Inédito). Capítulo 1. Pp 1-12. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida.

**Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V. y Munizaga, F. 1991.** Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (28-33°S), in Harmon, R., Rapela, C., eds., Andean magmatism and its tectonic setting: Geological Society of America Special Paper 265, pp. 113-137.

**Kay, S., & Kurtz, A. 1995.** Magmatic and tectonic characterization of the El Teniente Region. Informe inédito, 180 p. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 180 pp., Rancagua.

**Klöhn, C. 1960.** Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de investigaciones Geológicas, boletín N°8, 95 pp. Santiago.

**Kulatilake, P. H. S. W. & Wu T. H. 1984.** Estimation of mean trace length of discontinuities. Rock Mechanics and Rock Engineering 1984. pp .17:215-32.

**Kulatilake PHSW. 1993.** Application of probability and statistics in joint network modeling in three dimensions. In: Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Canberra, Australia. pp. 63-87.

**Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R. & Farrar, E. 1997.** Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°S). Revista Geológica de Chile, Vol. 24, N°1, 75 – 90 pp. Santiago.

**La pointe, P., Wallman, P. y Dershowitz, W. S. 1993.** Stochastic estimation of fracture size through simulated sampling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 30, 166-1607 pp.

**Manual Básico para empezar a trabajar con MACROS de Visual Basic para Excel. 2014.** Introducción al Visual Basic. (Inédito). ROGLE, Reengineering Operations Groupwork Logistics Excellence. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

**Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruíz, J. y Thiele, R. 2002.** El Teniente porphyry copper deposit in the Chilean Andes: new geochronological timeframe and duration of hydrothermal activity. 2002 Denver Annual Meeting. Paper N°152-4, 1 pp.

**Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R.; Ruíz, J. y Zentilli, M. 2004.** New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from UPb, 40Ar/39Ar, Re-Os, and Fission-Track Dating: Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit. Society of Economic Geologists, Special Publication 11, pp.15-54.

**Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Thiele, K., Arévalo, A., Zuñiga, P. y Floody, R. 2001.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the El Teniente porphyry copper deposit. III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica. Pucón, Chile, Extended Abstracts. pp. 469 - 499.

**Mauldon, M. 1998.** Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows. Rock Mech. Rock Engng. Vol. 31. pp. 201-216.

**Mauldon, M., Dunne, W. M., Rohrbaugh Jr, M. B. 2000.** Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture trazas. Journal of Structural Geology 23. Department of Civil and Environmental Engineering and Department of Geological Sciences, University of Tennessee, Knoxville. 247-258

**Mauldon, M., Rohrbaugh Jr., M.B., Dunne, W.M., Lawdermilk, W., 1999.** Fracture intensity estimates using circular scanlines. In: Amadei, B., Kranz, R.L., Scott, G.A., Smeallie, P.H. (Eds.), Proceedings of the 37<sup>th</sup> US Rock Mechanics Symposium: Rock Mechanics for Industry, Balkema, Rotterdam, pp. 777-784.

**Morales, A. y Pereira, J. 1996.** Actualización geológica proyecto Esmeralda. Informe interno, referencia GI-083/96. Departamento de Geología, División El Teniente. 33 p.

**Munizaga, F., Maksaev, V.; Mathur, R., Ruíz, J., McWilliams, M. y Thiele, K. 2002.** Understanding molybdenite Re-Os ages from the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. 2002 Denver Annual Meeting. Paper N°152-5, 1 pp.

**Ojeda, J., Hernández, E., Ossandón, G., Enrione, A. y Mestre, A. 1980.** El pórfido cuprífero El Teniente. Codelco Chile, Departamento de Geología, División El Teniente, Superintendencia de Geología (Inédito). 66 pp., Rancagua.

**Ossandón, G. 1974.** Petrografía y alteración del pórfido dacítico, yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito). 189 pp., Santiago.

**Padilla, J. 2001.** Material de apoyo: El Proceso de Poisson. Universidad Pontificia Bolivariana (Inédito). 8 pp. Bucaramanga.

**Pahl, P. J. 1981.** Estimating the mean length of discontinuity traces. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr. 18: 221-8.

**Palleske, C. 2014.** Study of biases assumptions and practical consideration for the use of Discrete Fracture Networks in Geomechanical Practice. A thesis submitted to the Department of Geological Sciences and Geological Engineering. In conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science (Inédito). Queen's University Kingston, Ontario, Canada.

**Pilger, R. 1981.** Plate reconstruction, a seismic ridges and low angle subduction beneath the Andes. Geological Society of American Bulletin, Vol. 92, pp. 448-456.

**Portigliati, C. y Camus, F. 1974.** Alteración hidrotermal del yacimiento El Teniente. (preliminar). Codelco Chile, División El Teniente, Departamento de Geología (Inédito): 36 pp., Rancagua.

**Priest, S.D. & Hudson, J.A. 1976.** Discontinuity spacings in rock. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. Vol. 13. pp. 135-148

**Rivera, O y Cembrano, J. 2000.** Modelo de formación de cuencas volcanotectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena andina: El caso de las cuencas Oligo-Miocenas de Chile Central & su relación con estructuras NNW-NW (33° 00'-34° 30'S). Actas IX Congreso Geológico Chileno. 31 de Julio - 4 de Agosto. Puerto Varas. Chile, v.1, p. 631-636.

**Rivera, O. & Falcón, F. 2000.** Secuencias de relleno de cuencas volcano-tectónicas transversales Oligoceno-Miocenas en los alrededores del Yacimiento El Teniente (33°45'-34° 30' S). IX° Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, v.1, pp. 819-823.

**Rojas, A. 2002.** Petrografía & geoquímica del Pórfido Teniente, ubicado en el sector norte del yacimiento El Teniente, Provincia de Cachapoal, VI Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, 133 p.

**Rojas, E.; Molina, R. & Cavieres, P. 2001.** Preundercut caving in El Teniente mine, Chile. En Hustrulid, W. R. & Bullok, R. (Eds.) Underground Mining Methods; engineering fundamental and international case studies. Colorado, SME.

**SERNAGEOMIN. 2013.** Guía N°5 de operación para la pequeña minería. Fortificación y Acuñaadura. Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Minería. Gobierno de Chile. Todos los derechos reservados.

**Skewes, A. 1997.** Informe petrológico preliminar del sector oriental del perfil 124 en El Teniente. Informe Inédito. Departamento de Geología, Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile 49 p.

**Skewes, M. 1999.** Notas petrográficas sobre algunas brechas de El Teniente. Codelco Chile División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 34 pp., Rancagua.

**Skewes, M. 2000.** Rocas ígneas del depósito de cobre El Teniente, Chile. Codelco-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 94 pp., Rancagua.

**Skewes, M. y Arévalo, A. 1997.** Andesitas de la mina El Teniente. Actas del VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, pp. 1.162 - 1.164. Antofagasta.

**Skewes, M. y Arévalo, A. 2000.** El complejo de gabros y diabasas que hospeda a las brechas mineralizadas del depósito de cobre El Teniente, Chile Central. Actas del IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, pp. 380 - 384. Puerto Varas.

**Skewes, M., Arévalo, A., Floody, R., Zuñiga, P. y Stern, C. H. 2002.** The giant El Teniente brecciated deposit: Hypogene copper distribution and emplacement. Society of Economic Geologists, Special Publication 9, Chapter 14, pp. 299 - 332.

**Skewes, M. & Stern, Ch. 1995.** Genesis of the Giant Late Miocene to Pliocene copper deposits of Central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution. International Geology Review, Vol. 37, p. 893-909.

**Staub, I., Fredriksson, A. and Outters N. 2002.** Strategy for a Rock Mechanics Site Descriptive Model Development and testing of the theoretical approach. SKB Report R-02-02. Golder Associates AB. SKB.

**Stern, C. H. y Skewes, M. 1994.** Early Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile. Actas del VII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, pp. 1.456 - 1.458. Concepción.

**Stern, C. H. y Skewes, M. 1995.** Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 22, N°2, pp. 261 - 272. Santiago.

**Stern, C. H. y Skewes, M. 1997.** Subduction of the Juan Fernández Ridge below Central Chile: effects on subduction geometry, rates of subduction erosion, arc migration and magma chemistry, and genesis of copper deposits. Actas del VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 3, pp. 1.724 - 1.728. Antofagasta. Ph.D. Thesis, University of Tasmania (Inédito), 317 pp., Tasmania.

**Stewart, J. y Araya, R. 1972.** Programa de exploración minera SOMEX-IIG en la alta cordillera de los Andes entre los paralelos 34°10' y 35°10' latitud sur. Instituto de Investigaciones Geológicas (Inédito): 65 pp., Santiago.

**Terzaghi, R. D. 1965.** Sources of error in joint surveys. Geotechnique. 15:287-304.

**Thiele, R. 1980.** Hoja Santiago. Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000. N° 39, 51 pp. Santiago.

**Thiele, R., Beccar, I., Levi, B., Nyström, J. O. y Vergara, M. 1990.** Tertiary Andean Volcanism on Caldera-Graben Setting. In Symposium International de Géodynamique Andine, Resúmenes del Communications, pp: 309. Grenoble.

**Valenzuela, R. 2003.** Mineralización Sulfurada Hipógena de Cobre en el Sector Central del Yacimiento El Teniente VI región. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de La Tierra (Inédito): 118 pp. Concepción.

**Villaescusa, E. & Brown E. T. 1992.** Maximum likelihood estimation of joint sizes from trace length measurements. Rock Mechanics and Rock Engineering. 25:67-87.

**Villalobos, J. 1975.** Alteración Hidrotermal en las Andesitas del Yacimiento El Teniente. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito). 125 pp., Santiago.

**Waburton, P. M. 1980.** A Stereological interpretation of joint trace data: Influence of joint shape and implications for geological surveys. Int J Rock Mech Sci Geomech Abstr., Vol. 17, pp. 305-316.

**Wang, X. 2005**, Stereological Interpretation of Rock Fracture Traces on Borehole Walls and Other Cylindrical Surfaces. (Inédito). Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Blacksburg, Virginia.

**Wathugala, D. N. 1991**. Stochastic three dimensional joint geometry modeling and verification. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson.

**Zhang, L. 2006**. Engineering Properties of Rocks. Elsevier Geo-Engineering Book Series Volume 4, Pages 56-91.

**Zhang L. and Einstein H.vH. 1998**. Estimating the mean trace length of rock discontinuities. Rock Mech. Rock Engng. Vol. 31. pp. 217-235.

**Zhang. L., Einstein. H. H. 2000**. Estimating the intensity of rock discontinuities. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37. Ed. Pergamon. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA. pp 819-836.

**Zúñiga, P. 1982**. Alteración y mineralización hipógenas en el sector oeste del Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 104 pp., Santiago.

# ANEXOS

## **ANEXO A: Sesgos en levantamiento de información estructural**

### **A.1 Sesgos en el mapeo de orientaciones**

El sesgo en el levantamiento de orientaciones de estructuras es un problema ampliamente estudiado y su comprensión depende del conocimiento que se tenga del problema contextualizado. Luego, si se conocen las orientaciones de las fracturas o sets de fracturas, los sesgos de muestreo debido a la orientación están razonablemente bien entendidos y pueden ser explicados (Terzaghi, 1965; Hudson & Priest, 1979).

En el caso de la mina El Teniente, los sets de estructuras y los sesgos asociados al método de mapeo de orientaciones son conocidos y considerados, y con una simple inspección a las bases de datos mapeados se puede observar que en ciertos sectores las estructuras subhorizontales presentan una densidad de datos menor que las subverticales, debido a que el criterio de mapeo interior mina establece levantar estructuras que corten un plano imaginario ubicado a un metro del suelo de las galerías. Aunque las estructuras subhorizontales importantes son proyectadas para establecer si cortan o no este plano horizontal imaginario (y decidir si son o no levantadas), mucha información de estas estructuras subhorizontales se pierde. Luego, cuando los geólogos hacen análisis, deben considerar este sesgo, y pese a la baja densidad de polos (proyectados en un *stereonet*) asociadas a estructuras horizontales estos polos deben ser considerados en los análisis y en la determinación de sets estructurales.

La principal fuente de sesgo en el levantamiento de orientaciones corresponde a la dirección en que se toman los datos de orientación. En la mina El Teniente, las direcciones de los avances de las galerías dependen del nivel de la mina y condicionan las orientaciones que pueden ser observadas.

Sin embargo, la aplicación de la técnica de fotogrametría digital en 3DM *Analyst* permite reducir esta fuente de sesgo en relación a la orientación de las estructuras ya que permite un mapeo masivo y de mayor detalle en toda la galería visible, en un tiempo considerablemente menor. Esto se debe a que un DTM puede ser mapeado en distintas direcciones.

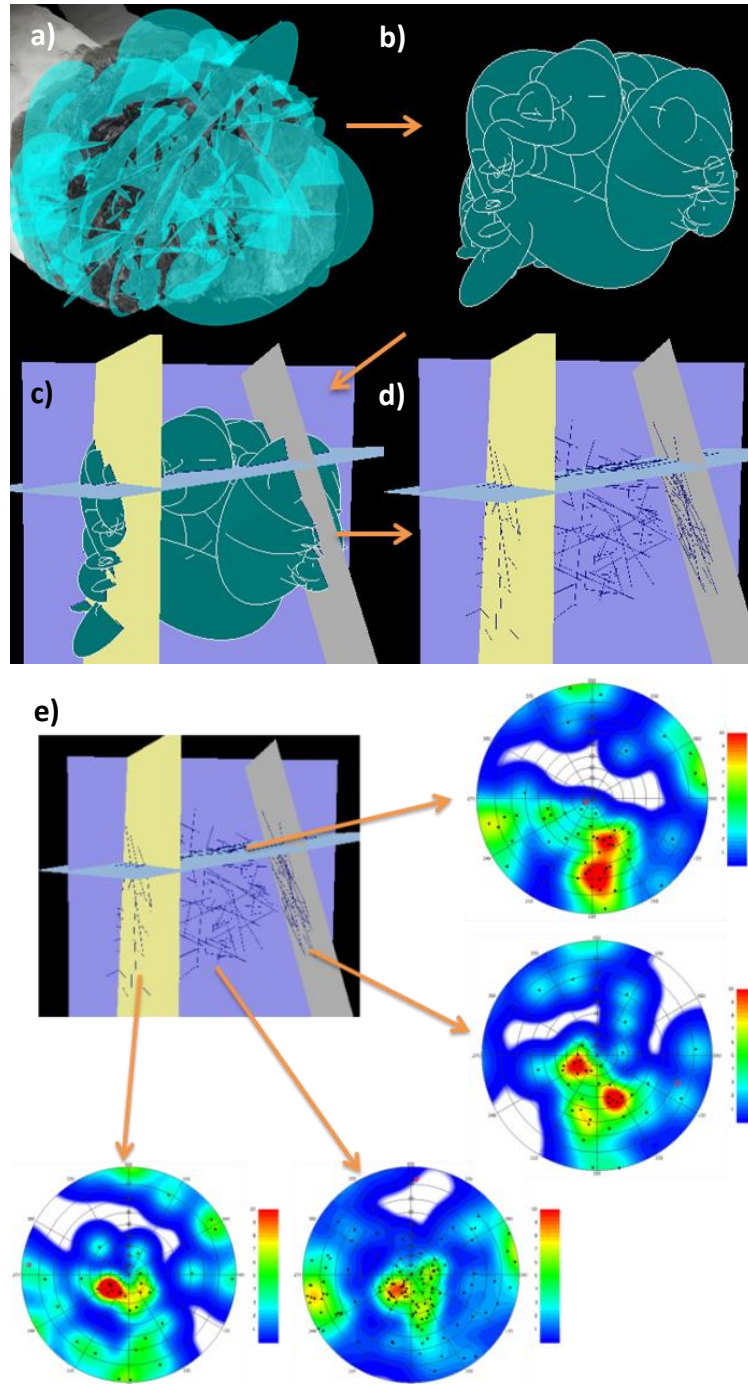


Dado que la metodología para la construcción de modelos del arreglo estructural se basa en el ajuste de parámetros a partir de planos o ventanas de mapeo (ver 3.5 Determinación de plano de mapeo), es necesario tener en cuenta la variabilidad de los datos de orientación de estructuras respecto a la orientación del plano escogido, y cuál es la importancia de este aspecto en la simulación de las orientaciones. La Figura A.1 muestra un ejercicio en el mapeo del DTM 3476 en FracMan. Luego, la Figura A.1e muestra la variabilidad de la información respecto a la dirección escogida de los planos de muestreo y/o ventana de mapeo.

Se observa que el set subhorizontal más denso que se ve en el *stereonet* de la Figura A.1 también es observable en cada uno de los *stereonets* correspondientes a los planos de la Figura A.1e. Pese a esto, las diferencias que se observan deben ser consideradas. Aunque el anterior es un ejemplo puntual, esto se observa en las distintas pruebas que se hacen para distintos mapeos.

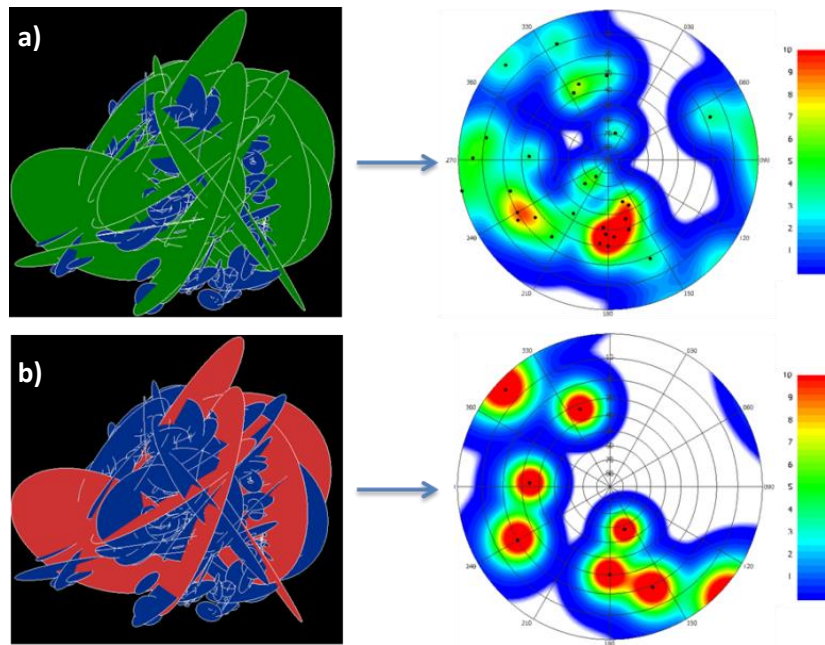
Por otro lado, pese a que la ventana de mapeo (plano) es necesaria para medir tanto largos de traza como Intensidades de Fracturamiento  $P_{21}$ , no es necesaria para medir las orientaciones. A partir de esto, la solución a este problema, y es la utilizada en este estudio, es abordar las simulaciones de orientación utilizando los mapeos de estructuras completos en todas direcciones de la superficie del DTM, es decir, no se utilizan únicamente las estructuras que cortan algún plano (ventana de mapeo) definido.

Al utilizar solo las estructuras que cortan el plano de mapeo la cantidad de datos se reduce sensiblemente, sobre todo al momento de truncar a un tamaño mínimo de estructura (aspecto necesario en esta metodología). La necesidad de utilizar todas las orientaciones viene dada en que si se simula solo con orientaciones de las estructuras que cortan un plano, se pierde información sobre ciertas orientaciones, sobre todo las subparalelas al plano de mapeo escogido. Luego, con el uso de todas las orientaciones mapeadas se elimina el posible sesgo producido por la dirección del muestreo y asegura que la simulación posea todas las orientaciones observadas posibles.



**Figura A.1** Variabilidad de los datos de orientaciones mapeadas según la dirección del plano. Datos representados en las trazas de los distintos planos que representan el frente, los costados y el techo de la galería del DTM 3476 (433 estructuras). a) Estructuras mapeadas en 3DM *Analyst*, b) estructuras digitalizadas en Fracman, c) intersección de planos con las estructuras simulando costados, techo y frente de la galería, d) mapas de trazas, e) variabilidad de las orientaciones según la dirección del plano muestreo (Esquemas confeccionados en 3DM *Analyst* y FracMan).

Otra consideración que se debe hacer al mapear orientaciones es considerar como varían las densidades de polos agrupados dependiendo de un tamaño mínimo de estructura establecido, ya que dependiendo de este tamaño mínimo de corte, el patrón de distribución de densidades de polos en el *stereonet* varía. Esto es de vital importancia al momento de abordar las simulaciones, ya que estas se basan en información observada, por lo que es esperable que las simulaciones de orientaciones sea distinta a medida que se trunca por un tamaño mínimo de estructura. La Figura A.2 presenta los datos de orientaciones del mapeo realizado en el DTM 5014 para dos tamaños de radio equivalente mínimo distintos, donde claramente se puede ver como varía la distribución de la densidad de polos entre ambos casos.



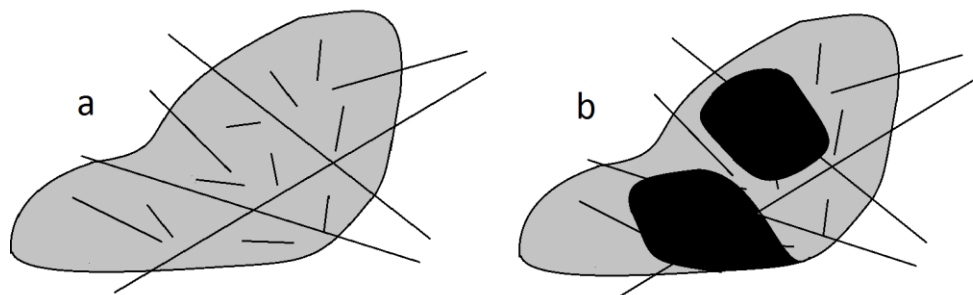
**Figura A.2** a) Estructuras de radio equivalente mayor a 1 m mapeadas en DTM 5014 (29 estructuras) y *stereonet*, b) estructuras de radio equivalente mayor a 2 m mapeadas en DTM 5014 (7 estructuras) y *stereonet* (Esquemas confeccionados en FracMan).

En síntesis, cada vez que se establece un tamaño mínimo para un mapeo, es necesario considerar la nueva distribución de las orientaciones, las cuales al ser simuladas producen resultados distintos basados en los datos observados (básicamente, es lo que hace el *bootstrap*).

## A.2 Sesgos en el levantamiento de largos de trazas y/o tamaños

En este estudio, la cantidad de estructuras mapeadas depende en gran medida de la calidad del DTM, pero hay otras limitaciones relacionadas a la detección que inciden en la cantidad y calidad de la información levantada. La importancia de esto radica en que las estimaciones de la media de Tamaño Real dependen de la Media de Largos de trazas mapeada y del número de estructuras contenidas en una ventana de mapeo determinada. En otras palabras, hay un sesgo en el mapeo generado por la cantidad de estructuras que pueden ser mapeadas.

Trazas muy pequeñas son muy difíciles o a veces imposibles de detectar. Por lo tanto, un largo de traza por debajo de un largo de corte establecido es poco o nada registrado. Esto es conocido como sesgo por truncamiento (*Truncation bias*) (Zhang & Einstein, 2000) y se entiende como “estructuras de trazas largas son más propensas a ser levantadas que estructuras de trazas cortas”, tanto por el factor escala de medición, como por la calidad del Modelo Digital de Terreno (DTM) o por el factor ‘tiempo’ necesario en el levantamiento estructural. La Figura A.3 muestra un esquema a modo de ejemplo.



**Figura A.3** Esquemas explicativos del sesgo por truncamiento. a) Área mapeable no presenta problemas b) Área mapeable presenta problemas. Estructuras de traza larga en b serán mapeadas independiente de los cortes en sus trazas.

En la figura anterior, en (a) se observa el esquema del “área mapeable” (sector gris) de un afloramiento de un macizo rocoso. Tanto las trazas largas como las cortas son mapeables y pueden ser consideradas al calcular la media de los largos de trazas. En el esquema (b) se observa la misma “área mapeable” de un macizo rocoso. En este caso, las áreas en negro representan algún problema de calidad en el DTM, ya sea polvo, agujeros, mala resolución, etc. Producto de este problema, algunas de las trazas cortas no son mapeables, en cambio las

largas aún pueden ser consideradas pese a los saltos en sus trazas. Esto tiene efectos al hacer el cálculo de la 'Media observada de los largos de trazas', parámetro importante en la simulación de tamaños de estructuras, ya que la media observada de largo de traza del caso (b) será mayor que la del caso (a).

El sesgo por truncamiento se ha intentado corregir usando metodologías basadas en el conteo de trazas contenidas en un plano o ventana de mapeo (no en la medición de largos de trazas) a partir de expresiones matemáticas empíricas, como lo han hecho diversos autores, tales como Mauldon (1998), Zang & Einstein (1998), Pahl (1981) y Kulatilake & Wu (1984), entre otros. La metodología presentada en este estudio, más que corregir intenta considerar esta fuente de sesgo en la observación, estableciendo un límite de detección sumado a un mapeo detallado.

Otras fuentes de sesgo en el levantamiento de información que tienen importancia al inferir la media de largo de trazas de estructuras en una superficie infinita de los largos de trazas medidos en una superficie finita, son (Baecher & Lanney, 1978; Einstein *et al.*, 1979; Kulatilake & Wu, 1984; Mauldon, 1998; Zhang & Einstein, 1998, 2000):

- Sesgo por orientación: La probabilidad de aparecer en una superficie de roca expuesta de una discontinuidad depende de la orientación relativa entre la superficie de roca y la discontinuidad. Este sesgo fue discutido en la sección anterior para las orientaciones y se estableció que es posible reducirlo. En el caso de la propiedad 'tamaño de estructura', su medición se hace en todo el DTM pero su uso se hace a partir de un plano por lo cual la medida del tamaño puede ser afectada por la dirección y debe ser considerado como una debilidad del método.
- Sesgo por tamaño: (a) Una gran discontinuidad es más probable que aparezca en el área de mapeo o afloramiento que una pequeña (comparadas por radio equivalente), y (b) una traza larga es más probable que aparezca en un área de mapeo que una corta. Esta fuente de sesgo es compleja de ser eliminada pero puede ser considerada al levantar información a partir de un tamaño mínimo de radio equivalente. De cualquier forma es una fuente de sesgo que siempre está presente, ya que independiente del detalle del levantamiento estructural tampoco es conocida la forma de la discontinuidad o su proyección más allá de la galería. Algunos autores han intentado dar solución a esta fuente de sesgo con la implementación de ventanas de mapeo y la implementación de una expresión empírica para la estimación de la media del largo de traza en un plano

infinito a partir de trazas en un superficie finita circular (Zhang & Einstein, 2000) pero no siempre los resultados satisfacen las observaciones.

- Sesgo por censura: Trazas de discontinuidades largas pueden extenderse más allá del afloramiento expuesto por lo que uno o ambos extremos terminales de la discontinuidad pueden ser no apreciables. Esta fuente de sesgo es la más compleja de eliminar y afecta, por sobre todo, a las trazas que cruzan completamente la labor mapeada. La metodología presentada en este estudio intenta dar solución a este problema de escala mediante la obtención de tendencias de los parámetros y extrapolación a escalas no observables, aspecto ampliamente discutido en el Capítulo 4 de este estudio.

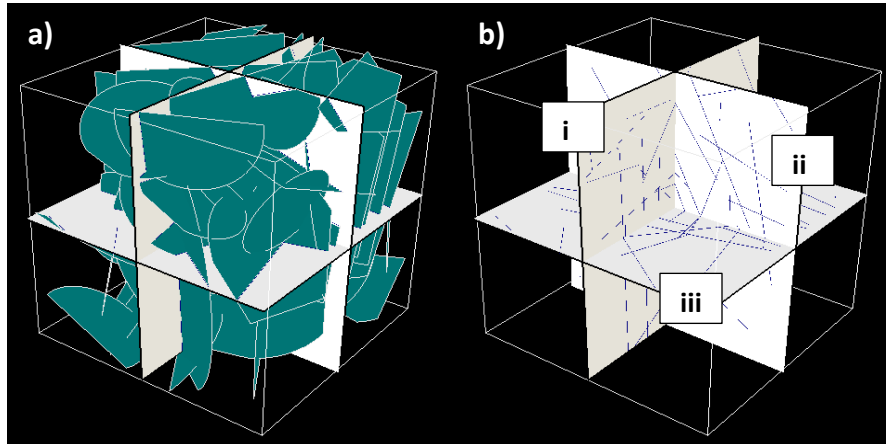
Respecto a las formas de las estructuras, la forma plana de las discontinuidades tienen un profundo efecto en la conectividad y en las propiedades del macizo rocoso (Zhang, 2006). Sin embargo, dado que el macizo rocoso es usualmente inaccesible en tres dimensiones, la forma real de las discontinuidades es raramente conocida, limitada y sujeta a más de una interpretación (Warburton, 1980; Wathugala, 1991). Luego, por conveniencia matemática, muchos investigadores asumen que las discontinuidades son discos circulares delgados localizados al azar en el espacio (Baecher et al., 1977; Warburton, 1980; Villaescusa & Brown, 1992; Kulatilake, 1993). Esto es aplicado en este estudio, tanto en el mapeo de DTM's como en la construcción de DFN's.

### **A.3 Sesgos en el levantamiento de la Intensidad de Fracturamiento $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>).**

La determinación de las propiedades de las discontinuidades del macizo rocoso siempre lleva consigo un cierto grado de incertidumbre debido a la variabilidad de las mismas. Las propiedades dependen de la dirección considerada para su determinación (anisotropía), de los puntos tomados (heterogeneidad) y del volumen o área involucrado (efecto escala) en la medición (Gonzalez de Vallejo, 2002).

Tal como la propiedad largo de traza, el valor propiedad Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$  (m/m<sup>2</sup>) depende de la dirección del plano de mapeo/simulación. Luego, esta es la principal fuente de sesgo que hay en su medida. En La figura A.4 se presenta un esquema de la variabilidad de la medición de esta propiedad según la direcciones de los mapas de traza. Pese a que en este ejemplo los valores varían poco, en situaciones donde se observa un set de orientación preferencial es esperable que dicha variabilidad aumente. En el caso de este

estudio, los planos escogidos tienen orientaciones variadas impuestas por las direcciones de avance de las labores. Además, muchos de los *stockworks* observados no tienen un set de orientaciones dominante. Luego, esta fuente de error se ve algo reducido pero siempre debe ser considerada.



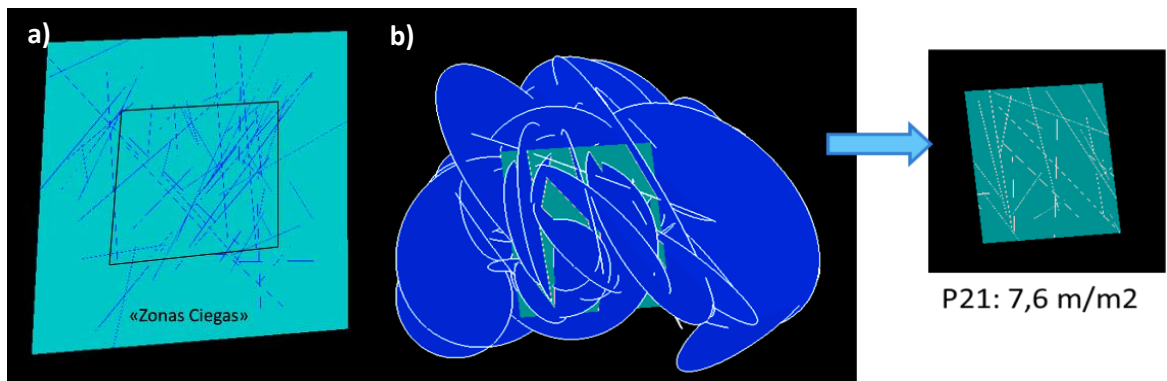
**Figura A.4** Esquema de la variabilidad de la medición de la intensidad  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ). a) set de estructuras cortado por tres planos ortogonales. b) Valores de intensidad variables para  $P_{21}$ ,  $i=0,7$  ( $m/m^2$ ),  $ii=0,82$  ( $m/m^2$ ) y  $iii=0,8$  ( $m/m^2$ ).

Por otro lado, los valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) deben ser calculados cuidando el no incluir “zonas ciegas” (zonas sin estructuras mapeadas) (*Golder Associates - Technical Memorandum*, 2011), ya que el valor de intensidad de fracturamiento no sería representativo, sino siempre menor (ver Figura A.5). Esta fue la principal razón por la cual se trabaja con planos verticales ajustados al frente de desarrollo y de dimensiones de 3x3 m.

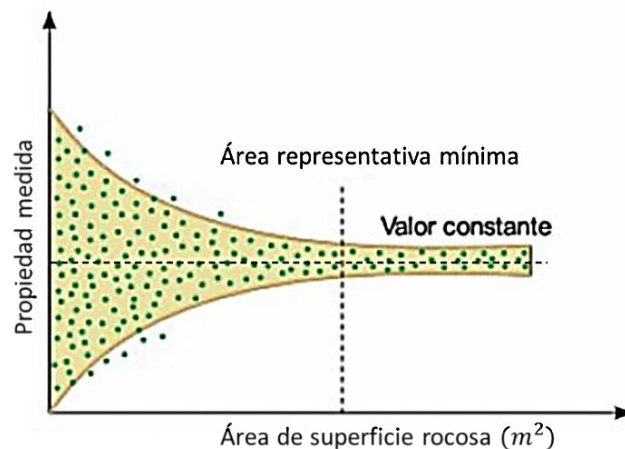
Un plano de 3x3 m limita el largo de la traza mayor que se puede medir a partir de estructuras mapeadas como de simuladas, ya que están condicionadas a las dimensiones de la ventana de observación. Esto conlleva a tener límites de observación pero es un aspecto necesario de definir. La Figura A.5 muestra, las llamadas “zonas ciegas”, el plano ajustado a las estructuras mapeadas y el respectivo mapa de trazas.

El efecto escala es un aspecto importante del carácter heterogéneo y discontinuo de los macizos rocosos. Según la ISRM (1981), existe efecto escala cuando conjuntos de muestras del mismo universo con diferentes tamaños muestran distribuciones estadísticas con diferentes parámetros para una misma propiedad. Sobre la base de datos experimentales, se ha observado, que a partir de una determinada área de ventana de mapeo/simulación, los

resultados de una propiedad medida en son independientes de dichas dimensiones, es decir, desde cierta área de mapeo, la propiedad en cuestión tiene una dispersión constante en torno a un valor. Esta área es la más pequeña considerada representativa del comportamiento del macizo rocoso para una determinada propiedad y corresponde al 'Área Representativa Mínima' (En la bibliografía de Geotecnia se menciona el "Volumen Representativo Mínimo, VRM") (González de Vallejo, 2002). Una representación esquemática de este fenómeno se ve en la figura A.6.



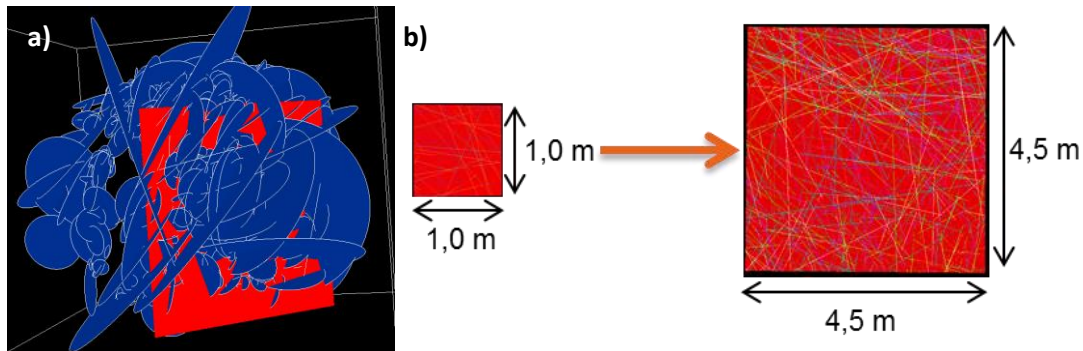
**Figura A.5** a) "Zonas ciegas" en ventana de 5x5 m. La ventana menor (3x3 m) reduce el error en la medición del  $P_{21}$  debido a la falta de información. b) mapeo de estructuras DTM 2814 y plano vertical ajustado. A la derecha, mapa de trazas ajustado y valor de intensidad  $P_{21}$ (m/m<sup>2</sup>).



**Figura A.6** Efecto escala en las propiedades medidas para un macizo rocoso. Se puede ver una alta dispersión cuando la medida se hace en un área reducida. El área representativa mínima es la línea segmentada vertical (Modificada de González de Vallejo, 2002).

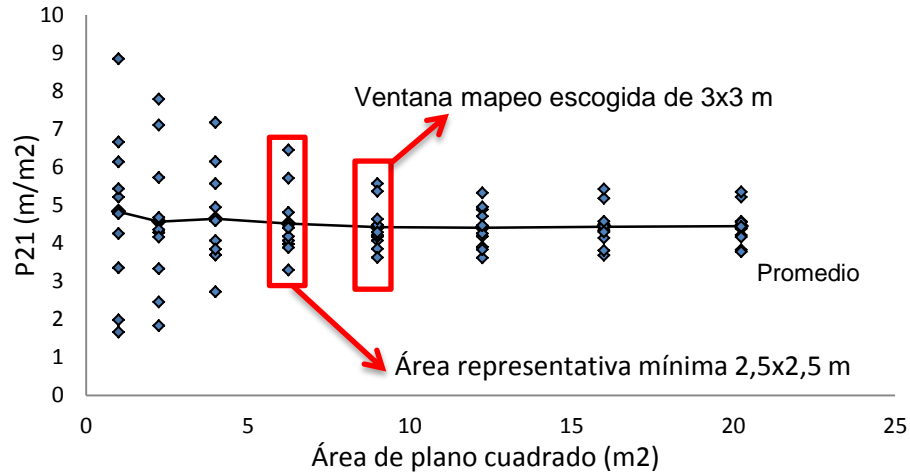


Para asegurar que es posible ajustar la medición de este parámetro a las dimensiones restringidas de una galería, se procede a elaborar un ejercicio virtual que consiste en generar distintas simulaciones (10 realizaciones) de DFN de iguales parámetros y promediar sus valores de intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) para distintos tamaños de ventanas de mapeo. Esto con el fin de aprovechar el fenómeno del efecto escala y lograr establecer una ventana de mapeo representativa (Área Representativa Mínima) que sirva para los fines de medir la Intensidad de Fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ). La figura A.7 muestra las estructuras levantadas en el DTM 4909, la ventana de mapeo cuadrada (izquierda) y la variación de las dimensiones de la misma y las trazas de las estructuras simuladas (derecha).



**Figura A.7** a) Estructuras levantadas en el DTM 4909 a partir de la cuales se hicieron las simulaciones. b) Variación en las dimensiones del plano de muestreo y las trazas de las estructuras contenidas simuladas en dicho plano.

Los resultados de este procedimiento resultados observan en la Figura A.8. A partir de estos, se establece que los valores promedios de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) poseen una tendencia a permanecer constante entorno a un valor y que, para una ventana cuadrada, desde un área sobre los  $6,25 m^2$ , los resultados tienen una dispersión que permanece constante, estableciendo el área representativa mínima en  $6,25 m^2$ . Se propone una ventana de cuadrada plana de  $3 \times 3$  metros, algo mayor al área representativa mínima, con el fin de representar bien los resultados de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) y de abarcar datos de trazas de estructuras mayores.



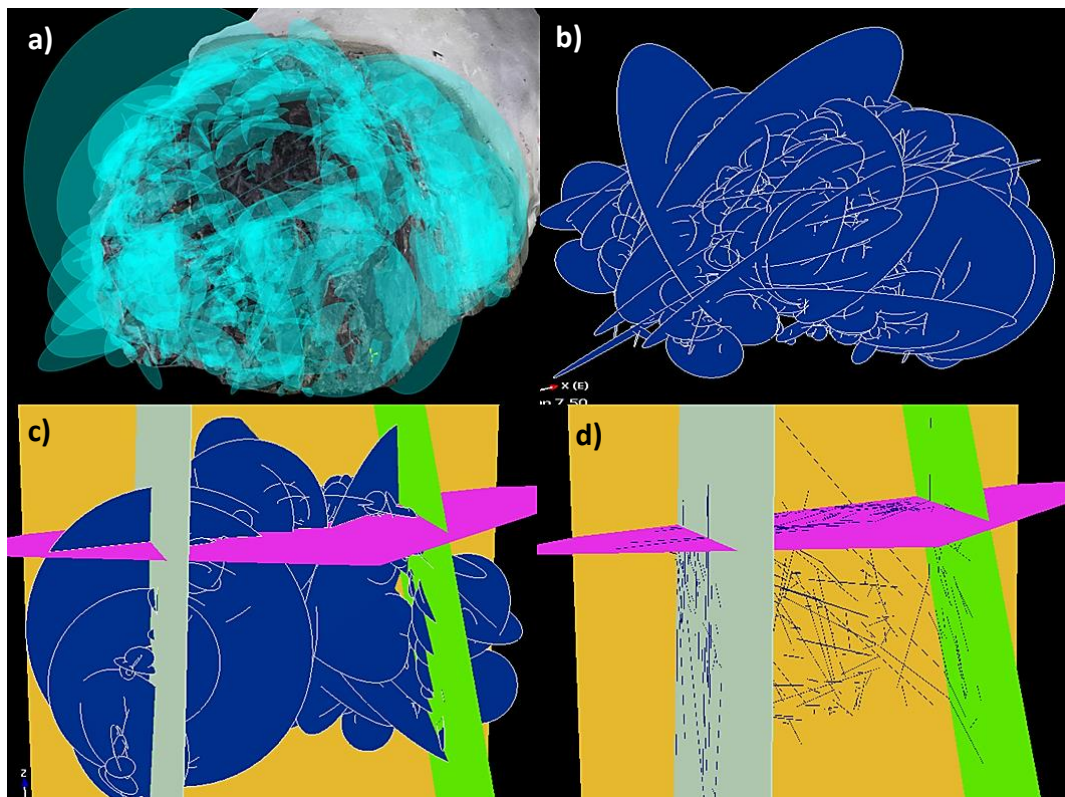
**Figura A.8** Promedio de valores de  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ) para 10 realizaciones. Área representativa mínima y dimensiones de ventana de mapeo escogida.

Como otras características del macizo rocoso, la intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  no tendrá valores únicos definidos a menos que dominen discontinuidades espaciadas uniformemente sino que tendrá un rango de valores posibles definidos de acuerdo a alguna distribución estadística (Priest & Hudson, 1976). Un plano de mapeo es generalmente orientado al azar con respecto a los sets de discontinuidades, por lo tanto, puede ser visto como un muestreo aleatorio de los parámetros de media de largo de trazas, desviación estándar de largo de traza y  $P_{21}$ . De esta manera, cada pequeña área del plano de muestreo tiene una pequeña pero igual probabilidad de intersectar una discontinuidad. Esta definición coincide con la dada para el proceso de Poisson Volumétrico usado en el algoritmo de generación de un DFN (Palleske, 2014).

#### **A.4 Determinación de la dirección del plano de mapeo.**

Para establecer si existe alguna dependencia de los resultados obtenidos a partir de trazas con la dirección de los planos de muestreo, se procede a intersectar las estructuras mapeadas en labores escogidas con una serie de planos preestablecidos con orientaciones distintas. En la Figura A.9 se intersectan cuatro planos privilegiando las direcciones que intersecten la mayor cantidad de estructuras, estos son: ambos costados, el techo y el frente del desarrollo de una galería (dado que contienen las trazas de las estructuras en los DTM's).

Para poder comparar se utiliza la intensidad de fracturamiento  $P_{21}$  ( $m/m^2$ ), la media del largo de traza ( $m$ ) y el número de trazas contenidas en un plano. Los resultados se presentan en la Tabla A.1, donde se observa que la media del largo de traza ( $m$ ) muestra una disminución en los planos 1 y 4, coincidiendo con la mayor cantidad de estructuras intersectadas y mayores valores de  $P_{21}$ . Los valores de  $P_{21}$  dependen exclusivamente de la cantidad de metros de largos de trazas mapeados, y dado que es el frente de desarrollo de los DTM el que permite generalmente mapear una cantidad mayor de estructuras, este resulta en un  $P_{21}$  mayor que en los otros casos (plano 4 amarillo representa el frente de desarrollo). De la misma manera sucede con la disminución de la media del largo de traza que se observa en los planos 1 y 4, indica que en éstos la capacidad de detección posee un límite inferior a los otros planos, aumentando la cantidad de estructuras de traza corta mapeadas.

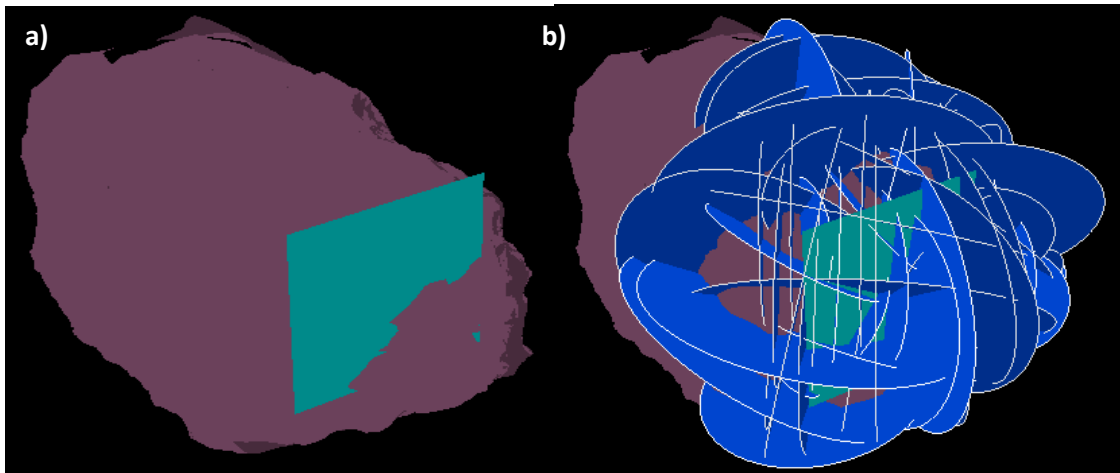


**Figura A.9** a) Estructuras digitalizadas en el DTM 4909 (sector: Esmeralda, nivel: Transporte). b) Estructuras en Fracman. c) Planos-Superficies de mapeo. d) Trazas de las estructura en planos-superficie de mapeo.

**Tabla A.1** Resultados del DTM 4909 (Esmeralda-Transporte) para los cuatro planos.

Propiedad	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4
N° estructuras intersectadas	83	42	51	127
Media de largo de traza (m)	0,95	1,32	1,03	0,93
Intensidad P21(m/m2)	2,19	1,54	1,46	3,28

Al repetir este ejercicio en distintos DTM mapeados a distintos tamaños de radio equivalente mínimo mapeado, se decidió establecer un plano de muestreo o ventana de mapeo que emule el frente del desarrollo (ver ejemplo en la Figura A.10). Esta dirección del plano varía dependiendo el caso debido a que las galerías están orientadas en distintas direcciones. Esto permite reducir de alguna manera el sesgo por la dirección del plano pero le imprime un factor de variabilidad que debe ser considerado al simular los tamaños.



**Figura A.10** a) Superficie de la galería del DTM 7783 (RENO) y el plano que simula el frente del desarrollo. b) la galería digitalizada, el plano de mapeo y las estructuras mapeadas en círculos.

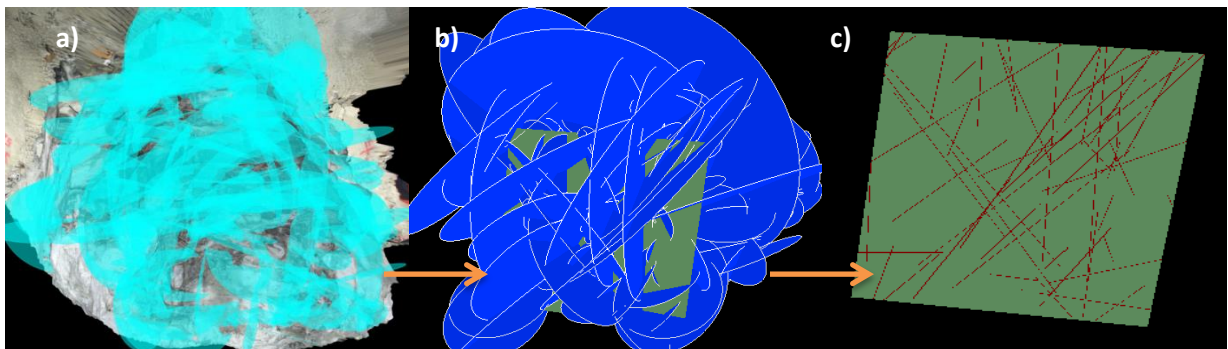
## ANEXO B: Consideraciones de la Metodología de ajuste del Tamaño

### B.1 Ajuste de histogramas de tamaños mapeados

Las metodologías que intentan resolver el problema de la relación que existe entre el tamaño de una estructura con el largo de traza de la misma, establecen utilizar la forma de la distribución de los largos de traza observados (mapeados) para ajustar los largos de trazas simulados. Esta distribución recibe el nombre de ‘función de densidad de probabilidad de largos de traza observados  $g(l)$ ’, y es medida en una superficie finita sujeta a sesgos de muestreo (Einstein *et al.*, 1979; Davis & Reynolds, 1996; Mauldon *et al.*, 1999; Zhang & Einstein, 2000; Mauldon *et al.*, 2000).

Este estudio se trabaja con un dato inicial asociado a un tamaño (radio mapeado) no a un largo de traza. Luego, al insertar un plano entre las estructuras mapeadas y obtener el mapa de trazas, la cantidad de estructuras se ve sensiblemente reducida lo que no permite hacer buenos ajustes de curvas de distribución. Para solucionar esto, se asumió que la distribución de tamaños mapeados (radios equivalentes mapeados) y la distribución del largo de las trazas tienen la misma forma, al momento de insertar un plano y obtener dicho mapa de trazas. Luego, en este estudio se asume que  $g(l)$  tiene la misma forma que la distribución de tamaños observados (radios equivalentes mapeados), considerándolas análogas.

Teniendo en cuenta esta consideración, se puede proceder a intersectar con un plano las estructuras, así obteniendo las trazas de las estructuras en dicho plano, como se observa en la imagen inferior de la Figura B.1. Desde la obtención de este mapa de trazas en adelante, las metodologías tradicionales son aplicables y válidas.



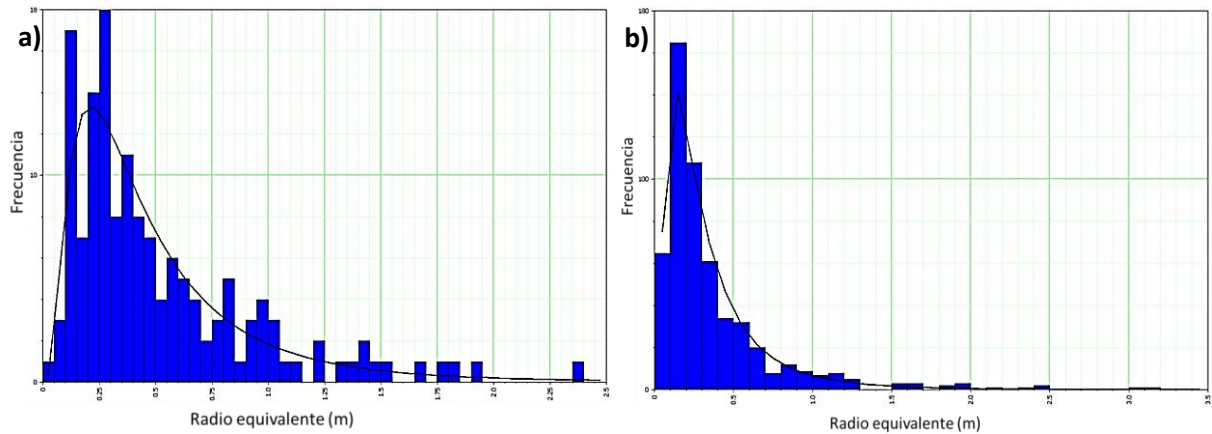
**Figura B.1** DTM 2715, sector Esmeralda. A partir de tamaños mapeados se obtienen trazas “mapeadas” las cuales serán usadas para ajustar el tamaño real. a) estructuras mapeadas en 3DM Adams, b) ventana de mapeo intersectando estructuras en Fracman, c) mapa de trazas de estructuras en Fracman.

Muchos investigadores han buscado la solución de las distribuciones de largos de traza  $g(l)$ , la Tabla B.1 muestra los ajustes de distribución de largo de trazas obtenidos por diversos investigadores. No se encontró en la bibliografía formas de distribuciones de tamaños mapeados.

**Tabla B.1** Distribuciones mejores ajustadas a los datos de largo de traza para diversos autores (Zhang & Einstein, 2000).

Investigador	Distribución
Robertson (1970)	Exponencial
McMahon (1974)	Lognormal
Bridges (1975)	Lognormal
Call et al. (1976)	Exponencial
Barton (1977)	Lognormal
Cruden (1977)	Exponencial
Baecher et al. (1977)	Lognormal
Einstein et al. (1979)	Lognormal
Priest & Hudson (1981)	Exponencial
Kulatilake (1993)	Exponencial y Gamma

Dado el sesgo por tamaño siempre presente, los datos observados se ajustaron bien a distribuciones de forma lognormal (ver histogramas de Figura B.2). A medida que el mapeo de estructuras pequeñas se hace más detallado y complejo (aumentando el límite de detección), estas distribuciones se acercan cada vez más a una de forma exponencial. Esto se ve reflejado en los mapeos de Esmeralda de los DTM 4748 y 4909 observados en la Figura B.2, gráficos a y b, respectivamente, los cuales poseen una notable diferencia en el número de estructuras levantadas.

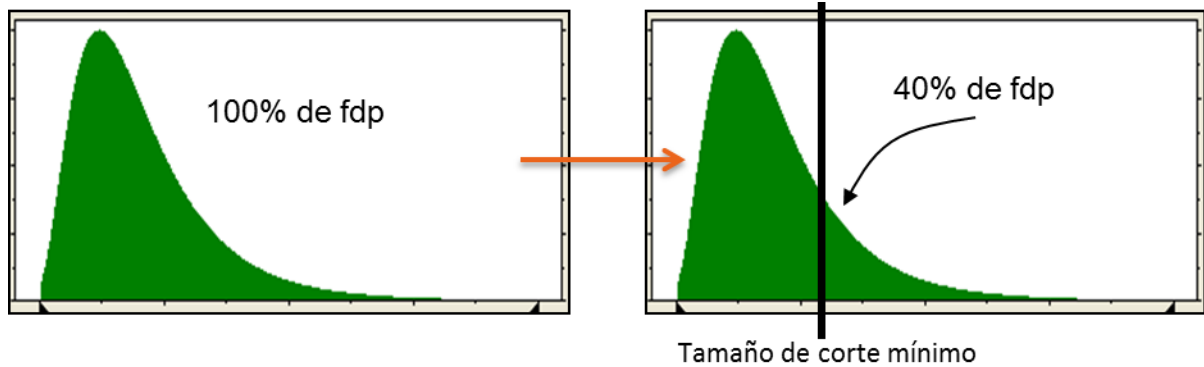


**Figura B.2** Histogramas de radio equivalente mapeado. a) DTM 4748, ajuste lognormal para 149 estructuras. b) DTM 4909, ajuste lognormal para 551 estructuras.

En los ejemplos anteriores se logra ver como el mapeo del DTM 4748 presenta un ajuste claramente de forma lognormal. En cambio, el mapeo hecho para el DTM 4909 la curva se ajusta a una forma lognormal pero cercana a ser de forma exponencial. Esto se debe a la cantidad de estructuras mapeadas (551 estructuras), en su mayoría trazas pequeñas asociadas a pequeños círculos menores a un 0,3 m de radio.

Este ajuste realizado es necesario para continuar con la aplicación de la metodología y debe ser abordado antes de establecer un tamaño mínimo de estructura, o sea, antes de truncar las curvas de distribución de tamaños mapeados. Esto se debe a que las simulaciones representan un rango de la función de densidad de probabilidad truncada al tamaño mínimo de corte pero con una forma de distribución que representa la fdp de datos mapeados completos. Como se observa en la Figura B.3, la curva de distribución es truncada pero conserva su forma. Luego, se asegura que ambas, la fdp de estructuras mapeadas como la fdp de las simulaciones o DFN, tengan la misma forma de distribución truncada a un tamaño mínimo de corte.





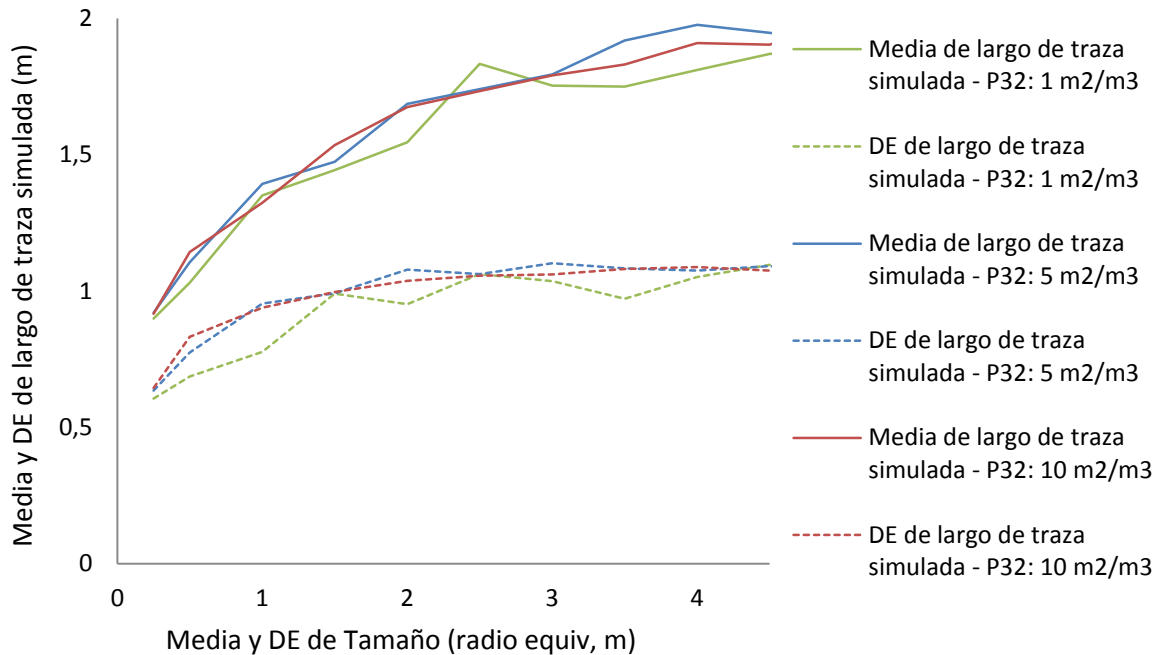
**Figura B.3** Esquema del procedimiento de truncar una curva de fdp a un tamaño mínimo. Hacia la derecha de la línea vertical se encuentra la población de estructuras de interés.

## **B.2 Determinación de un valor $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ inicial para abordar las simulaciones de Tamaño real en DFN's.**

La Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  es un valor a determinar fundamental en esta metodología dado que es uno de los parámetros necesarios para definir un DFN. Para ajustar este parámetro, es preciso conocer antes los parámetros de Orientación y de Distribución de Tamaños. Por otro lado, el ajuste del tamaño se realiza a partir de la solución de la ecuación de Warburton (1980) y de la aplicación del 'Muestreo Simulado' (La Pointe *et al.*, 1993), lo que exige la construcción de DFN's. Luego, la determinación de la distribución de tamaño y sus parámetros deben ser abordadas para un valor de Intensidad de Fracturamiento  $P_{32}(\text{m}^2/\text{m}^3)$  arbitrario.

Este valor se elige en base a un ejercicio virtual desarrollado en el cual se logra observar que las relaciones entre las medias de largos de traza simulados y las medias de tamaño (radios equivalentes) se mantienen aproximadamente constantes para distintos valores de intensidad de fracturamiento  $P_{32}$ . Las curvas generadas para  $10 \text{ m}^2/\text{m}^3$  resultan más suaves y bien definidas pero aumentan el tiempo computacional de iteración considerablemente por lo que se opta por utilizar un valor de intensidad de fracturamiento  $P_{32}$  igual a  $5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . La figura B.4 muestra la gráfica de los resultados de este ejercicio virtual.





**Figura B.4** Relación media y desviación estándar de tamaño de discontinuidad – media y desviación estándar de largo de traza de discontinuidad para distintos valores de  $P_{32}$ .

### ANEXO C: Comentario sobre la evaluación de la metodología.

Este apartado corresponde a una discusión adicional sobre la evaluación de las simulaciones llevadas a cabo en este estudio. Aquí se presenta una interpretación de lo observado en los gráficos que establecen la relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones, presentado en la Figura 5.8 (ver apartado ‘5.7 Validación de resultados de las simulaciones’). En estos gráficos se reconocen unas buenas correlaciones entre lo observado y lo simulado, pero algunas de las propiedades medidas simulados muestran rasgos de haber sido sub o sobreestimadas. Los comentarios a continuación:

- Para el gráfico a) de la Figura 5.8, que relaciona el número de trazas observado con el promedio de número de trazas simulados, se observa que los resultados de las simulaciones tienden a ser sobrestimados, y que dicho ajuste es mejor para un número de trazas de 10 a 20. Un bajo número de trazas se obtiene cuando el tamaño mínimo corte es mayor, y alto número de trazas se obtiene cuando el tamaño mínimo de corte es menor. Luego, se puede concluir que el mejor ajuste a bajos número de trazas se debe a que, siendo estructuras mayores, la probabilidad de que corte el plano es mayor. La sobreestimación se debe a que los DFN son creados sin sesgo, tomando en cuenta

que las estructuras simuladas siguen un proceso de Poisson volumétrico y que se disponen de manera aleatoria en el espacio, no así los mapeos los cuales tienen sesgo a estructuras de tamaños menores. De ahí que para un mismo tamaño mínimo la cantidad de estructuras que cortan un plano en caso simulado es mayor que en un caso observado, lo es esperable debido a la naturaleza del problema.

- Para el gráfico b) de la Figura 5.8, que relaciona el valor de intensidad de fracturamiento areal  $P_{21}(m/m^2)$  observado con el valor promedio de intensidades de fracturamiento  $P_{21}(m/m^2)$  simulados, se observa que los datos ajustan bastante bien. Esto es de esperar dado que es el  $P_{21}(m/m^2)$  el parámetro utilizado para hacer el ajuste del  $P_{32}(m^2/m^3)$  en la metodología.
- Para el gráfico c) de la Figura 5.8, que relaciona la media de largos de traza observada con el promedio de las medias de largos de traza simulados, se observa una evidente subestimación. Esto se debe a la misma razón expresada en el gráfico a): debido a que las simulaciones son generadas sin sesgo por tamaño (independiente del tamaño mínimo) es esperable que más estructuras pequeñas corten el plan en el caso simulado, lo que generaría más trazas menores y por lo tanto disminuiría la media de largo de traza simulada respecto a la media de largo de trazas observada. Siempre es esperable que la media de largos de traza se comporte a la inversa de la intensidad de fracturamiento  $P_{21}$ .
- Respecto al gráfico d) de la Figura 5.8, se observa los datos se encuentran agrupados y algo sobreestimados. El ajuste de la desviación estándar de largos de traza es complejo dado la gran aleatoriedad de las posibles soluciones de los mapas de trazas. Por un lado, es esperable que en el mapeo la desviación estándar de largos de traza disminuya a medida que se trunca por un tamaño mínimo de corte cada vez mayor, ya que solo las trazas de largo cercano a las dimensiones (que coinciden con tamaños mayores) de la ventana permanecen en el mapa de trazas. Esto también es válido para mapas de trazas de estructuras simuladas. Luego, la sobreestimación se debe a que en las simulaciones el número de trazas es mayor (gráfico a)) por lo que es probable que algunas sean estructuras cortas que producen una traza menor y, por lo tanto, aumente la desviación estándar de los datos simulados.

## ANEXO D: DTM's seleccionados en el marco de este estudio

**Tabla D.1** Información general de los DTM (*Digital Terrain Model*) mapeados en el marco de este estudio. Sector y nivel de la mina al que pertenecen y la intersección donde se ubican. Se incluye el número de estructuras que se mapearon en cada uno.

ID DTM	Sector	Nivel	Intersección/ubicación	N° estructuras
3476	Esmeralda	Transporte	HW DR	453
4185	Esmeralda	Vent-inyección	XC 51 FW	56
4748	Esmeralda	Producción	C-63 N Z-49	149
4909	Esmeralda	Transporte	HW DR	551
5014	Esmeralda	Transporte	HW DR	448
3518	Esmeralda	Transporte	HW DR	115
3675	Esmeralda	Transporte	HW DR	80
2715	Esmeralda	Producción	Z-30 FW C-43	124
2859	Esmeralda	Producción	Z-34 HW C-45	57
6087	Esmeralda	Producción	Z-39 HW C-35	81
6153	Esmeralda	Producción	C-43 SUR Z-37	88
2995	Esmeralda	Producción	C-49 S Z-40	47
7261	Esmeralda	Producción	Z-48 HW C-37	100
7441	Esmeralda	Producción	Z47 HW C29	25
7440	Esmeralda	Producción	Z48 FW C31	16
8046	Esmeralda	Producción	C63 sur Z49	55
8360	Esmeralda	Producción	C-57 N Z49	30
7233	Esmeralda	Producción	C27 SUR Z50	33
7166	Esmeralda	Producción	Z48 HW C35	53
2814	Esmeralda	hundimiento	C-55 NTE ACC-5	82
8363	Esmeralda	Producción	C-51 S Z45	95
8358	Esmeralda	Producción	Z-45 HW C-51	36
8342	Esmeralda	Producción	C-55 N Z-49	98
8326	Esmeralda	Producción	Z-45 HW C-51	43
8076	Esmeralda	Producción	Z46 FW C53	40
7487	Esmeralda	Producción	Z-42 FW C-45	48
7945	Esmeralda	Producción	Z-43 HW C-43	25
7922	Esmeralda	Producción	Z45 HW C53	25
7511	Esmeralda	Producción	Z-43 FW C-45	39
7454	Esmeralda	Producción	C-43 N Z-44	21
7044	Esmeralda	Producción	C-27 S Z-50	30
8462	Esmeralda	Producción	C-554 al N Z-49	40
7280	Esmeralda	Producción	C-43 al N Z-44	18
8030	Esmeralda	Producción	Z-46 al Fw C-53	49
5788	Esmeralda	Producción	C43 SUR Z34	35
5860	Esmeralda	Producción	Z-50 HW C-27	24

5892	Esmeralda	Producción	C-45 S Z-40	43
5949	Esmeralda	hundimiento	C-25 S ACC-5	23
6944	Esmeralda	Producción	Z-41 FW C-45	40
6446	Esmeralda	Producción	Z42 HW C-49	19
6445	Esmeralda	Producción	Z-42 FW C-59	28
6211	Esmeralda	Producción	Z-38 HW C-45	35
6201	Esmeralda	Producción	Z-38 al Hw C-45	38
5235	Esmeralda	Producción	Z-42 HW C-51	46
3564	Esmeralda	Producción	Z-39 HW C-47	56
7919	Esmeralda	Producción	Z47 HW C57	41
7918	Esmeralda	Producción	C55 SUR Z45	47
5450	Esmeralda	Producción	C-27 al S Z-49	38
3762	Esmeralda	Producción	C-29 N Z-49	50
6667	Esmeralda	Producción	C-43 S Z-38	36
7872	Esmeralda	Producción	C51 SUR Z44	28
7264	Esmeralda	Producción	Z46 HW C27	13
7457	Esmeralda	Producción	Z43 FW C45	34
4990	RENO	Producción	Z-27 N FW C-19	104
1097	RENO	Producción	Z-12 N Z-24 N	94
7783	RENO	Hundimiento	C-16 N XC7N	65
7180	RENO	Producción	C-20 N Z-32 N	47
9077	RENO	Hundimiento	XC 6N/ HW C25	47
8486	RENO	Producción	SOC.ACC. FW C-17	21
8639	RENO	Producción	C-17 N SOC ACC N.	44
8259	RENO	Producción	CX Z-33/34 /FW C-9	23
7851	RENO	Hundimiento	C-19 N XC 7N	77
7787	RENO	Producción	C-13 N Z-31N	32
7784	RENO	Hundimiento	C-19 N XC 7N	60
7786	RENO	Hundimiento	C-16 N XC7N	69
7662	RENO	Hundimiento	C-19 N XC 7 N	60
7496	RENO	Producción	C-13 N Z 31 N	51
7296	RENO	Producción	Z-31 Fw C-20 N	31
7295	RENO	Producción	Z-32 Fw C-20 N	39
7176	RENO	Producción	C-18 N Z-31 N	40
6793	RENO	Producción	C-19 N Z -31	29

## ANEXO E: Tablas de resultados de la aplicación de la metodología

**Tabla E.1** Resultados de la aplicación de la metodología: Radio mínimo de corte (r min), Ubicación del DTM (Coord X, Coord Y), Número de estructuras mapeadas (N° map), N° de trazas contenidas en el plano (N° traza), Radio equivalente real o tamaño real (r mean), Desviación estándar del radio equivalente real (r SD), Intensidad de fracturamiento volumétrico (P32) e intensidad de fracturamiento areal observado (P21 obs). Sector Esmeralda Fw.

DTM	r min	Coord X	Coord y	N° map	N° traza	r mean	r SD	P32	P21 obs
<b>2715</b>	0,50	1451,98	67,58	73,00	34,00	1,35	1,45	4,29	5,50
	0,70	1451,98	67,58	49,00	29,00	1,45	1,45	3,89	4,98
	0,90	1451,98	67,58	34,00	23,00	2,00	1,80	3,38	4,61
	1,00	1451,98	67,58	30,00	21,00	2,30	1,50	3,18	4,21
<b>2814</b>	0,50	1465,47	-256,63	61,00	19,00	1,70	0,90	3,32	3,44
	0,80	1465,47	-256,63	38,00	15,00	2,30	1,00	2,64	3,00
	0,90	1465,47	-256,63	32,00	14,00	2,30	1,10	2,50	2,81
	1,00	1465,47	-256,63	24,00	12,00	2,50	1,20	2,36	2,56
<b>2859</b>	0,50	1427,98	-4,78	33,00	28,00	1,70	0,25	4,71	5,09
	0,60	1427,98	-4,78	25,00	21,00	2,00	0,20	3,77	4,37
<b>2995</b>	0,50	1433,23	-134,07	38,00	24,00	2,20	1,40	4,43	4,25
	0,70	1433,23	-134,07	28,00	19,00	2,70	1,25	3,83	3,80
	0,80	1433,23	-134,07	32,00	17,00	3,00	1,50	3,17	3,49
<b>3564</b>	0,60	1415,54	-86,22	42,00	17,00	2,50	0,55	3,38	3,38
	0,80	1415,54	-86,22	37,00	15,00	2,90	0,40	2,90	3,14
	1,00	1415,54	-86,22	28,00	10,00	3,10	0,45	2,08	2,68
<b>4185</b>	0,50	1480,57	-421,87	54,00	25,00	2,00	2,00	4,47	4,59
	0,60	1480,57	-421,87	50,00	24,00	2,80	2,80	3,88	4,58
	0,70	1480,57	-421,87	47,00	23,00	2,20	2,90	3,65	4,43
<b>4748</b>	0,50	1623,57	-220,54	55,00	20,00	1,00	0,50	3,47	3,07
<b>5235</b>	0,50	1450,32	-137,01	39,00	16,00	1,80	1,60	2,87	2,94
	0,60	1450,32	-137,01	31,00	15,00	2,00	1,60	2,72	2,88
	0,70	1450,32	-137,01	28,00	14,00	2,00	1,00	2,61	2,82
	0,80	1450,32	-137,01	25,00	13,00	2,20	1,30	2,40	2,70
	0,90	1450,32	-137,01	23,00	12,00	2,30	1,70	2,36	2,54
<b>5788</b>	0,70	1398,66	-16,56	32,00	20,00	2,00	0,30	3,82	3,59
	0,80	1398,66	-16,56	27,00	15,00	2,90	0,20	2,78	2,97
<b>5892</b>	0,50	1376,80	-113,05	37,00	16,00	2,30	0,50	3,25	3,24
<b>6087</b>	0,50	1380,12	-85,77	19,00	22,00	1,40	0,50	4,12	3,73
	0,70	1380,12	-85,77	15,00	16,00	1,80	0,60	3,56	3,03
	1,00	1380,12	-85,77	10,00	10,00	3,50	0,30	2,38	2,28
<b>6153</b>	0,60	1385,83	-37,61	51,00	21,00	2,30	0,30	3,89	4,07
	0,80	1385,83	-37,61	34,00	16,00	3,00	0,25	2,75	3,30

	1,00	1385,83	-37,61	24,00	12,00	3,60	0,30	2,07	2,57
<b>6201</b>	0,60	1382,23	-68,22	34,00	20,00	2,50	0,30	3,92	4,49
	0,80	1382,23	-68,22	32,00	19,00	3,20	0,30	3,24	4,32
	1,00	1382,23	-68,22	23,00	16,00	4,40	0,20	2,68	3,81
<b>6211</b>	0,50	1377,92	-68,86	27,00	21,00	2,10	0,60	4,54	3,78
<b>6445</b>	0,60	1627,77	-135,87	28,00	24,00	3,00	0,80	4,61	5,41
	0,70	1627,77	-135,87	25,00	21,00	3,00	0,75	4,56	5,01
<b>6446</b>	0,50	1412,72	-136,50	19,00	15,00	2,30	1,20	2,38	2,85
	0,70	1412,72	-136,50	17,00	14,00	2,90	0,80	2,35	2,83
	0,90	1412,72	-136,50	15,00	12,00	3,20	1,00	2,16	2,54
<b>6667</b>	0,60	1357,43	-82,81	33,00	21,00	1,50	1,50	3,17	3,58
	0,80	1357,43	-82,81	23,00	17,00	2,10	1,30	2,56	3,21
	1,00	1357,43	-82,81	16,00	11,00	2,50	1,00	1,53	2,22
<b>6944</b>	0,50	1394,77	-119,70	38,00	26,00	1,70	1,00	4,23	4,68
	0,80	1394,77	-119,70	31,00	20,00	2,90	0,70	3,82	4,15
	1,00	1394,77	-119,70	25,00	17,00	3,70	0,75	2,78	3,74
<b>7487</b>	0,50	1380,23	-136,95	48,00	30,00	1,10	1,40	4,02	4,96
	0,70	1380,23	-136,95	42,00	26,00	1,50	1,00	3,88	4,77
	0,90	1380,23	-136,95	33,00	23,00	1,50	1,10	3,13	4,50
<b>7511</b>	0,50	1362,72	-151,40	32,00	16,00	2,50	0,50	2,29	3,12
	0,60	1362,72	-151,40	27,00	14,00	2,80	0,60	2,01	2,89
<b>7872</b>	0,90	1431,56	-197,68	27,00	20,00	3,20	1,00	3,29	4,16
<b>7919</b>	0,30	1459,75	-238,58	41,00	25,00	2,30	0,50	5,11	5,20
	0,50	1459,75	-238,58	39,00	23,00	2,50	0,40	4,90	4,99
	0,80	1459,75	-238,58	35,00	21,00	2,60	0,20	4,83	4,82
<b>7945</b>	0,30	1308,97	-153,39	25,00	19,00	1,20	1,40	3,11	3,02
	0,50	1308,97	-153,39	24,00	18,00	1,50	1,50	3,05	3,00
	0,70	1308,97	-153,39	18,00	13,00	1,90	2,40	2,51	2,52
<b>8046</b>	0,50	1559,92	-331,89	33,00	16,00	2,00	0,70	2,30	2,78
	0,70	1559,92	-331,89	28,00	15,00	2,10	0,60	2,18	2,67
	0,90	1559,92	-331,89	22,00	11,00	3,50	0,40	1,67	2,22
<b>8326</b>	0,60	1420,01	-197,92	32,00	19,00	1,40	1,30	3,69	3,34
	1,00	1420,01	-197,92	22,00	14,00	3,20	0,50	3,50	2,94
<b>8342</b>	0,50	1462,36	-260,53	74,00	37,00	2,10	0,20	6,29	6,96
<b>8358</b>	0,80	1414,37	-196,98	20,00	15,00	1,60	0,20	3,51	2,79
<b>8363</b>	0,30	1418,87	-216,86	87,00	42,00	1,10	0,60	5,86	6,11
	0,50	1418,87	-216,86	64,00	34,00	1,40	0,50	5,71	5,57
	0,70	1418,87	-216,86	42,00	21,00	2,70	0,40	3,82	4,30
	0,90	1418,87	-216,86	25,00	17,00	3,60	0,30	3,13	3,74
<b>8462</b>	0,50	1466,07	-254,28	32,00	25,00	1,20	0,50	4,23	4,10
	0,80	1466,07	-254,28	22,00	16,00	1,90	0,50	3,38	3,22

**Tabla E.2** Resultados de la aplicación de la metodología: Radio mínimo de corte (r min), Ubicación del DTM (Coord X, Coord Y), Número de estructuras mapeadas (N° map), N° de trazas contenidas en el plano (N° traza), Radio equivalente real o tamaño real (r mean), Desviación estándar del radio equivalente real (r SD), Intensidad de fracturamiento volumétrico (P32) e intensidad de fracturamiento areal observado (P21 obs). Sector Esmeralda Hw.

DTM	r min	Coord x	Coord y	N° map	N° trazas	r mean	r SD	P32	P21 obs
<b>3476</b>	0,50	894,27	-532,45	117,00	33,00	0,95	0,80	5,46	4,74
	0,60	894,27	-532,45	93,00	28,00	1,30	1,05	5,02	4,34
	0,70	894,27	-532,45	70,00	23,00	1,45	1,30	3,86	3,78
	0,80	894,27	-532,45	51,00	17,00	2,00	1,75	2,59	3,14
	0,90	894,27	-532,45	43,00	15,00	2,40	1,30	2,54	3,03
<b>3518</b>	0,50	893,09	-538,53	105,00	28,00	0,60	0,80	3,75	3,46
	0,60	893,09	-538,53	82,00	23,00	0,60	1,45	3,09	2,89
	0,70	893,09	-538,53	65,00	18,00	1,00	1,50	2,76	2,66
	0,80	893,09	-538,53	48,00	15,00	1,25	1,50	2,02	2,38
	1,00	893,09	-538,53	26,00	9,00	2,50	1,70	1,54	1,85
<b>3675</b>	0,70	886,43	-558,04	45,00	24,00	1,95	1,20	4,40	4,59
	0,80	886,43	-558,04	40,00	21,00	2,45	1,30	3,84	4,27
	1,00	886,43	-558,04	34,00	19,00	3,25	0,65	3,66	4,12
<b>3762</b>	0,50	1017,53	-254,99	25,00	14,00	2,10	0,95	2,41	2,56
	0,60	1017,53	-254,99	20,00	13,00	2,35	0,90	2,08	2,44
	0,70	1017,53	-254,99	18,00	12,00	2,60	0,75	1,82	2,38
	0,80	1017,53	-254,99	17,00	11,00	3,30	0,55	1,79	2,33
<b>4909</b>	0,50	868,11	-581,97	118,00	35,00	1,30	0,30	5,77	5,51
	0,70	868,11	-581,97	66,00	25,00	1,70	0,25	4,53	4,43
	0,80	868,11	-581,97	58,00	24,00	1,70	0,25	4,44	4,33
	1,00	868,11	-581,97	37,00	15,00	1,80	0,35	2,64	2,83
<b>5014</b>	0,50	856,27	-598,85	71,00	25,00	1,95	2,00	4,30	4,63
	0,70	856,27	-598,85	45,00	20,00	3,00	2,50	3,89	4,11
<b>5450</b>	0,50	950,74	-308,37	35,00	20,00	1,60	0,50	3,26	3,53
	0,60	950,74	-308,37	33,00	17,00	2,50	0,30	2,74	3,30
	0,70	950,74	-308,37	25,00	12,00	3,50	0,35	2,07	2,66
<b>5860</b>	0,50	934,47	-301,11	20,00	8,00	1,80	0,80	2,31	2,57
	0,70	934,47	-301,11	19,00	8,00	2,20	1,20	1,81	1,61
	0,90	934,47	-301,11	17,00	7,00	2,70	2,50	1,49	1,44
<b>5949</b>	0,50	933,59	-278,52	19,00	15,00	2,15	0,70	2,75	2,85
	0,70	933,59	-278,52	15,00	13,00	3,00	0,40	2,68	2,69
	1,00	933,59	-278,52	10,00	9,00	3,50	0,50	1,92	2,16
<b>7044</b>	0,60	945,32	-316,41	25,00	16,00	2,10	1,80	2,63	3,16
	0,80	945,32	-316,41	21,00	15,00	2,40	2,40	2,36	3,05
<b>7261</b>	0,50	1141,88	-259,40	55,00	29,00	0,60	0,40	4,10	3,66
	0,70	1141,88	-259,40	30,00	15,00	1,10	0,80	2,49	2,40

0,90	1141,88	-259,40	18,00	7,00	3,20	1,80	1,54	1,49
------	---------	---------	-------	------	------	------	------	------

**Tabla E.3** Resultados de la aplicación de la metodología: Radio mínimo de corte (r min), Ubicación del DTM (Coord X, Coord Y), Número de estructuras mapeadas (N° map), N° de trazas contenidas en el plano (N° traza), Radio equivalente real o tamaño real (r mean), Desviación estándar del radio equivalente real (r SD), Intensidad de fracturamiento volumétrico (P32) e intensidad de fracturamiento areal observado (P21 obs). RENO.

DTM	r min	Coord x	Coord y	N° map	N° trazas	r mean	r SD	P32	P21 obs
1097	0,50	731,23	1283,88	54,00	40,00	1,20	0,90	5,18	6,08
	0,70	731,23	1283,88	37,00	26,00	2,00	0,50	4,66	4,99
	0,90	731,23	1283,88	29,00	22,00	2,80	0,60	4,10	4,43
4990	0,30	561,51	1132,04	77,00	38,00	1,40	0,80	5,84	6,30
	0,50	561,51	1132,04	61,00	37,00	1,70	0,80	5,55	6,23
	0,70	561,51	1132,04	48,00	35,00	1,80	0,70	5,43	6,12
	0,90	561,51	1132,04	38,00	29,00	2,10	0,90	4,83	5,38
	1,00	561,51	1132,04	30,00	25,00	2,80	0,80	4,48	4,84
6793	1,00	529,97	1228,19	25,00	13,00	2,50	2,00	3,06	2,91
7176	0,70	544,88	1280,89	36,00	17,00	1,70	0,30	3,02	3,14
7180	1,00	492,71	1250,49	41,00	21,00	2,70	1,80	4,23	4,39
7296	0,60	531,29	1176,01	28,00	28,00	1,50	0,70	4,72	4,66
	0,80	531,29	1176,01	22,00	22,00	1,70	0,90	3,75	3,96
	1,00	531,29	1176,01	15,00	15,00	2,15	1,40	2,35	2,94
7376	0,80	519,27	1267,91	45,00	18,00	2,40	1,60	3,59	4,27
7662	0,80	532,34	1210,74	43,00	24,00	1,70	0,80	4,10	4,27
	1,00	532,34	1210,74	36,00	21,00	1,90	1,00	3,46	3,70
7787	0,80	665,20	1421,09	30,00	21,00	2,50	0,60	3,54	4,52
8639	0,80	567,43	1321,29	40,00	23,00	2,60	1,00	4,48	5,16
9077	0,30	378,61	922,74	45,00	40,00	1,70	0,70	5,58	6,65
	0,50	378,61	922,74	39,00	35,00	2,10	0,50	5,01	6,29
	0,70	378,61	922,74	34,00	31,00	2,60	0,40	4,72	5,97

**Tabla E.4** Error relativo porcentual para cada propiedad media en el plano: Número de trazas contenidas en el plano (N° trazas), Media de largo de traza observada (media largo), Desviación estándar del largo de traza e intensidad de fracturamiento areal (P21). Sector Esmeralda Fw.

DTM	r min	Coord X	Coord y	N° trazas	media largo	SD largo	P21
2715	0,50	1451,98	67,58	5,22	6,16	1,33	0,76
	0,70	1451,98	67,58	0,09	0,88	2,01	1,35
	0,90	1451,98	67,58	6,74	6,01	8,92	0,20
	1,00	1451,98	67,58	7,74	6,76	1,73	0,58



<b>2814</b>	0,50	1465,47	-256,63	5,40	13,44	4,70	6,11
	0,80	1465,47	-256,63	7,00	6,25	10,76	0,93
	0,90	1465,47	-256,63	26,43	7,34	2,62	17,17
	1,00	1465,47	-256,63	6,25	18,55	7,49	10,02
<b>2859</b>	0,50	1427,98	-4,78	17,41	19,07	35,32	5,38
	0,60	1427,98	-4,78	28,21	20,61	78,94	1,65
<b>2995</b>	0,50	1433,23	-134,07	0,10	2,84	6,69	3,52
	0,70	1433,23	-134,07	6,45	8,78	11,27	3,34
	0,80	1433,23	-134,07	1,76	6,48	8,38	5,53
<b>3564</b>	0,60	1415,54	-86,22	16,91	16,57	19,91	2,07
	0,80	1415,54	-86,22	19,50	16,39	21,56	0,26
	1,00	1415,54	-86,22	17,29	11,38	17,40	3,29
<b>4185</b>	0,50	1480,57	-421,87	3,40	1,91	1,09	1,63
	0,60	1480,57	-421,87	9,38	3,70	6,03	6,29
	0,70	1480,57	-421,87	1,20	1,98	1,94	4,33
<b>4748</b>	0,50	1623,57	-220,54	31,88	23,00	6,52	1,86
<b>5235</b>	0,50	1450,32	-137,01	16,09	5,29	7,42	9,65
	0,60	1450,32	-137,01	7,17	1,54	7,19	7,56
	0,70	1450,32	-137,01	18,57	12,72	4,82	2,83
	0,80	1450,32	-137,01	13,65	8,48	7,95	3,94
	0,90	1450,32	-137,01	0,83	4,81	3,81	3,51
	1,00	1450,32	-137,01	5,00	1,28	5,44	3,41
<b>5788</b>	0,70	1398,66	-16,56	14,63	17,39	33,57	5,23
	0,80	1398,66	-16,56	14,67	13,80	51,05	1,99
<b>5892</b>	0,50	1376,80	-113,05	33,44	20,99	26,96	6,02
<b>6087</b>	0,50	1380,12	-85,77	17,50	17,38	8,43	3,02
	0,70	1380,12	-85,77	30,31	14,51	6,88	11,51
	1,00	1380,12	-85,77	24,50	17,77	26,03	1,93
<b>6153</b>	0,60	1385,83	-37,61	27,14	19,74	47,43	2,24
	0,80	1385,83	-37,61	13,28	8,96	46,29	3,32
	1,00	1385,83	-37,61	13,54	12,35	26,74	0,22
<b>6201</b>	0,60	1382,23	-68,22	25,00	17,67	34,46	2,63
	0,80	1382,23	-68,22	16,05	15,27	39,50	1,16
	1,00	1382,23	-68,22	4,53	4,87	32,99	9,72
<b>6211</b>	0,50	1377,92	-68,86	16,67	11,43	24,99	2,33
<b>6445</b>	0,60	1627,77	-135,87	21,25	13,83	15,84	4,56
	0,70	1627,77	-135,87	26,43	15,39	18,54	7,14
<b>6446</b>	0,50	1412,72	-136,50	9,67	5,58	7,63	3,46
	0,70	1412,72	-136,50	7,32	9,91	11,44	3,96
	0,90	1412,72	-136,50	16,88	9,17	12,27	6,15
<b>6667</b>	0,60	1357,43	-82,81	5,60	5,70	3,16	1,51
	0,80	1357,43	-82,81	9,41	9,28	5,89	0,24
	1,00	1357,43	-82,81	2,73	13,21	19,70	11,53

<b>6944</b>	0,50	1394,77	-119,70	15,00	13,73	2,68	0,53
	0,80	1394,77	-119,70	12,75	16,15	13,56	5,73
	1,00	1394,77	-119,70	12,21	11,09	20,07	0,06
<b>7487</b>	0,50	1380,23	-136,95	9,83	8,17	8,65	3,26
	0,70	1380,23	-136,95	9,33	8,81	4,93	0,57
	0,90	1380,23	-136,95	5,98	11,62	10,04	7,31
<b>7511</b>	0,50	1362,72	-151,40	18,13	23,65	15,13	9,30
	0,60	1362,72	-151,40	8,21	14,99	19,18	7,28
<b>7872</b>	0,90	1431,56	-197,68	14,50	12,96	15,73	0,56
<b>7919</b>	0,30	1459,75	-238,58	15,90	14,56	24,57	1,22
	0,50	1459,75	-238,58	17,07	14,27	33,73	0,08
	0,80	1459,75	-238,58	21,07	17,01	52,59	0,76
<b>7945</b>	0,30	1308,97	-153,39	0,92	0,65	2,90	0,08
	0,50	1308,97	-153,39	2,50	5,44	5,08	8,41
	0,70	1308,97	-153,39	2,31	0,57	3,23	2,30
<b>8046</b>	0,50	1559,92	-331,89	21,72	15,22	15,96	2,68
	0,70	1559,92	-331,89	21,33	17,26	13,87	0,62
	0,90	1559,92	-331,89	13,41	10,22	32,55	0,88
<b>8326</b>	0,60	1420,01	-197,92	5,39	6,94	3,18	2,58
	1,00	1420,01	-197,92	30,36	14,87	18,51	12,23
<b>8342</b>	0,50	1462,36	-260,53	23,51	21,62	63,15	3,47
<b>8358</b>	0,80	1414,37	-196,98	28,83	30,33	48,66	9,59
<b>8363</b>	0,30	1418,87	-216,86	14,70	15,15	4,98	2,91
	0,50	1418,87	-216,86	29,41	19,56	6,21	3,87
	0,70	1418,87	-216,86	26,19	15,92	34,26	6,24
	0,90	1418,87	-216,86	23,68	11,21	39,36	10,23
<b>8462</b>	0,50	1466,07	-254,28	24,00	17,47	4,33	2,69
	0,80	1466,07	-254,28	32,81	14,00	15,93	13,47

**Tabla E.5** Error relativo porcentual para cada propiedad media en el plano: Número de trazas contenidas en el plano (N° trazas), Media de largo de traza observada (media largo), Desviación estándar del largo de traza e intensidad de fracturamiento areal (P21). Sector Esmeralda Hw.

<b>DTM</b>	<b>r min</b>	<b>Coord x</b>	<b>Coord y</b>	<b>N° trazas</b>	<b>media largo</b>	<b>SD largo</b>	<b>P21</b>
<b>3476</b>	0,50	894,27	-532,45	16,14	0,77	7,42	16,78
	0,60	894,27	-532,45	12,05	1,91	6,22	10,42
	0,70	894,27	-532,45	18,37	0,72	5,82	17,89
	0,80	894,27	-532,45	6,18	0,58	5,04	4,35
	0,90	894,27	-532,45	14,83	8,89	7,04	4,18
<b>3518</b>	0,50	893,09	-538,53	13,21	18,89	9,88	2,69
	0,60	893,09	-538,53	17,72	38,43	12,88	13,44
	0,70	893,09	-538,53	2,92	16,40	10,50	12,26

	0,80	893,09	-538,53	11,33	5,60	1,73	7,59
	1,00	893,09	-538,53	0,83	0,22	2,57	2,31
<b>3675</b>	0,70	886,43	-558,04	9,17	8,21	7,65	0,31
	0,80	886,43	-558,04	10,71	10,32	9,09	0,18
	1,00	886,43	-558,04	18,16	12,09	14,83	3,05
<b>3762</b>	0,50	1017,53	-254,99	18,57	12,41	12,40	4,47
	0,60	1017,53	-254,99	9,42	10,76	13,53	4,42
	0,70	1017,53	-254,99	22,50	14,02	13,88	4,41
	0,80	1017,53	-254,99	15,45	13,78	28,97	0,74
<b>4909</b>	0,50	868,11	-581,97	14,14	17,90	22,50	6,72
	0,70	868,11	-581,97	10,90	19,48	32,05	11,31
	0,80	868,11	-581,97	20,83	22,05	33,31	6,04
	1,00	868,11	-581,97	9,17	20,64	12,34	13,81
<b>5014</b>	0,50	856,27	-598,85	1,40	0,28	0,77	1,54
	0,70	856,27	-598,85	11,25	0,63	1,08	9,67
<b>5450</b>	0,50	950,74	-308,37	19,25	14,49	8,49	1,81
	0,60	950,74	-308,37	12,06	12,66	32,91	2,55
	0,70	950,74	-308,37	3,33	8,62	42,51	6,28
<b>5860</b>	0,50	934,47	-301,11	15,94	9,40	7,49	1,51
	0,70	934,47	-301,11	23,44	8,02	4,86	13,12
	0,90	934,47	-301,11	2,86	5,72	3,68	8,20
<b>5949</b>	0,50	933,59	-278,52	8,17	12,49	16,28	4,72
	0,70	933,59	-278,52	13,08	12,85	32,61	0,97
	1,00	933,59	-278,52	38,61	19,25	40,16	11,97
<b>7044</b>	0,60	945,32	-316,41	3,13	7,54	3,60	4,11
	0,80	945,32	-316,41	3,00	2,37	3,49	5,73
<b>7261</b>	0,50	1141,88	-259,40	11,38	13,99	6,96	4,11
	0,70	1141,88	-259,40	15,67	11,43	2,27	2,01
	0,90	1141,88	-259,40	24,29	9,96	1,93	12,15

**Tabla E.6** Error relativo porcentual para cada propiedad media en el plano: Número de trazas contenidas en el plano (N° trazas), Media de largo de traza observada (media largo), Desviación estándar del largo de traza e intensidad de fracturamiento areal (P21). Sector RENO.

DTM	r min	Coord x	Coord y	N° trazas	media largo	SD largo	P21
<b>1097</b>	0,50	731,23	1283,88	3,19	4,21	9,62	7,60
	0,70	731,23	1283,88	28,94	20,40	14,23	2,29
	0,90	731,23	1283,88	22,95	14,90	18,15	5,27
<b>4990</b>	0,30	561,51	1132,04	20,59	13,87	5,63	4,26
	0,50	561,51	1132,04	24,73	12,48	6,76	9,02
	0,70	561,51	1132,04	20,64	17,99	5,96	0,94
	0,90	561,51	1132,04	23,28	16,79	6,67	2,53

	1,00	561,51	1132,04	11,50	3,65	10,39	7,21
<b>6793</b>	1,00	529,97	1228,19	7,31	4,12	5,85	2,61
<b>7176</b>	0,70	544,88	1280,89	37,35	30,68	24,90	4,66
<b>7180</b>	1,00	492,71	1250,49	0,12	4,02	3,87	4,13
<b>7296</b>	0,60	531,29	1176,01	32,59	21,32	2,45	3,84
	0,80	531,29	1176,01	9,43	15,57	5,56	7,83
	1,00	531,29	1176,01	10,33	5,54	2,96	4,69
<b>7376</b>	0,80	519,27	1267,91	16,94	19,72	4,13	6,58
<b>7662</b>	0,80	532,34	1210,74	17,60	18,13	4,89	3,83
	1,00	532,34	1210,74	17,62	11,77	3,56	3,57
<b>7787</b>	0,80	665,20	1421,09	24,88	19,99	17,65	0,09
<b>8639</b>	0,80	567,43	1321,29	20,33	15,30	4,30	1,77
<b>9077</b>	0,30	378,61	922,74	19,19	16,40	12,37	0,54
	0,50	378,61	922,74	18,14	20,28	17,76	6,18
	0,70	378,61	922,74	17,90	16,32	33,05	1,29

**Tabla E.7** Dirección del plano-ventana de muestreo subvertical. Sectores Esmeralda y RENO.

**Sector Esmeralda**

<b>DTM</b>	<b>Plunge[deg]</b>	<b>Trend[deg]</b>			
<b>2715</b>	-18,88	160,00	<b>6211</b>	8,71	80,00
<b>2814</b>	-18,88	160,00	<b>6445</b>	-22,86	90,00
<b>2859</b>	17,50	120,00	<b>6446</b>	0,00	90,00
<b>2995</b>	-18,25	195,00	<b>6667</b>	-7,69	220,00
<b>3476</b>	-6,97	185,00	<b>6944</b>	0,00	110,00
<b>3518</b>	0,00	198,00	<b>7044</b>	0,00	213,00
<b>3564</b>	9,85	80,00	<b>7233</b>	0,00	260,00
<b>3675</b>	-20,00	180,00	<b>7261</b>	0,00	120,00
<b>3762</b>	0,00	200,00	<b>7264</b>	0,00	67,00
<b>4185</b>	-20,00	180,00	<b>7440</b>	0,00	115,00
<b>4748</b>	9,67	195,00	<b>7441</b>	10,64	70,00
<b>4909</b>	-1,55	219,00	<b>7454</b>	0,00	70,00
<b>5014</b>	-7,69	220,00	<b>7457</b>	-23,96	90,00
<b>5235</b>	14,51	75,00	<b>7487</b>	-18,17	80,00
<b>5450</b>	-23,66	200,00	<b>7511</b>	-18,43	90,00
<b>5788</b>	-12,11	195,00	<b>7872</b>	-19,37	195,00
<b>5860</b>	-9,66	230,00	<b>7918</b>	0,00	200,00
<b>5892</b>	-8,68	210,00	<b>7919</b>	-8,90	110,00
<b>5949</b>	4,10	35,00	<b>7922</b>	-8,68	240,00
<b>6087</b>	0,00	110,00	<b>7945</b>	0,00	130,00
<b>6153</b>	15,58	40,00	<b>8030</b>	-18,88	110,00
<b>6201</b>	0,00	110,00	<b>8046</b>	9,67	15,00
			<b>8076</b>	0,00	90,00

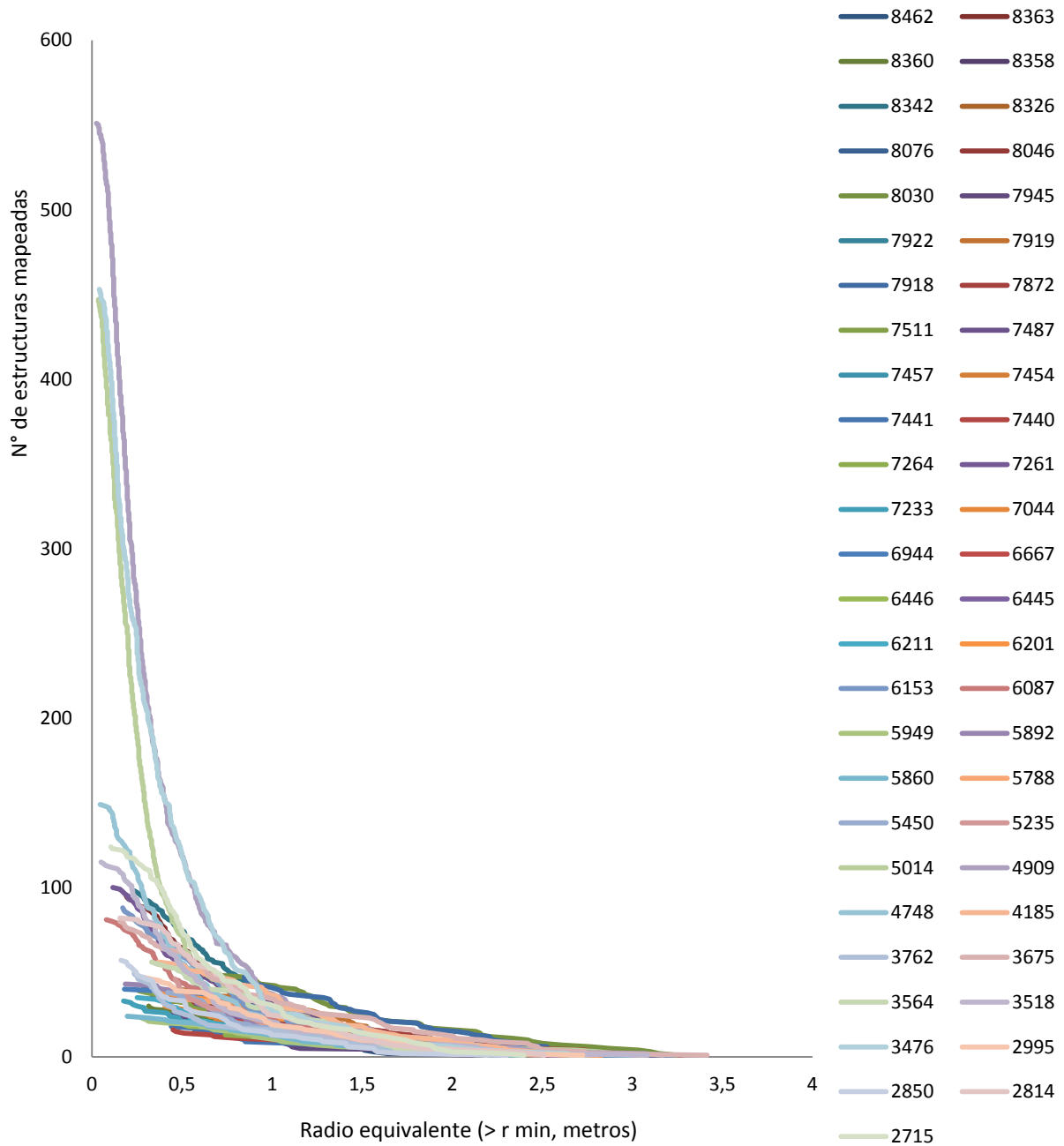
<b>8326</b>	14,07	110,00
<b>8342</b>	-8,21	30,00
<b>8358</b>	14,04	90,00
<b>8360</b>	15,19	200,00
<b>8363</b>	-21,94	205,00
<b>8462</b>	-40,00	90,00

**Sector RENO**

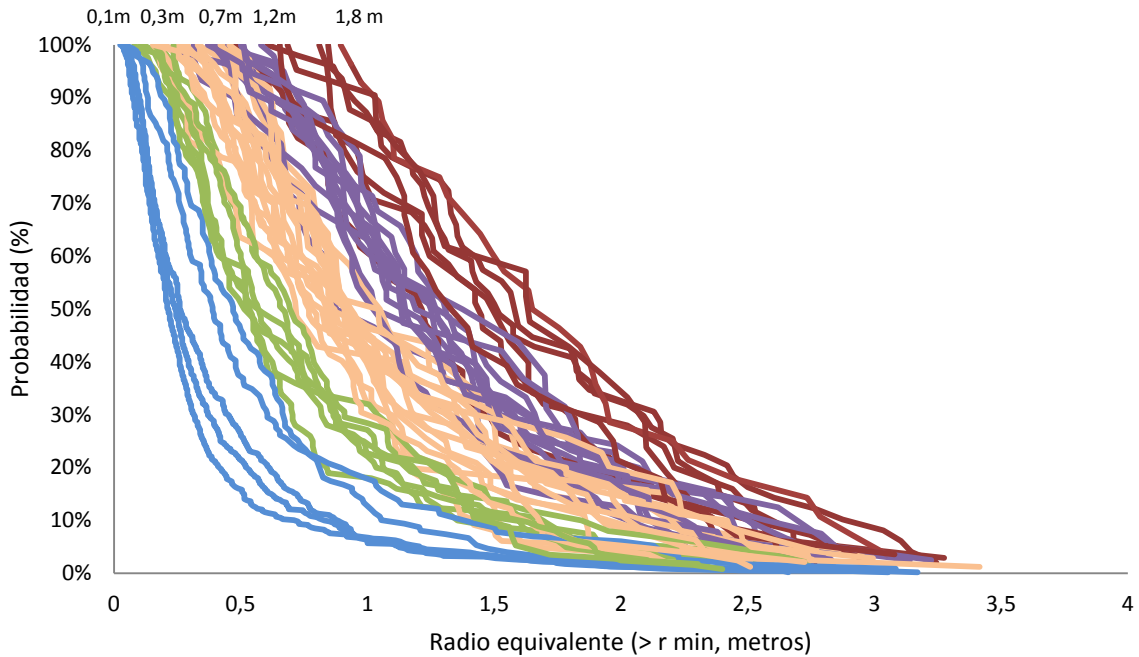
<b>DTM</b>	<b>Plunge[deg]</b>	<b>Trend[deg]</b>
<b>1097</b>	9,85	170,00
<b>4990</b>	7,63	240,00
<b>6793</b>	4,92	190,00
<b>7176</b>	0,00	150,00

<b>7180</b>	20,00	180,00
<b>7295</b>	22,25	247,00
<b>7296</b>	0,00	235,00
<b>7376</b>	9,66	130,00
<b>7662</b>	17,85	165,00
<b>7783</b>	-1,65	195,00
<b>7784</b>	8,93	135,00
<b>7786</b>	9,41	160,00
<b>7787</b>	4,95	160,00
<b>7851</b>	9,66	130,00
<b>8259</b>	0,00	205,00
<b>8486</b>	0,00	200,00
<b>8639</b>	10,00	180,00
<b>9077</b>	0,00	250,00

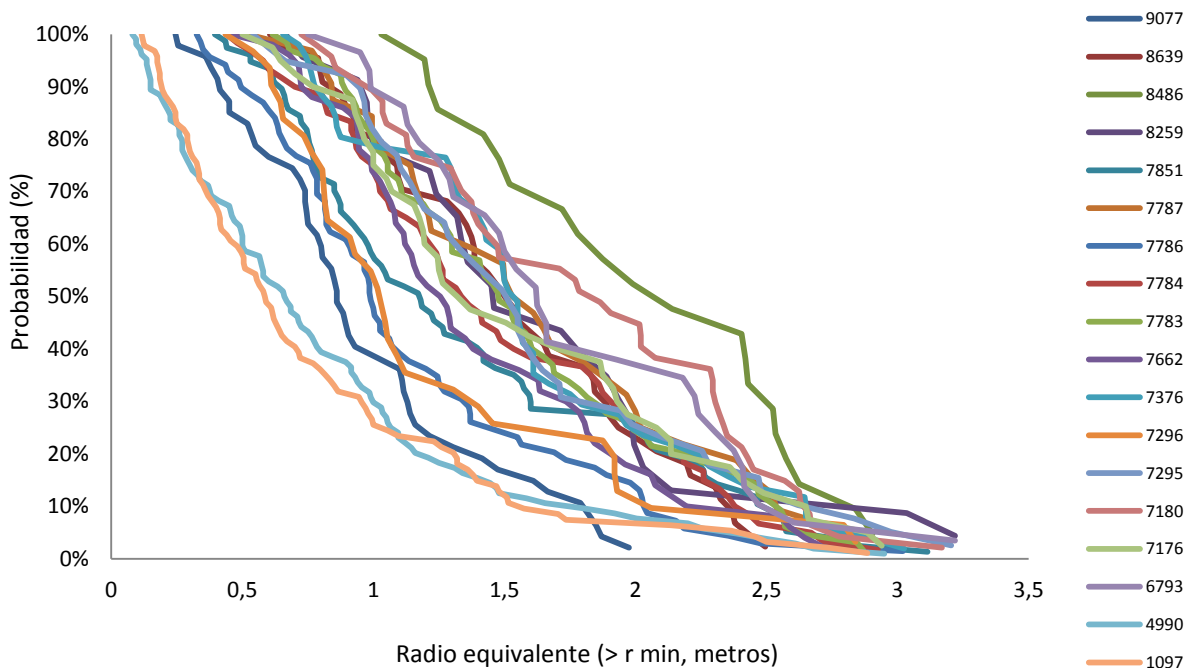
**ANEXO F: Gráficos no incluidos en el cuerpo de este informe**



**Figura F.1** N° de estructuras mapeadas en función del tamaño (radio equivalente) mínimo de corte. Sector Esmeralda. Corresponde al gráfico de la figura 3.17 al que se le agregaron los DTM mapeadas con más de 150 estructuras, de ahí el efecto bajo los 0,7 m de radio mínimo (sesgo por tamaño).



**Figura F.2** Gráfico de probabilidad de ocurrencia del tamaño de estructura en galería asociada al mapeo. Para un tamaño de 1,5, existe entre un 5% a un 60% de probabilidad de ocurrencia en una galería. Sector Esmeralda.



**Figura F.3** Gráfico de probabilidad de ocurrencia del tamaño de estructura en galería asociada al mapeo. Para un tamaño de 1,5, existe entre un 5% a un 70% de probabilidad de ocurrencia en una galería. Sector RENO.

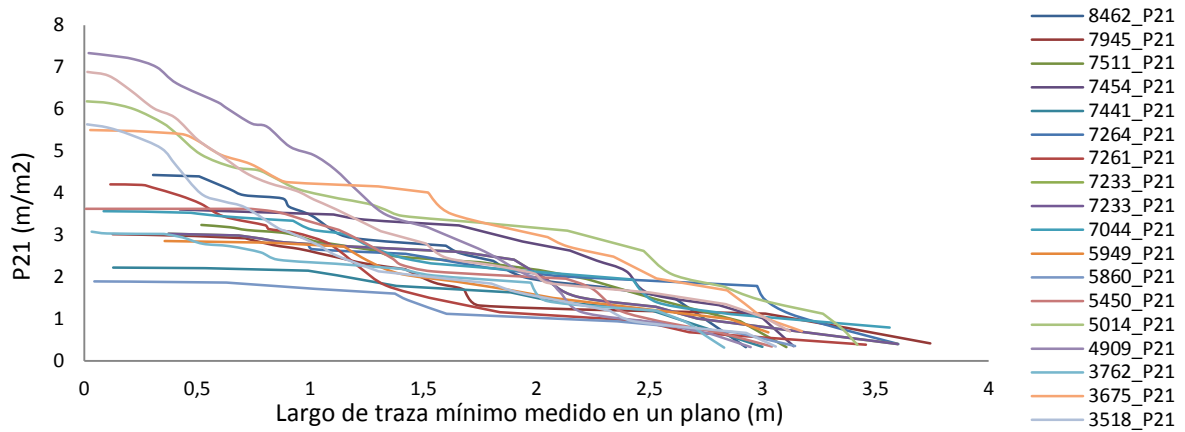


Figura F.4 Intensidad P21 en función de largo de traza mínimo. Sector Esmeralda Hw.

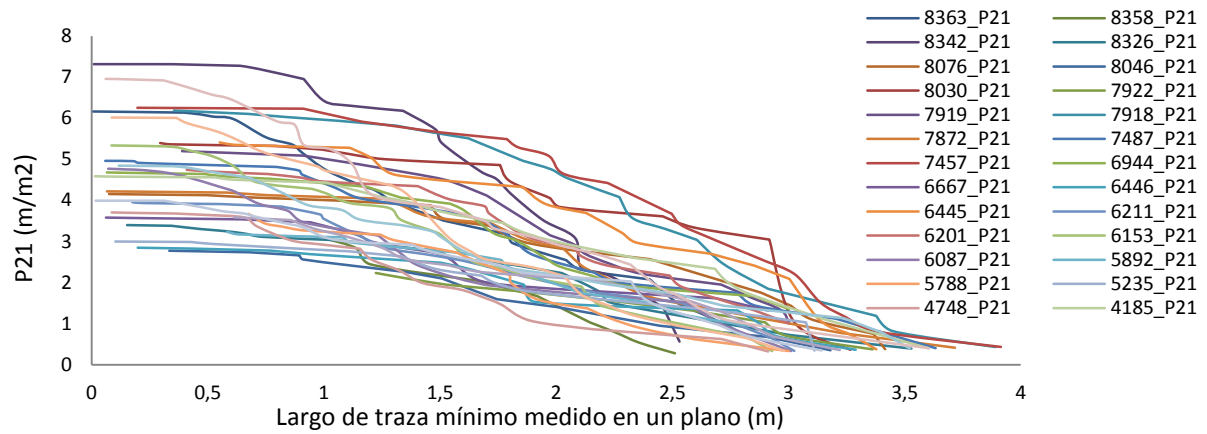


Figura F.5 Intensidad P21 en función de largo de traza mínimo. Sector Esmeralda Fw.

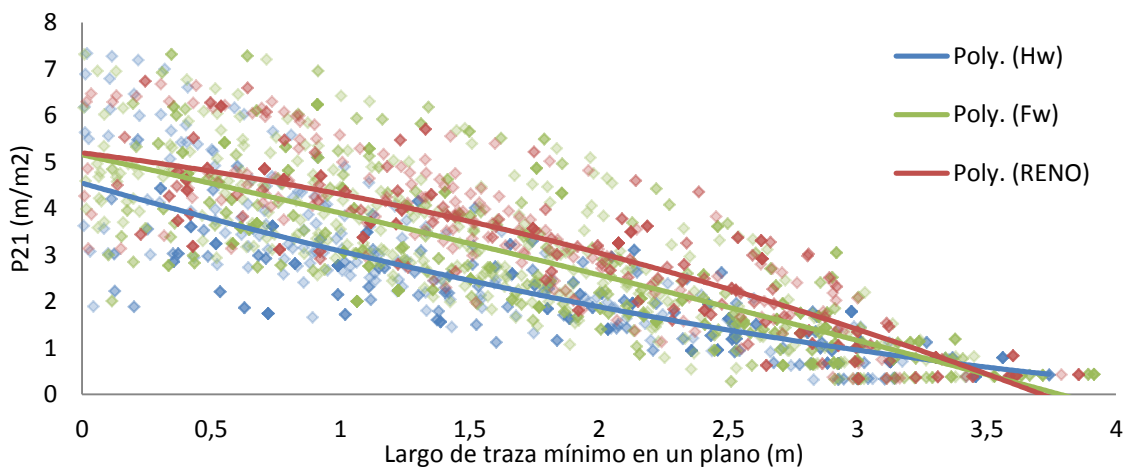
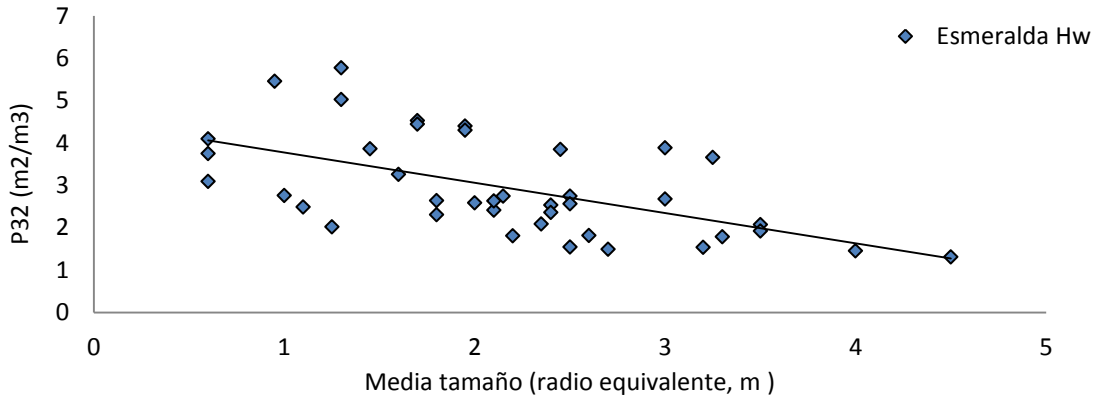
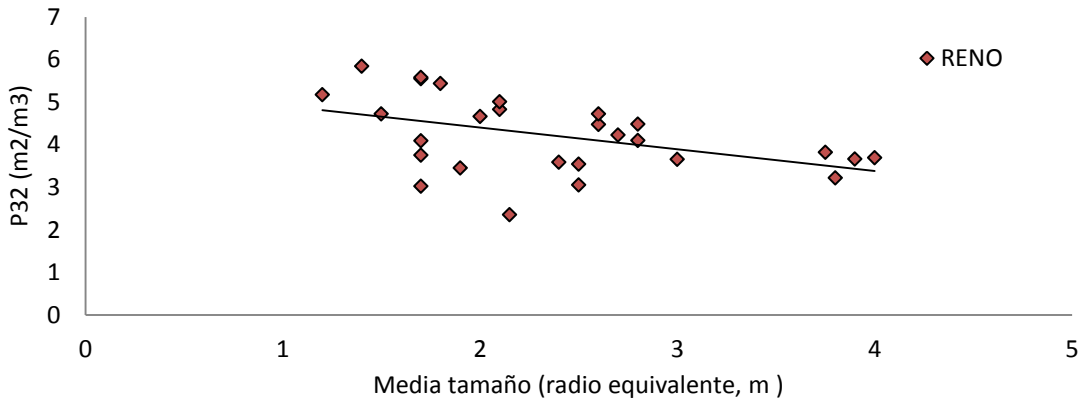


Figura F.6 Intensidad P21 en función de largo de traza mínimo. Tres sectores de la mina.

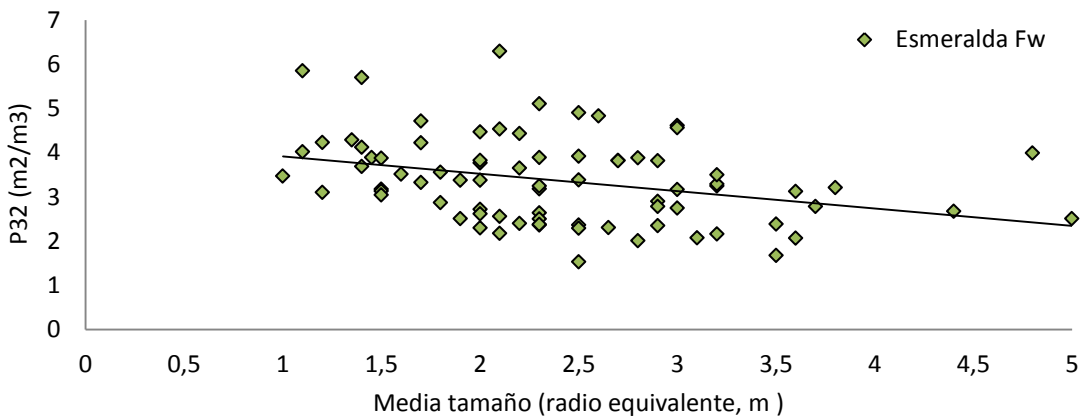




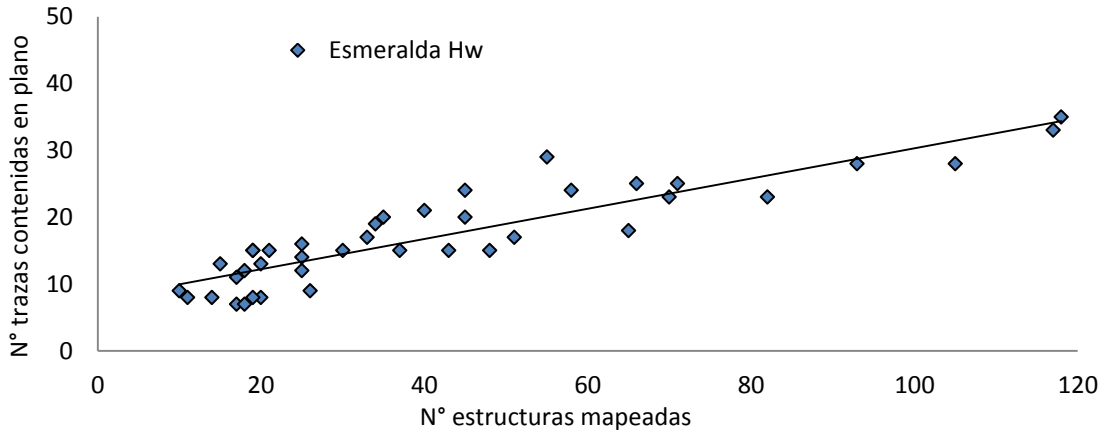
**Figura F.7** Intensidad P32 en función del tamaño real. Sector Esmeralda Hw.



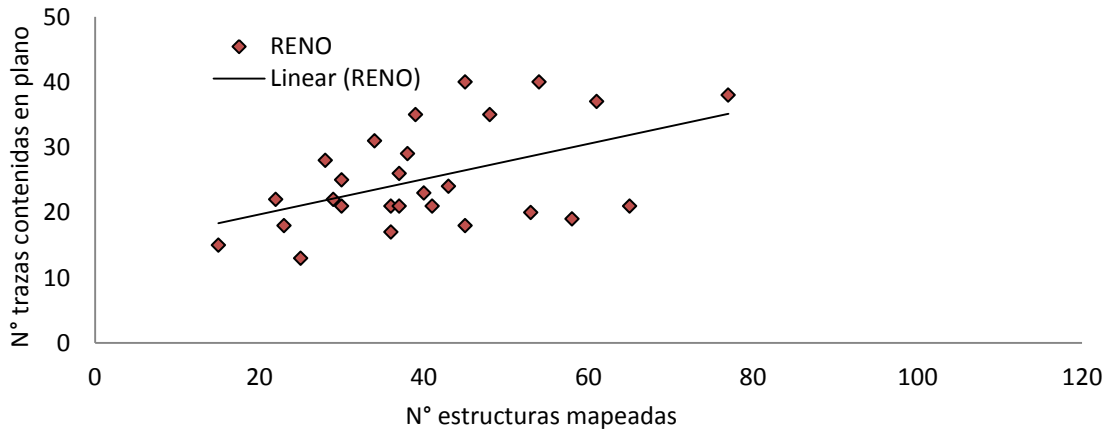
**Figura F.8** Intensidad P32 en función del tamaño real. Sector Esmeralda RENO.



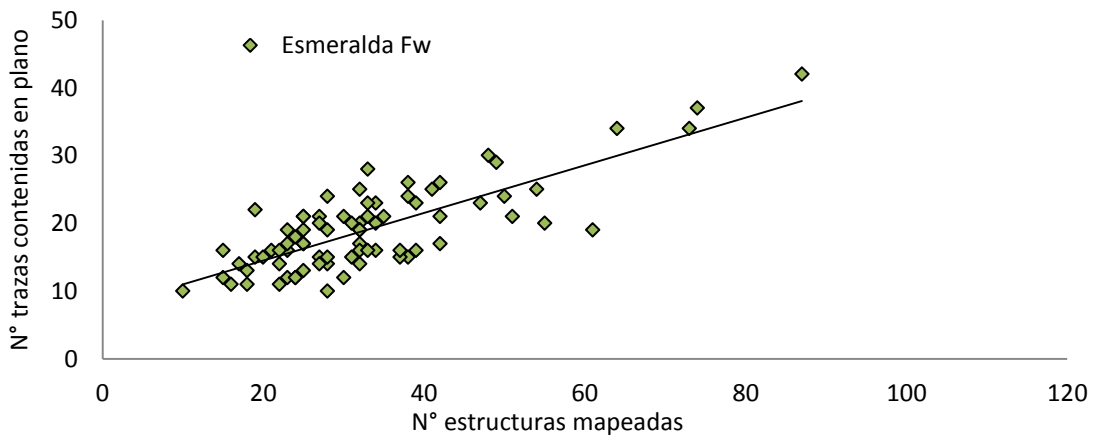
**Figura F.9** Intensidad P32 en función del tamaño real. Sector Esmeralda Fw.



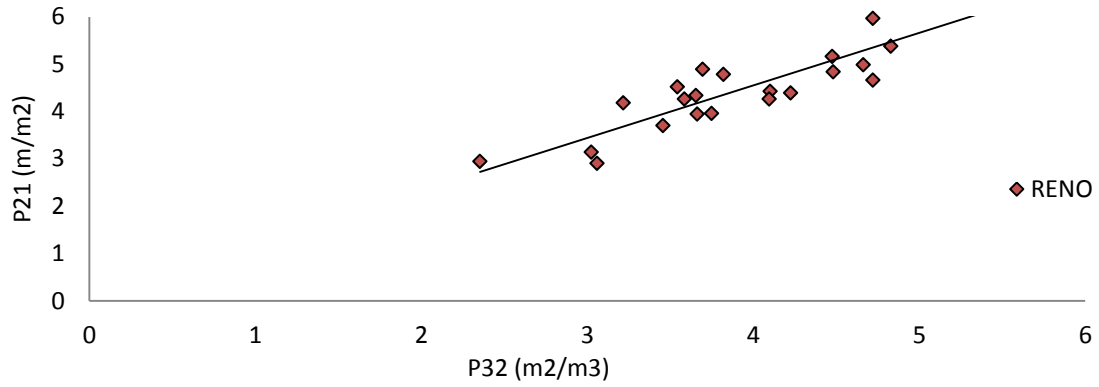
**Figura F.10** N° de trazas contenidas en el plano (ventana de mapeo) en función del número de estructuras mapeadas. Sector Esmeralda Hw.



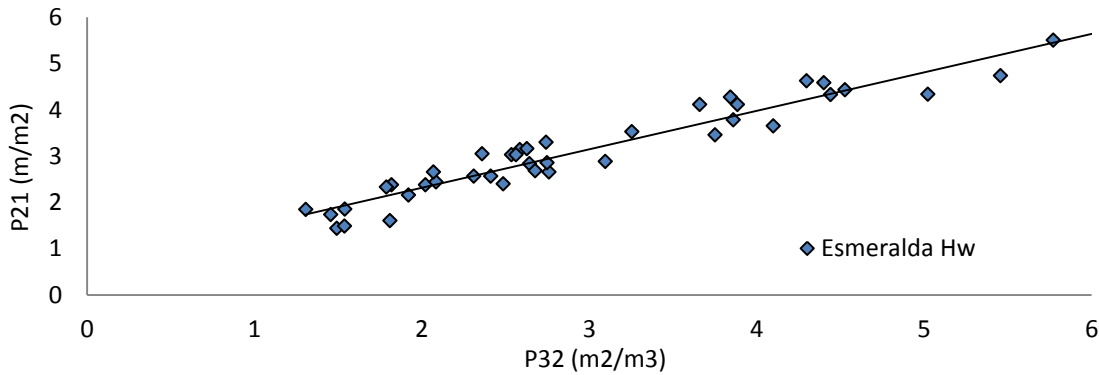
**Figura F.11** N° de trazas contenidas en el plano (ventana de mapeo) en función del número de estructuras mapeadas. Sector RENO.



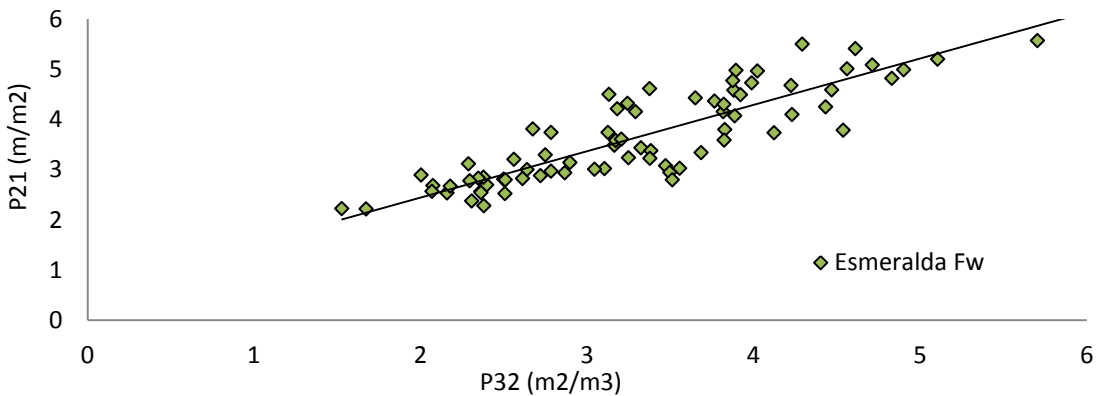
**Figura F.12** N° de trazas contenidas en el plano (ventana de mapeo) en función del número de estructuras mapeadas. Sector Esmeralda Fw



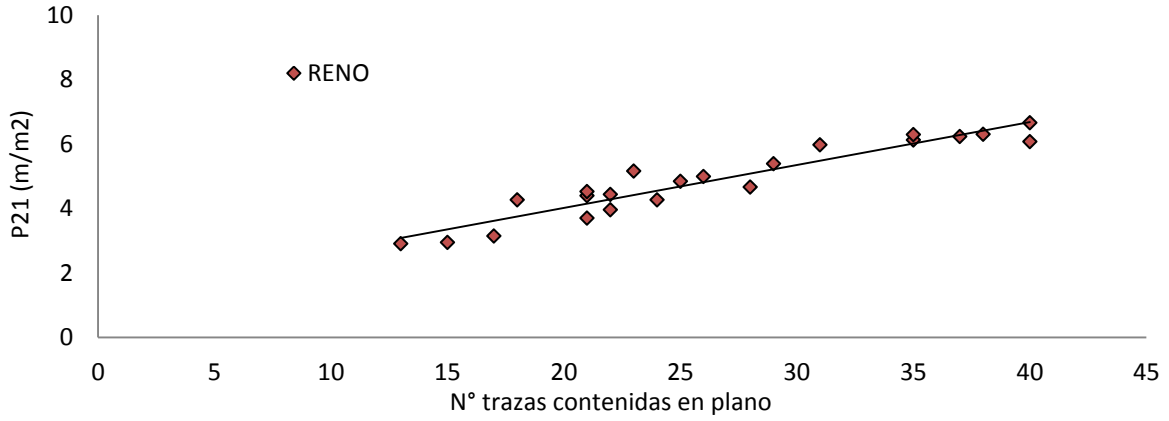
**Figura F.13** Intensidad de fracturamiento P21 en función de la intensidad de fracturamiento P32. Sector RENO.



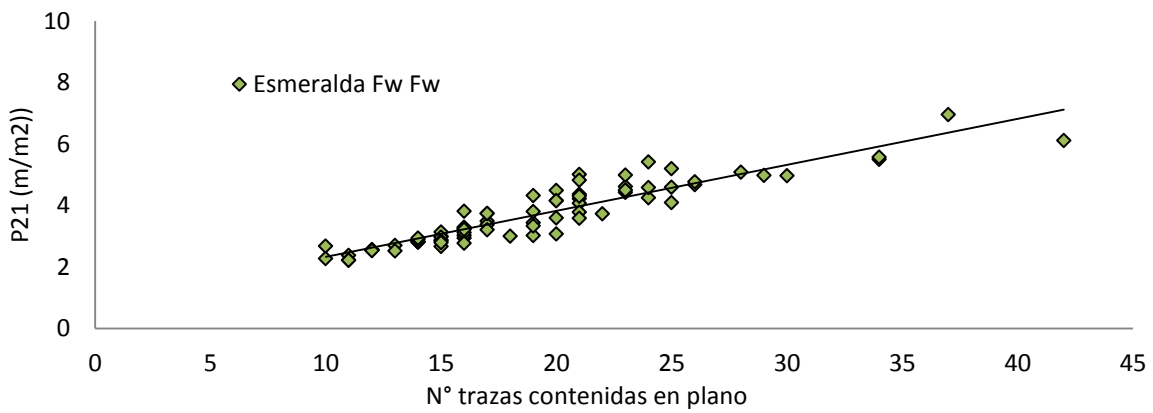
**Figura F.14** Intensidad de fracturamiento P21 en función de la intensidad de fracturamiento P32. Sector Esmeralda Hw.



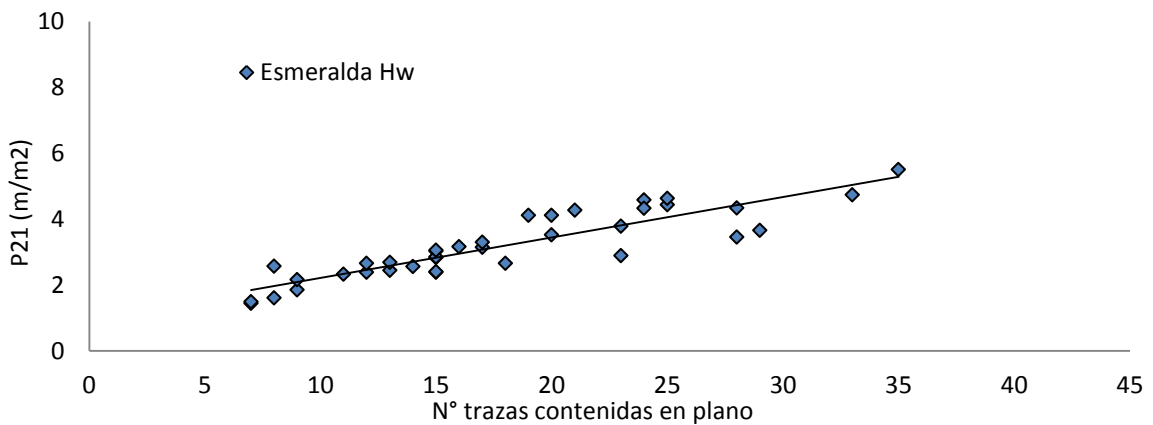
**Figura F.15** Intensidad de fracturamiento P21 en función de la intensidad de fracturamiento P32. Sector Esmeralda Fw.



**Figura F.16** Intensidad de fracturamiento P21 en función del N° de trazas contenidas en el plano. Sector RENO.



**Figura F.17** Intensidad de fracturamiento P21 en función del N° de trazas contenidas en el plano. Sector Esmeralda Fw.



**Figura F.18** Intensidad de fracturamiento P21 en función del N° de trazas contenidas en el plano. Sector Esmeralda Hw.

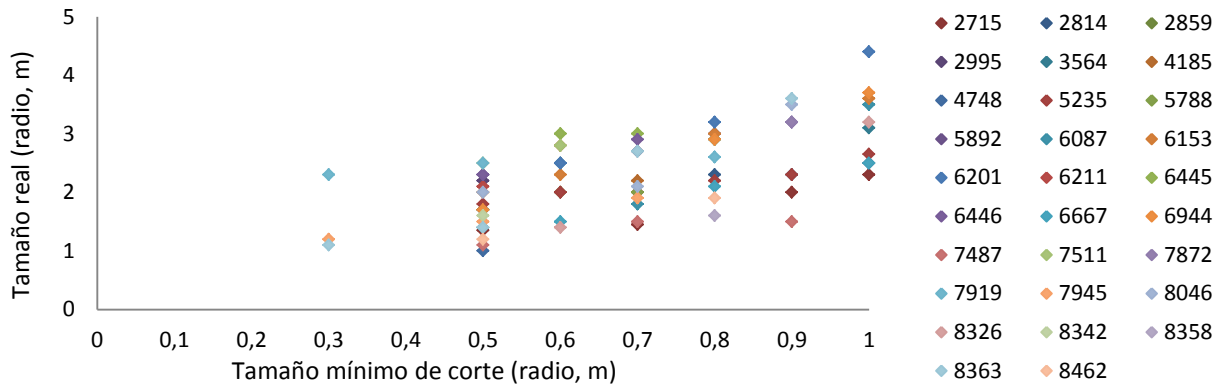


Figura F.19 Tamaño real en función del tamaño de corte mínimo. Sector Esmeralda Fw.

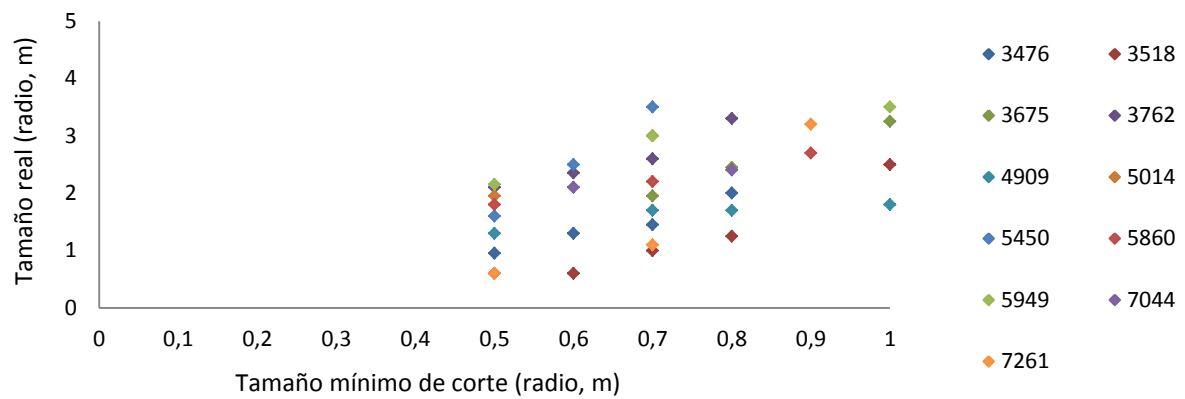


Figura F.20 Tamaño real en función del tamaño de corte mínimo. Sector Esmeralda Hw.

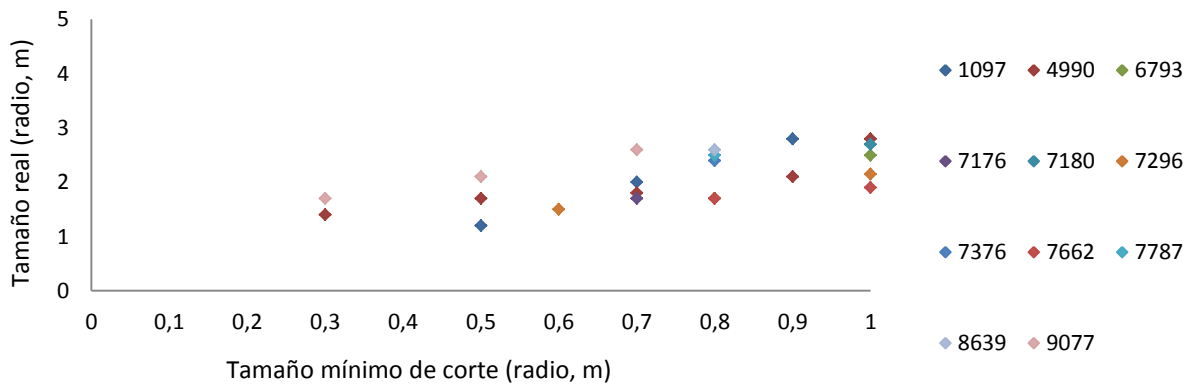
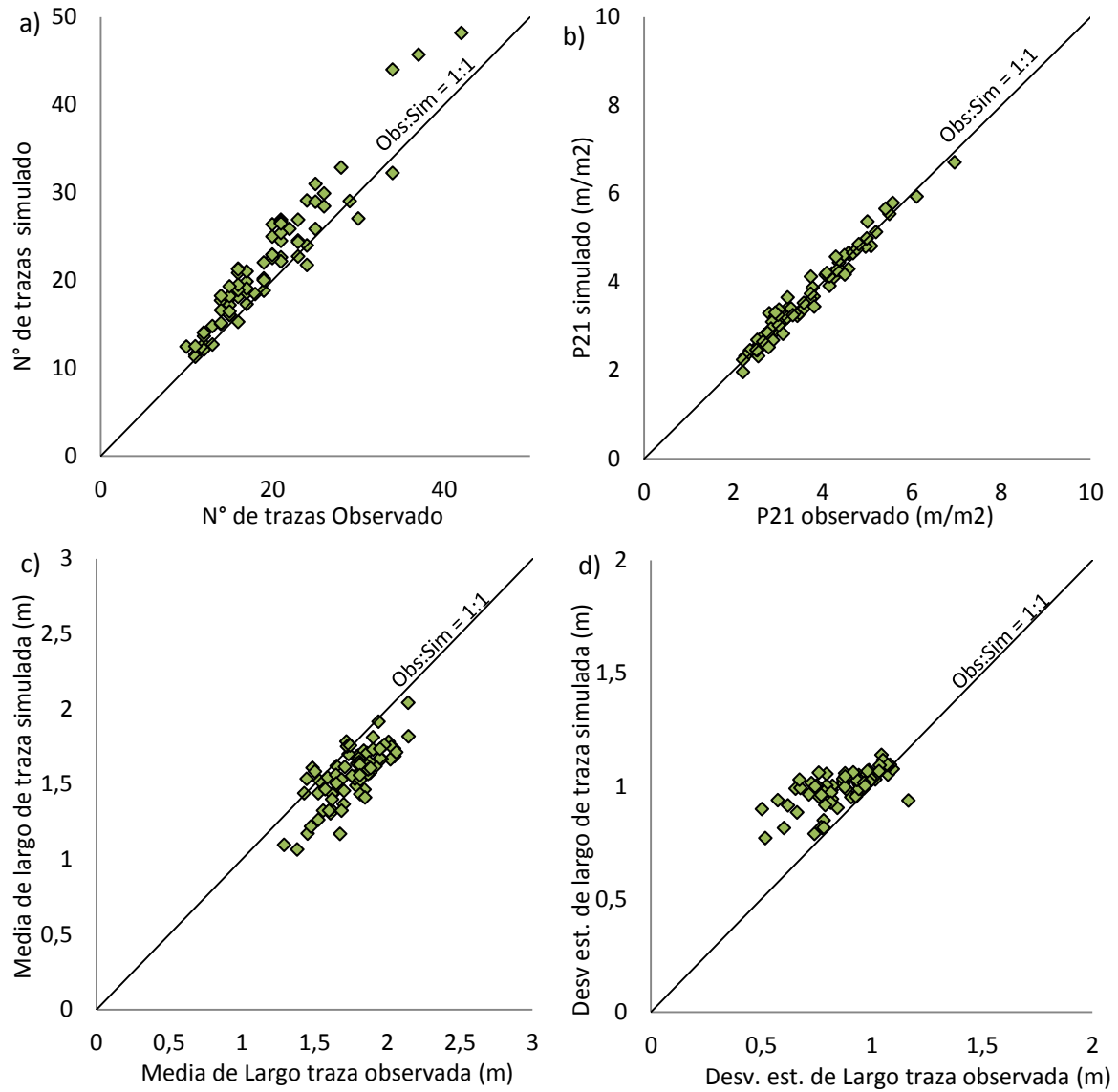
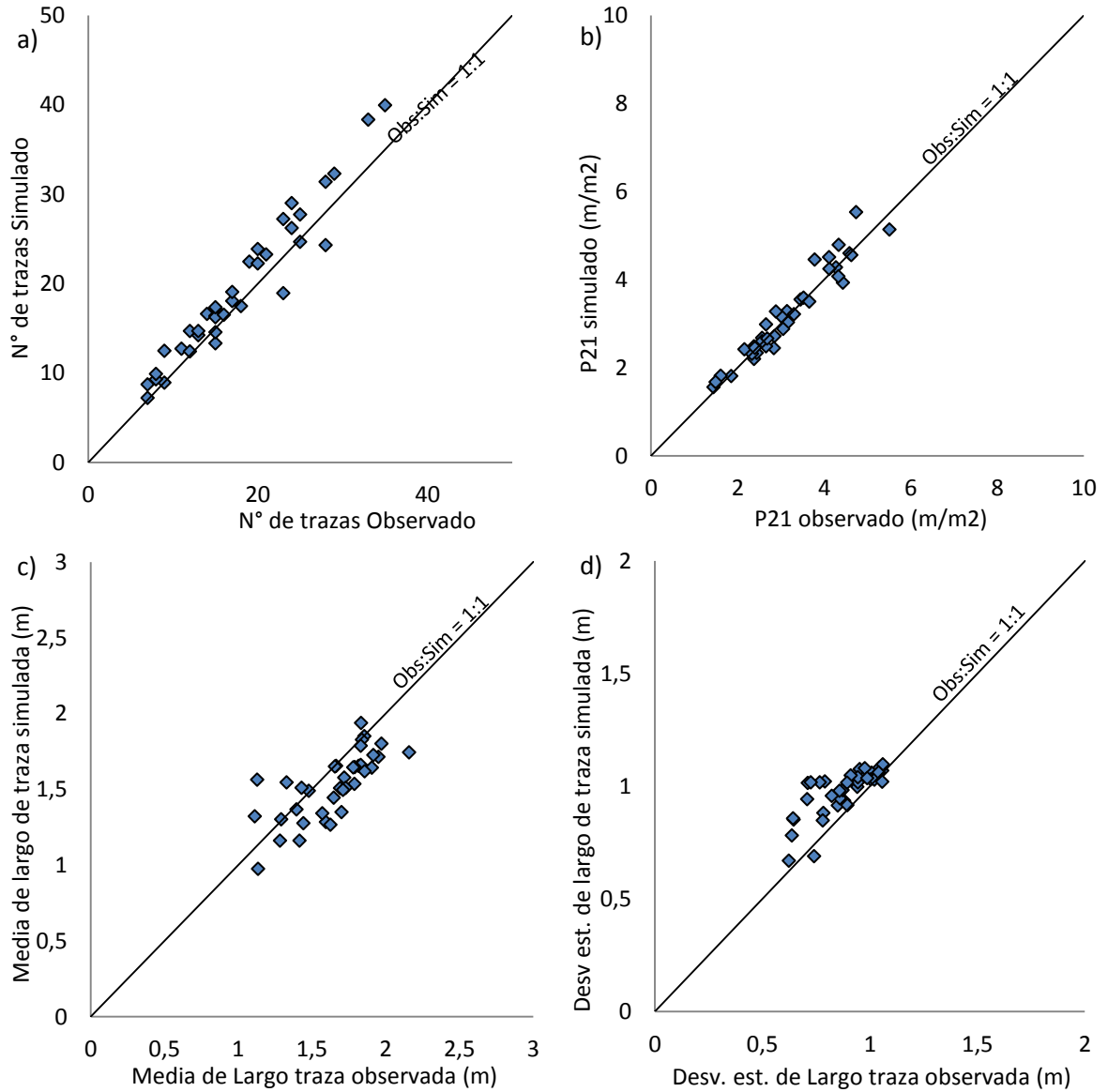


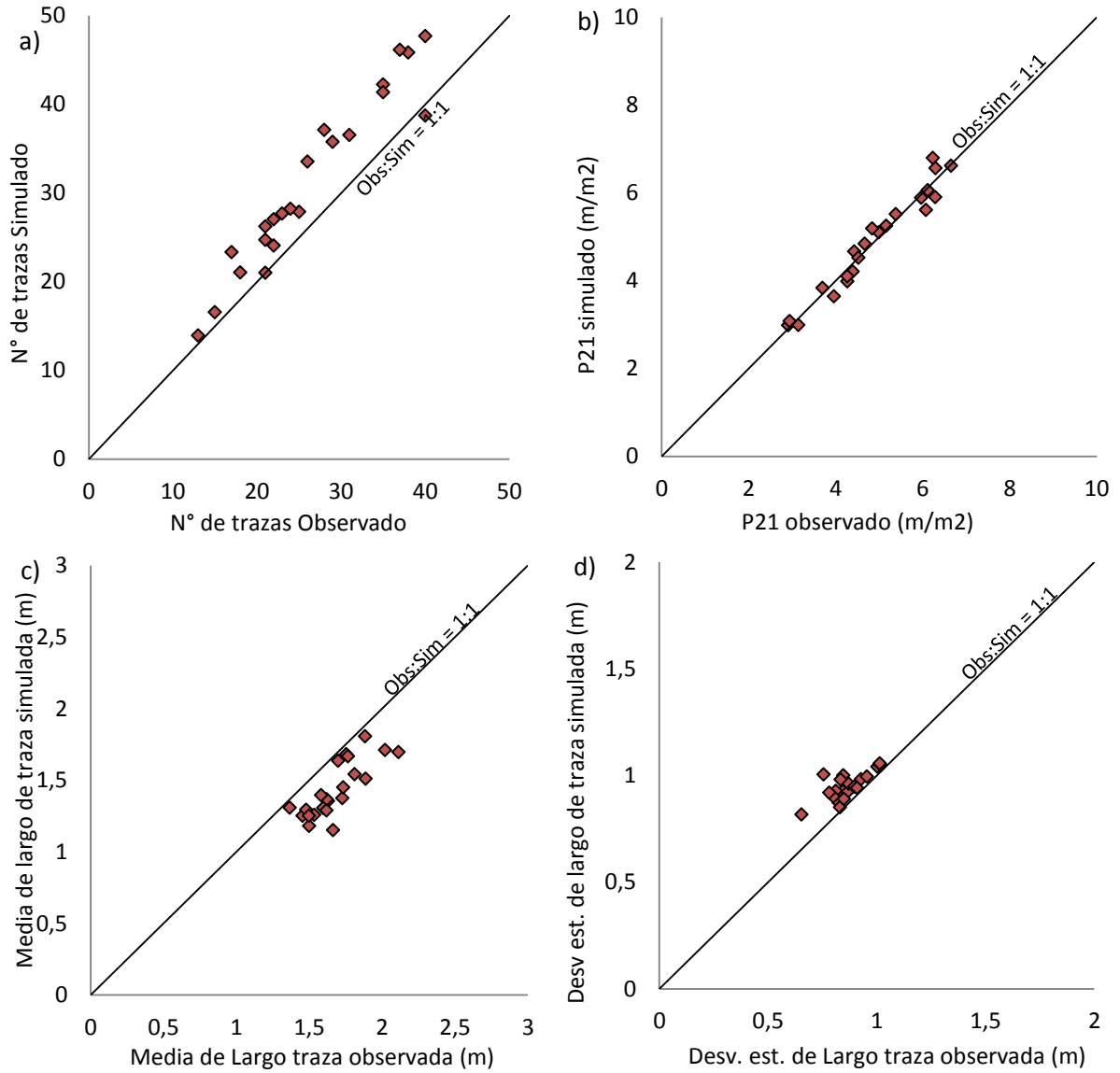
Figura F.21 Tamaño real en función del tamaño de corte mínimo. Sector RENO.



**Figura F.22** Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones. a) N° de trazas observado-promedio simulaciones, b)  $P_{21}$  observado/promedio simulaciones, c) media de largo de traza/promedio simulaciones, d) Desviación estándar de largo de traza observado/promedio simulaciones. Esmeralda Fw.



**Figura F.23** Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones. a) N° de trazas observado-promedio simulaciones, b)  $P_{21}$  observado/promedio simulaciones, c) media de largo de traza/promedio simulaciones, d) Desviación estándar de largo de traza observado/promedio simulaciones. Esmeralda Fw.



**Figura F.24** Relación valor observado/valor promedio de 40 simulaciones. a) N° de trazas observado-promedio simulaciones, b) P<sub>21</sub> observado/promedio simulaciones, c) media de largo de traza/promedio simulaciones, d) Desviación estándar de largo de traza observado/promedio simulaciones. Esmeralda Fw.



**ANEXO G: Instrucciones para aplicar la metodología completa mediante el uso de códigos de Macroinstrucciones de FracMan (.fmf) y Microsoft Excel (VBA), para un tamaño mínimo de corte establecido.**

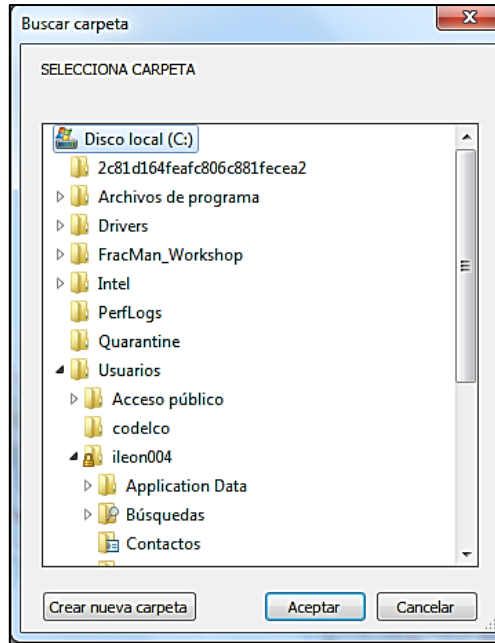
Los pasos del análisis son los siguientes:

1. Luego de mapear las estructuras en *3DM Analyst*, los datos deben ser exportadas como un archivo de texto (.txt). Este archivo contiene las características principales para cada estructura mapeada: Posición (CenterX, CenterY, CenterZ), Dip, DipDirection, Tamaño (Diameter) y área.

Center X	Center Y	Center Z	Dip°	Direction°	Diameter
1450.93	67.31	2200.06	77.3	326.8	4.00
1452.17	67.03	2199.81	64.2	264.4	3.91
1451.97	68.40	2199.59	84.1	182.6	4.57
1451.31	66.30	2199.78	48.8	287.7	3.61
1451.64	66.15	2199.34	71.3	20.4	2.88
1450.12	66.48	2199.81	57.3	209.0	1.15
1449.80	66.53	2199.59	51.7	270.6	3.75
1450.48	67.72	2200.24	87.5	0.2	3.27
1452.79	68.25	2199.44	71.0	265.6	2.92
1453.01	68.11	2198.80	42.9	301.5	3.80
1452.56	67.25	2199.37	52.6	266.4	3.79
1450.46	66.20	2199.46	86.9	245.1	3.11
1450.15	68.48	2199.93	78.9	247.8	2.15
1450.99	66.72	2200.14	52.0	250.4	0.57
1451.10	66.40	2200.02	81.2	253.6	0.90
1451.23	65.82	2199.59	49.7	186.5	0.21
1451.14	65.90	2199.66	79.1	192.4	0.38
1451.36	65.63	2199.24	58.7	293.9	1.87
1451.98	67.58	2199.38	42.9	250.6	4.80
1452.48	67.54	2200.26	84.8	243.2	0.33
1451.39	69.48	2199.44	56.1	282.0	1.45
1451.44	69.62	2199.20	56.7	273.2	1.16
1451.07	68.10	2200.25	59.9	281.5	1.38
1450.26	66.18	2199.69	66.6	291.8	1.73
1449.75	67.27	2199.99	57.0	49.5	3.35
1452.01	65.89	2198.77	55.8	56.0	2.12
1452.48	67.12	2199.61	87.0	244.8	3.53
1452.78	68.63	2199.70	77.7	327.6	0.94
1452.74	68.19	2199.55	70.6	276.0	3.02
1452.47	67.88	2200.30	44.2	247.5	1.09
1452.47	67.41	2200.10	36.8	269.4	1.43
1452.66	69.65	2198.59	86.8	173.6	2.24
1451.32	66.47	2200.15	58.6	282.9	0.36
1449.99	66.92	2199.90	37.8	259.3	2.28
1449.57	67.04	2199.85	72.3	106.6	1.73
1452.39	66.96	2199.85	64.3	274.3	1.97
1452.70	67.45	2199.56	87.7	80.0	1.60
1453.41	68.91	2198.31	10.5	102.5	0.97
1453.28	69.52	2198.09	13.5	238.1	1.22
1453.39	68.70	2198.49	89.3	186.5	0.87
1452.95	69.51	2198.56	40.3	251.4	1.83
1453.44	68.47	2198.33	40.3	204.7	0.91
1453.34	68.54	2198.72	71.7	269.2	0.67
1452.84	67.27	2199.20	84.3	98.4	0.64
1452.76	67.07	2199.26	80.5	263.7	0.81
1452.78	67.61	2199.30	26.5	293.8	1.14
1452.83	69.05	2199.10	70.6	264.1	1.13
1453.42	68.55	2198.41	11.2	288.7	0.98

**Figura G.1** Archivo de texto obtenido de *3DM Analyst*.

2. Abrir *Microsoft Excel*, Importar los archivos de texto de los DTM mapeados mediante la macro 'Sub abrir\_txt()'. Esta macro importa cada archivo de texto en una hoja distinta del mismo libro de *Microsoft Excel*. Al ejecutar esta macro se despliega una ventana en la cual se debe buscar la carpeta de origen de los archivos de los mapeos de DTM.



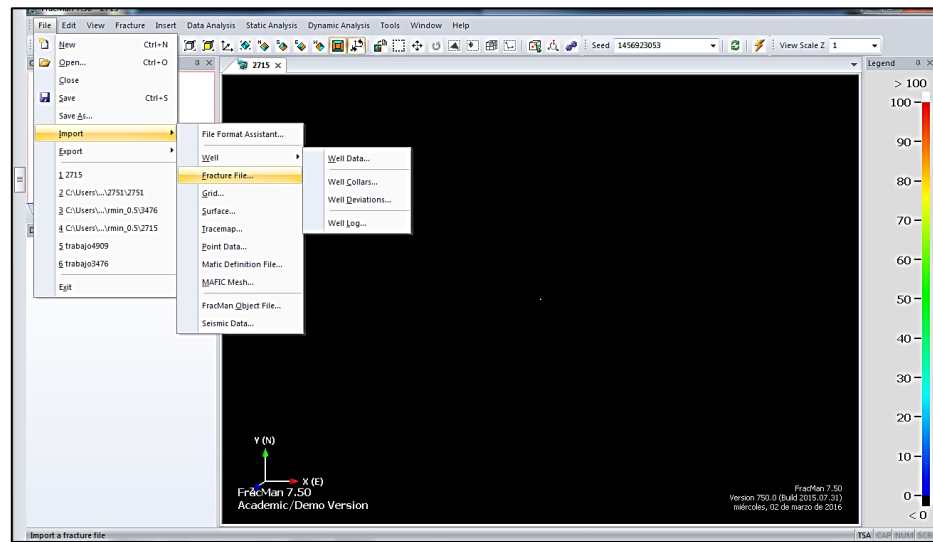
**Figura G.2** Ventana desplegada por la macro 'Sub abrir\_txt'.

3. Cuando estén cargadas todas las DTM, se debe ejecutar la macro 'Sub ordenar\_tabla()', ésta elimina las columnas innecesarias y agrega las columnas 'radius', 'sides' y 'count', además de ordenar de mayor a menor radio las columnas. La columna 'radius' corresponde a la división por 2 de la columna 'Diameter', y es necesaria ya que el parámetro de tamaño con el que trabaja FracMan es el radio. La columna 'sides' indica cuantos lados deben tener las estructuras importadas en Fracman, y 64 lados funciona bien como una aproximación de una estructura circular. La columna 'Count' enumera de la estructura de mayor radio con un el número 1 y así de forma creciente para tamaños menores. Esto es necesario para trabajar los gráficos de curvas acumuladas inversas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
x	y	z	dip	directio	Diamete	Max. Ch	Area	radius	sides			
1466,07	-254,28	2200,89	62,2	304,3	4,8	4,8	17,92	2,4	64		1	0,025
1468,48	-254,2	2200,55	40,8	277,9	3,28	3,28	8,34	1,64	64		2	0,05
1466,88	-256	2201,62	79,2	292,9	3,13	3,13	7,62	1,565	64		3	0,075
1468,39	-254,29	2200,8	64,2	245,7	3,02	3,02	7,07	1,51	64		4	0,1
1467,93	-256,98	2200,72	55	316	3	3	7,09	1,5	64		5	0,125
1467,65	-254,68	2201,65	18	226,7	2,93	2,93	6,66	1,465	64		6	0,15
1467,81	-255,57	2201,21	87,3	37,3	2,69	2,69	5,61	1,345	64		7	0,175
1468,16	-254,04	2201,23	78,4	205,3	2,63	2,63	5,35	1,315	64		8	0,2
1468,11	-255,18	2201,39	87,8	212,6	2,34	2,34	4,27	1,17	64		9	0,225
1468,17	-256,66	2200,26	79	36,4	2,29	2,29	4,08	1,145	64		10	0,25
1467,21	-252,32	2199,81	85,7	173,7	2,27	2,27	4,03	1,135	64		11	0,275
1468,69	-255,32	2200,92	87	211,2	2,19	2,19	3,71	1,095	64		12	0,3
1467,38	-254,15	2201,68	56,5	289,1	1,99	1,99	3,07	0,995	64		13	0,325
1467,6	-257,77	2200,41	78,5	54	1,95	1,95	2,95	0,975	64		14	0,35
1468,2	-254,07	2201,27	67,7	269,2	1,94	1,94	2,96	0,97	64		15	0,375
1467,43	-256,57	2201,25	78	82,6	1,88	1,88	2,77	0,94	64		16	0,4
1468,39	-256,22	2200,79	50,8	281,2	1,8	1,8	2,53	0,9	64		17	0,425
1469,12	-254,82	2200,01	36,1	277,6	1,73	1,73	2,36	0,865	64		18	0,45
1468,74	-255,42	2200,93	80,3	51,5	1,73	1,73	2,34	0,865	64		19	0,475
1465,68	-256,54	2201,77	84,7	231,6	1,68	1,68	2,22	0,84	64		20	0,5

**Figura G.3** Tabla editada por la macro 'Ordenar\_Tabla'

4. Luego se debe exportar cada hoja del libro con el nombre del DTM. Estos están listos para ser cargados en FracMan.
5. Importar los archivos con las estructuras del punto anterior en un archivo FracMan (el que los nombres de las propiedades se hayan dado en inglés permite que Fracman reconozca las propiedades automáticamente). Para esto se debe ir a 'File' - 'Import' - 'Fracture File' y buscar el archivo de estructuras en cuestión.



**Figura G.4** Proceso de importación de archivo que contiene las estructuras en FracMan.

6. Insertar una ventana de mapeo de 3 x 3 m en cada set de estructuras. Para esto se debe ir a 'Insert' – 'Traceplane', y luego se debe ajustar el plano de forma vertical, que simule la orientación del frente de desarrollo y darle las dimensiones mencionadas. Por último, todo debe quedar contenido en una región de 9x9x9m ('Insert' – 'Region', y fijar las dimensiones). Esta tarea es completamente manual y debe hacerse para cada caso de análisis.
7. Guardar cambios con el nombre el número del DTM mapeado con la extensión *Fracman Document* (.frd) (extensión de un archivo FracMan).
8. Antes de comenzar a trabajar, revisar si las dimensiones de la región son 9x9x9m y para la ventana de mapeo plana 3x3m, en el caso de que se así, se deben modificar.
9. Abrir el archivo de macro Fracman "macro\_dfns\_estimacion\_tamaño\_p32" (de extensión .fmf). Para correr las macros es necesario que el '*Object*' de OrientationDistribution de la macro coincida con el nombre del '*Fracture Sets*' cargado en FracMan. EJ: "2715\_Filter\_1". Si no es así, se debe reemplazar. Si se desea cambiar, es necesario en

el archivo .fmf (macro de FracMan) cambiar dicho nombre. Para esto, en el archivo .fmf, ir a 'Edición' -'Reemplazar' y escribir el dato a cambiar en 'buscar', EJ:'2715\_Filter\_1' y en 'Reemplazar por' el valor que se desea, EJ:'2814\_Filter\_1'.Luego, presionar 'reemplazar todo' y guardar los cambios.

```

END
*** Intensity
P32 = 10 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2715_Filter_1" Prop1 = "Trend" Prop2 =
SubsetType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2 #0=rand, 1=near, 2=r
END

```

**Figura G.5** Verificando que el *Object* de la macro coincide con el nombre del *Fracture Sets* de FracMan.

10. En archivo .fmf de la macro se debe corroborar que *MinValue* (de *OrientationDistribution*) corresponde al valor de *rmin* truncado con el que se desea trabajar. En el caso de no ser así, reemplazarlo por el valor deseado siguiendo el procedimiento del punto 9.

```

*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 0.25 [m]
Parameter "Deviation" = 0.25 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
IN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName" #Optional name for gene

```

**Figura G.6** Proceso de verificación de que el *MinValue* de la macro coincide con el valor del radio mínimo truncado utilizado.

11. El valor de P32 es arbitrario (elegido y ajustado por el usuario). Si se desea cambiar, es necesario abrir el archivo .fmf que se guarda como un texto y puede ser abierto por el Bloc de notas. Luego, ir a 'Edición' - 'Reemplazar' y escribir el dato a cambiar en 'buscar', EJ:'P32 = 2 [1/m]' y en 'Reemplazar por' el valor que se desea, EJ:'P32 = 2.8 [1/m]'. Luego, presionar 'reemplazar todo' y guardar los cambios.

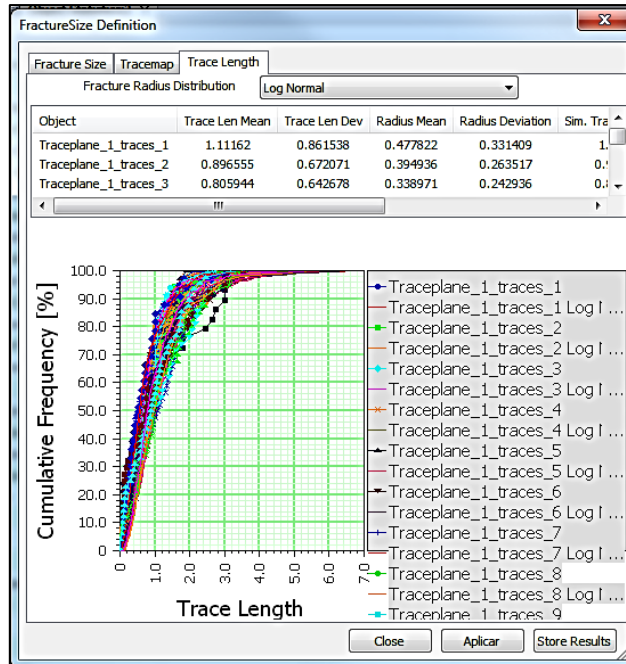
```

END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 8
Object = "2715_Filter_1" Prop
SubDistType = "FISHER"
MultiRoot = 1

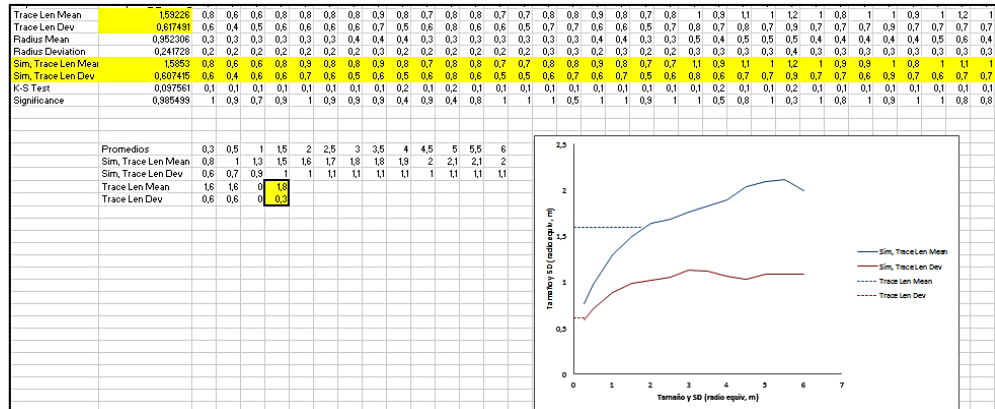
```

**Figura G.7** Verificando que el valor de intensidad de fracturamiento es el correcto.

12. Abrir el archivo Fracman (.frd) en cuestión. Correr la macro "macro\_dfns\_estimacion\_tamaño\_p32\_macro\_completa". Esta macro realiza 20 iteraciones por cada cálculo de tamaño de distribución lognormal: (0.25,0.25), (0.5,0.5), (1.0,1.0), (1.5,1.5), (2.0,2.0), (2.5,2.5), (3.0,3.0), (3.5,3.5), (4.0,4.0), (4.5,4.5), (5.0,5.0), (5.5,5.5), (6.0,6.0). Un total de 260 iteraciones para un valor único de P32 con orientaciones simuladas mediante *bootstrapping*.
13. Luego de iterar Fracman generará una vista de los resultados. Ir a la barra de herramientas de Fracman y proseguir de la siguiente manera:
  - i. 'Data Analysis' - 'Size' - 'Trace Length Fracture Size'
  - ii. Se abrirá la ventana 'FractureSize Definition'
  - iii. Dejar las pestañas 'Fracture Size' y 'Tracemap' sin cambios.
  - iv. En la pestaña 'Trace Length' asegurar que esté seleccionada la distribución de radio 'lognormal' y presionar 'Store Results'. Se generará una tabla con los resultados. Cerrar la ventana 'FractureSize Definition'.
  - v. Click derecho en la ventana recién generada, 'save as' y guardar con el nombre 'número de DTM\_p32\_ rmin\_valor de r min\_tamaño'. Ej: "2715\_P32\_2,8\_largos"
14. Luego Abrir el archivo de *Microsoft Excel* 'resultados\_DTM\_número de DTM' que tiene 3 macros cargadas en el programador del Software. Asegurarse de que esté seleccionada la celda 'A1'.
15. Ir a 'Datos' - 'Importar de Texto' y seleccionar el archivo de extensión .sts guardado con la terminación: "...\_tamaño" Luego, 'abrir' - 'Finalizar' - 'Aceptar'. (Si *Microsoft Excel* no reconoce las comas es por la configuración local).
16. Luego de importados estos datos, presionar 'Ctrl + a' para correr la macro.
17. Manualmente se debe fijar el valor en que cruzan las curvas de media y SD con las medias y SD observadas (líneas punteadas). Registrar esos datos. (La hoja debe tener el nombre "hoja1" para que el gráfico se genere correctamente).



**Figura G.8** Ajuste de la curva acumulativa de la distribución de largo de traza observada mediante una curva acumulativa de una distribución de largo de traza real.



**Figura G.9** Macro de *Microsoft Excel* ajustando los parámetros del tamaño real para una distribución lognormal a partir de los datos generados por las iteraciones de FracMan.

18. Abrir el archivo .mf "Macro\_P32\_No\_trunc". Esta macro realiza 10 iteraciones para cada medida de P32 (1, 5 y 10 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>). Un total de 30 iteraciones. Antes de correr la macro se deben reemplazar los valores 'Parameter "Mean" = x.x [m]' y 'Parameter "Deviation" = x.x [m]' por los obtenidos en el paso 17. Revisar que el valor 'MinValue = x.x [m]' sea el que corresponde. Si no es así, se debe reemplazar como se explica en el

- punto 10. Guardar los cambios. (También es necesario que el nombre del 'Fracture Sets' coincida con el object de 'SizeDistribution')
19. Ejecutar la macro "Macro\_P32\_No\_trunc". Como producto generará una tabla de datos la que se debe guardar como se explica en el punto 13e. El nombre del archivo debe ser 'número de DTM\_rmin\_valor rmin\_P32'.
  20. Volver al archivo excel e ir una nueva hoja. Seleccionar la celda 'A1'. 'Datos' - 'Importar desde Texto' - Buscar el archivo .sts generado en el punto 19.
  21. Presionar 'Ctrl + s'. Esta macro generará la correlación lineal de P32 simulados con P21 simulados. El resultado será el P32 real.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Fracture Statistics															
2	Object	8342_Filter	Se	Se	Se	Se	Se	Se	Se	S	Se	Se	Se	Se		
3	P32 (fracArea/volume)	0,43069476	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	
4	Intersection Count	41	10	8	3	3	2	7	11	9	10	12	22	53	42	
5	Trace Length Mean [m]	1,5922617	1,2	1,8	1,9	1,1	2	1,1	1,2	1,7	1,3	1,5	1,4	1,3	1,4	1
6	Trace Length Min	0,009600433	0,3	0,5	1,1	0,1	1,8	0,1	0,1	0,5	0,4	0,3	0	0	0	0
7	Trace Length Max	2,5390674	2,8	3,2	3,1	2,7	2,3	2,5	3	3	2,2	3,1	3,1	3,1	3,3	
8	Trace Length StdDev	0,61749071	0,8	1	1,1	1,4	0,3	0,9	1	0,8	0,6	0,9	0,8	1	1	
9	Intensity (P21) [m/m <sup>2</sup> ]	7,2782671	1,3	1,6	0,6	0,4	0,5	0,8	1,5	1,7	1,4	2	3,5	7,6	6,3	2
10																
11																
12																
13		promedios						m	1,1							
14		P32	1	5	10			c	0							
15		P21	1,2	5,2	11											
16		P21 obs	7,3										P32	6,9		
17																

**Figura G.10** Macro de *Microsoft Excel* ajustando los parámetros de intensidad de fracturamiento a partir de una correlación lineal. El resultado es el  $P_{32}(m^2/m^3)$  real.

22. Abrir el archivo .fmf 'Macro\_chequear\_resultados\_1'. Esta macro generará iteraciones con los datos obtenidos de tamaño y P32 real.
23. Reemplazar los valores 'P32 = x.x [1/m]' por el obtenido en el punto 21. Los valores 'Parameter "Mean" = x.x [m]' y 'Parameter "Deviation" = x.x [m]' deben ser reemplazados por los obtenidos del paso 17. Verificar que el 'MinValue = x.x [m]' corresponde al tamaño de corte mínimo con el que estamos trabajando y que el 'Fracture Sets' coincida.
24. Abrir nuevamente el archi .frd y ejecutar la macro 'Macro\_chequear\_resultados\_1'. Está iterará 40 veces y generará una tabla con los resultados.
25. Guardar lo resultados generados con el nombre 'número DTM\_rmin\_valor de rmin\_resultados'. Ej: '2715\_rmin\_0,5\_result'.
26. En una nueva hoja de excel, abrir el archivo generado en el punto 25 y presionar 'Ctrl + d' Esta macro promediará los parámetros y los comparará con los observados generando cálculos del error en la simulación.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Fracture Statistics														
2	Object	2715_Filter_1_Filter_1	Si	SetD	Si	Si	SetD	Si	Si	Si	S	Si	Si	Si	
3	P32 (fracArea/volume)	0,32154807	3,4	3,3992	3,4	3,4	3,4198	3,4	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
4	Intersection Count	23	25	28	23	22	27	24	17	25	25	23	25	27	
5	Trace Length Mean [n]	1,7920778	1,7	1,4723	1,7	1,6	1,8697	1,8	1,6	1,9	1,6	1,5	1,7	1,8	
6	Trace Length StdDev	1,0443903	1,2	0,9699	1,4	1,3	1,1158	1,3	1	1,3	1	1,5	1	1,3	
7	Intensity (P21) [m/m <sup>2</sup> ]	4,6114135	4,7	4,6123	4,4	3,9	5,6478	4,9	3,1	5,2	4,6	3,9	4,7	5,5	
8															
9															
10		Prom. Simulaciones		Result. Obs.			Error experimental relativo								
11	Intersection Count	24,6		23,0			6,7 %								
12	Trace Length Mean [n]	1,7		1,8			-6,0 %								
13	Trace Length StdDev	1,1		1,0			8,9 %								
14	Intensity (P21) [m/m <sup>2</sup> ]	4,6		4,6			0,2 %								

**Figura G.11** Macro de *Microsoft Excel* calculado el error entre valores observado-simulado.

27. Guardar todos los cambios. El análisis ha terminado.

Los pasos anteriores corresponden al análisis completo en Fracman para generar la mejor simulación del arreglo estructural de un mapeo determinado.

En el caso de la extrapolación de parámetros de tamaño e intensidad para conseguir un DFN para tamaños no observados, se debe hacer el mismo procedimiento para distintos tamaños mínimos (al menos 3), esto con el fin de establecer la correlación lineal explicada en el capítulo 4 de este estudio. Luego, con los parámetros extrapolados a un tamaño de corte deseado se debe proceder desde el paso 22 en adelante para obtener los resultados.

## **ANEXO H: Macroinstrucciones aplicadas en la metodología.**

Cada una de las etapas presentadas en esta metodología incluye una gran cantidad de cálculos y procesos computacionales. Luego, fue necesario automatizar muchos procesos a partir del uso de Macroinstrucciones de FracMan y *Microsoft Excel* construidas por el autor de este trabajo.

Una Macroinstrucción es una serie de instrucciones que se almacenan para que se puedan ejecutar de manera secuencial mediante una sola llamada u orden de ejecución, con el fin de automatizar procesos.



Las macroinstrucciones para *Microsoft Excel* están basadas en un lenguaje de programación orientado a aplicaciones conocido como *Visual Basic* (VBA o *Visual Basic for Applications*), el cual ha sido desarrollado para *Microsoft. Visual Basic* para aplicaciones es una combinación de un entorno de programación integrado denominado *Editor de Visual Basic* y del lenguaje de programación *Visual Basic*, permitiendo diseñar y desarrollar con facilidad programas en *Visual Basic*. El término “para aplicaciones” hace referencia al hecho de que el lenguaje de programación y las herramientas de desarrollo están integrados con las aplicaciones del *Microsoft Office* (en este caso, *Microsoft Excel*), de forma que se puedan desarrollar nuevas funcionalidades y soluciones a medida, con el uso de estas aplicaciones (tomado del apunte *Introducción al Visual Basic*, 2014). En este trabajo, se utilizaron estas macroinstrucciones para trabajar los resultados de las simulaciones llevadas a cabo por FracMan. Crear un macro se puede hacer grabando una secuencia de operaciones con una aplicación del Programador de *Microsoft Excel* que posee para estos fines. Otra manera es utilizar la interfaz del programador para escribir el código de *Visual Basic* directamente. En este estudio se utilizó una combinación de ambos métodos para escribir códigos que sirvieran para automatizar variadas tareas

Las macroinstrucciones para FracMan están basadas en un lenguaje desarrollado para el *software* que guarda similitudes con lenguajes de programación tradicionales. Estas macroinstrucciones permiten generar las iteraciones de DFN con los parámetros escogidos por el usuario, como también desplegar la información para su visualización, logrando automatizar una gran cantidad de cálculos y tareas. Para crear las macros de FracMan se siguió un procedimiento similar al anterior, en el cual se grabaron algunas acciones del *software* en archivos *.fmf* para luego construir los ciclos necesarios para automatizar las etapas a partir de ellos. A continuación se muestran las 12 macros que se utilizan para realizar los análisis.

### **1. Macro para importar archivos de texto**

Esta macro de *Microsoft Excel* permite importar archivos de texto (*.txt*) que contienen la información de las estructuras de los DTM mapeados en el marco de este estudio. Cada archivo es importado en una hoja distinta del mismo libro de *Microsoft Excel* y se le asigna el nombre del archivo. Otro uso es para importar los archivos de extensión *.sts* generados por FracMan al visualizar las iteraciones.

```

Sub abrir_txt()
On Error Resume Next
milibro = ActiveWorkbook.Name
Set navegador =
CreateObject("shell.application")
carpeta =
navegador.browseforfolder(0,
"SELECCIONA CARPETA", 0,
"c:\").items.Item.Path

```

```

ChDir carpeta & "\
archi = Dir("*.txt")
' especifica la extensión del archivo
(.txt o .sts)
Do While archi <> ""
Workbooks.OpenText archi,
origin:=xlWindows, startrow:=1,
DataType:=xlDelimited
otro = ActiveWorkbook.Name

```

```

ActiveSheet.Copy
before:=Workbooks(milibro).Sheets
(1)
Workbooks(otro).Close False
archi = Dir()
Loop
End Sub

```

## 1. Macro generadora de columna 'count'

Esta macro de *Microsoft Excel* genera una columna que asigna el valor 1 a la estructura de radio mayor mapeada y asigna valores de forma creciente a los siguientes radios menores. Su utilidad se debe a la construcción de gráficos de curvas acumulativas inversas.

```

Sub Macro1()
'Acceso directo: CTRL+W
Range("A2:J2").Select
With Selection.Interior
.Pattern = xlSolid
.PatternColorIndex = xlAutomatic
.Color = 65535
.TintAndShade = 0
.PatternTintAndShade = 0
End With
Range("G6").Select
ActiveWorkbook.Worksheets("hoja
1").AutoFilter.Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("hoja
1").AutoFilter.Sort.SortFields.Add
Key:= _Range("F1"),
SortOn:=xlSortOnValues,

```

```

Order:=xlDescending, DataOption:=
_xlSortNormal
With
ActiveWorkbook.Worksheets("hoja
1").AutoFilter.Sort
.Header = xlYes
.MatchCase = False
.Orientation = xlTopToBottom
.SortMethod = xlPinYin
.Apply
End With
Range("K2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
Range("K3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "2"
Range("K2:K3").Select

```

```

Selection.AutoFill
Destination:=Range("K2:K552")
'genera los valores entre 1 y 551
Range("K2:K552").Select
Range("L2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-
1]/551"
'Normaliza la columna generada con
el número total de datos para
generar un columna de valores
entre 0 y 1
Range("L2").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("L2:L552")
Range("L2:L552").Select
End Sub

```

## 2. Macro ordenar tabla

Esta macro de *Microsoft Excel* ordena la información de los mapeos de DTM, borra la información innecesaria de la planilla, ordena de mayor a menor diámetro las estructuras (filtro), agrega la columna de radios y la de lados de la estructuras.

```

Sub ordenar_tabla()
' Acceso directo: CTRL+q
Columns("A:A").Select
Selection.TextToColumns
Destination:=Range("A1"),
DataType:=xlFixedWidth, _

```

```

FieldInfo:=Array(Array(0, 1),
Array(15, 1), Array(60, 1), Array(75,
1), Array(95, 1), _
Array(108, 1), Array(125, 1),
Array(139, 1), Array(155, 1),
Array(167, 1)), _

```

```

DecimalSeparator=".",
ThousandsSeparator=","
TrailingMinusNumbers:= _
True
Columns("A:A").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Range("I1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 ="radius"

```

```

Range("J1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "sides"
Range("A1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "x"
Range("B1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "y"
Range("C1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "z"
Range("D1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "dip"
Range("E1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1
="direction"
Range("I2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-
3]/2"
Range("I2").Select

```

```

Selection.AutoFill
Destination:=Range("I2:I41")
Range("I2:I41").Select
Range("J2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "64"
Range("J2").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("J2:J41")
Range("J2:J41").Select
Rows("1:1").Select
Selection.AutoFilter
ActiveWorkbook.Worksheets("8462
_40est").AutoFilter.Sort.SortFields.C
lear
ActiveWorkbook.Worksheets("8462
_40est").AutoFilter.Sort.SortFields.A
dd Key:= _

```

```

Range("I1"),
SortOn:=xlSortOnValues,
Order:=xlDescending, DataOption:=
_
xlSortNormal
With
ActiveWorkbook.Worksheets("8462
_40est").AutoFilter.Sort
.Header = xlYes
.MatchCase = False
.Orientation = xlTopToBottom
.SortMethod = xlPinYin
.Apply
End With
Range("I2").Select
End Sub

```

### 3. Macro datos de P21.2

Esta macro de FracMan simplifica los mapas de trazas un determinado número de veces con el criterio de ir eliminando las trazas de estructuras de menores. El límite del largo de traza mínimo aumenta en 0,1 m en cada iteración.

```

BEGIN DefineSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_1"
ObjectName = "Traceplane_1"
'nombre del archivo de estructuras
FractureSet = "2814frac"
ComputeTraces = 1
ExportTracemap = 0
TracemapPath = ""
ComputeFracs = 0
ComputeConnected = 0
ComputeStats = 0

```

```

END
BEGIN RunSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_1"
#NewObjectName =
"NewObjectName" #optional
specify new object name
END
'ciclo de simplificación del mapa de
trazas:
BEGIN_LOOP(0.1,5,0.1)
BEGIN DefineFilter

```

```

Name = "Filter"
ElementType = "Lines"
FilterType = "Tracemaps"
Property Name = "Trace_Length"
MinValue = "%f" Bool = "AND"
Object = "Traceplane_1_traces_1"
END
BEGIN CreateTracemapSubset
Filter = "Filter"
END
END_LOOP

```

### 4. Macro datos de P21

Esta macro de *Microsoft Excel* busca los valores de P21 calculados en Fracman en las hojas del libro que contienen los resultados para cada mapeo de P21. Copia la fila de valores de P21 y los pega en la 'Resultados\_P21'. Además copia y pega las filas de largo de traza mínimo y del número de trazas contenidas en un plano.

```

Sub copiar_filas_P21()
Dim num_hojas As Integer
Dim i As Integer
Dim a As String
Dim j As Integer

```

```

'i es la variable que recorre las hojas
'a es la variable string para guardar
el nombre de la hoja
num_hojas =
ActiveWorkbook.Worksheets.Count

```

```

'contador_hojas es igual al número
de hojas del libro'j es el número de
la fila para poner el nombre del
dato y recorrer las tablas
j = 1

```

```

For i = 1 To num_hojas ' un salto de
dos en dos para recorrer solo los
"n_trazas"
'j es el número de la fila para poner
el nombre del dato y recorrer las
tablas
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("3:3").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os_P21").Cells(j + 1, 1)

```

```

ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("7:7").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os_P21").Cells(j + 2, 1)
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("17:17").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os_P21").Cells(j + 3, 1)

```

```

a
=ActiveWorkbook.Worksheets(i)Na
me
Worksheets("Resultados_P21").Activae
ActiveSheet.Cells(j, 1).Select
ActiveCell.Value = a
j = j + 4
Next i
End S

```

## 5. Macro datos de P21.2

Esta macro de *Microsoft Excel* busca los resultados de las propiedades que son medibles en el plano, calculados en Fracman y contenidos en las hojas del libro para cada mapeo de DTM. Copia las filas de valores de P21, número de trazas contenidas en un plano, media del largo de traza, largo de traza mínimo, desviación estándar de largo de traza, área de mapeo. Estos resultados son desplegados en la hoja 'Resultados'.

```

Sub copiar_filas()
Dim num_hojas As Integer
Dim i As Integer
Dim a As String
Dim j As Integer
'i es la variable que recorre las hojas
'a es la variable string para guardar
el nombre de la hoja
num_hojas =
ActiveWorkbook.Worksheets.Count
'contador_hojas es igual al número
de hojas del libro
'j es el número de la fila para poner
el nombre del dato y recorrer las
tablas
j = 1For i = 1 To num_hojas ' un
salto de dos en dos para recorrer
solo los "n_trazas"'j es el número de
la fila para poner el nombre del
dato y recorrer las tablas

```

```

ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("2:2").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os").Cells(j + 1, 1)
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("3:3").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os").Cells(j + 2, 1)
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("6:6").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os").Cells(j + 3, 1)
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("7:7").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os").Cells(j + 4, 1)
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("9:9").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad

```

```

os").Cells(j + 5, 1)
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Ran
ge("15:15").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os").Cells(j + 6, 1)
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Rag
e("17:17").Copy
Destination:=Worksheets("Resultad
os").Cells(j + 7, 1)
a =
ActiveWorkbook.Worksheets(i).Na
me
Worksheets("Resultados").Activate
ActiveSheet.Cells(j, 1).Select
ActiveCell.Value = a
j = j + 9
Next i
End Sub

```

## 6. Macro ajuste Tamaño real

Esta macro de FracMan corresponde a la etapa medular del estudio ya que genera las iteraciones necesarias para resolver el ajuste del tamaño real a partir de la información de trazas, mediante la técnica del "muestreo simulado". Genera 13 ciclos de 20 iteraciones para parámetros de tamaño entre 0,25 y 6 metros (media de radio y desviación estándar de radios

iguales), con parámetros de intensidad de fracturamiento  $P32 = 5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y simulación de orientación usando *bootstrapping*. Un total de 260 iteraciones de DFN que luego son intersectadas con el plano de mapeo y generando 261 mapas de trazas (260 DFN + mapeo).

```

BEGIN SetSeed
Seed = 1449062259
END
BEGIN SetTransStor
UseTransStor = 1
END
'ciclo para media de tamaño 0,25 m
y desviación estándar 0,25 m
BEGIN_LOOP(1,20,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 0.25 [m]
Parameter "Deviation" = 0.25 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 0, 5 m
y desviación estándar 0,5 m
BEGIN_LOOP(21,40,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 0.5 [m]
Parameter "Deviation" = 0.5 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"

```

```

#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 1 m y
desviación estándar 1 m
BEGIN_LOOP(41,60,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1

```

```

Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 1 [m]
Parameter "Deviation" = 1 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 1,5 m y
desviación estándar 1,5 m
BEGIN_LOOP(61,80,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1

```

```

Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 1.5 [m]
Parameter "Deviation" = 1.5 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 2 m y
desviación estándar 2 m
BEGIN_LOOP(81,100,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties

```

```

Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 2 [m]
Parameter "Deviation" = 2 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"

```

```

#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 2,5 m y
desviación estándar 2,5 m
BEGIN_LOOP(101,120,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1

```

```

Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 2.5 [m]
Parameter "Deviation" = 2.5 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 3 m y
desviación estándar 3 m
BEGIN_LOOP(121,140,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"

```



```

Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 3 [m]
Parameter "Deviation" = 3 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 3,5 m y
desviación estándar 3,5 m
BEGIN_LOOP(141,160,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties

```

```

Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m²/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m²/s]
MinValue = 0 [m²/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 3.5 [m]
Parameter "Deviation" = 3.5 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"

```

```

#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 4 m y
desviación estándar 4 m
BEGIN_LOOP(161,180,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m²/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m²/s]
MinValue = 0 [m²/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1

```



```

Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 4 [m]
Parameter "Deviation" = 4 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 4,5 m y
desviación estándar 4,5 m
BEGIN_LOOP(181,200,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"

```

```

Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 4.5 [m]
Parameter "Deviation" = 4.5 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 5 m y
desviación estándar 5 m
BEGIN_LOOP(201,220,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties

```

```

Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 5 [m]
Parameter "Deviation" = 5 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"

```

```

#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 5,5 m y
desviación estándar 5,5 m
BEGIN_LOOP(221,240,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1

```

```

Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 5.5 [m]
Parameter "Deviation" = 5.5 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'ciclo para media de tamaño 6 m y
desviación estándar 6 m
BEGIN_LOOP(241,260,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1

```

```

Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 6 [m]
Parameter "Deviation" = 6 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'intersectar estructuras del mapeo
con el plano
BEGIN DefineSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_0"
ObjectName = "Traceplane_1"
'Nombre del archivo de estructuras
FractureSet = "2814frac_Filter_1"
ComputeTraces = 1
ExportTracemap = 0
TracemapPath = ""
ComputeFracs = 0

```

```

ComputeConnected = 0
ComputeStats = 0
END
BEGIN RunSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_0"
#NewObjectName =
"NewObjectName" #optional
specify new object name
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "Traceplane_1_traces_1"
END
'ciclo para intersectar las 260
iteraciones de DFN con el plano
BEGIN_LOOP(1,260,1)
BEGIN DefineSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_%d"
"
ObjectName = "Traceplane_1"
FractureSet = "SetDefinition_%d"
ComputeTraces = 1
ExportTracemap = 0

TracemapPath = ""
ComputeFracs = 0
ComputeConnected = 0
ComputeStats = 0
END
BEGIN RunSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_%d"
"
#NewObjectName =
"NewObjectName" #optional
specify new object name
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "Traceplane_1_traces_%d"
END
END_LOOP
' seleccionando 261 mapas de
trazas, 260 DFN y estructuras
mapeadas
BEGIN SelectObject
Action = 1 #1=replace, 2=add,
3=rem, 4=toggle
Object = "2814frac_Filter_1"

BEGIN_LOOP(1,260,1)
Object = "SetDefinition_1"
END_LOOP
Object = "Traceplane_1_traces_1"
BEGIN_LOOP(2,261,1)
Object = "Traceplane_1_traces_2"
END_LOOP
BEGIN ObjectStats
'Visualizando la estadística de los
resultados de 261 mapas de trazas,
260 DFN y estructuras mapeadas en
una tabla ordenada
Object = "2814frac_Filter_1"
BEGIN_LOOP(1,260,1)
Object = "SetDefinition_1"
END_LOOP
Object = "Traceplane_1_traces_1"
BEGIN_LOOP(2,261,1)
Object = "Traceplane_1_traces_2"
END_LOOP
View = 1
#Path = "outputFile.sts"
END

```

## 7. Macro ajuste Intensidad de fracturamiento

Esta macro de FracMan genera las iteraciones necesarias para resolver el ajuste del de la intensidad de fracturamiento, aprovechando la correlación lineal entre P21 y P32. Produce 3 ciclos de 10 iteraciones para valores del parámetro de P32 = 1, 5, 10 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, con parámetros de tamaño ajustados por la aplicación del “muestreo simulado” y simulación de orientaciones usando *bootstrapping*. Un total de 30 iteraciones de DFN que luego son intersectadas con el plano de mapeo y generando 31 mapas de trazas (31 DFN + mapeo).

```

BEGIN SetSeed
Seed = 1448885692
END
BEGIN SetTransStor
UseTransStor = 1
END
'Ciclos de iteraciones para
P32 = 1 m2/m3
BEGIN_LOOP(1,10,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1

UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"

Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 1 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1

```

```

BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 1.7 [m]
Parameter "Deviation" = 0.9 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'Ciclos de iteraciones para
P32 = 5 m2/m3
BEGIN_LOOP(11,20,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution

```

```

ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
*** Intensity
P32 = 5 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 1.7 [m]
Parameter "Deviation" = 0.9 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'Ciclos de iteraciones para
P32 = 10 m2/m3

```

```

BEGIN_LOOP(21,30,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m2/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m2/s]
MinValue = 0 [m2/s]
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
*** Intensity
P32 = 10 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 1.7 [m]
Parameter "Deviation" = 0.9 [m]

```

```

MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'interseccion estructuras del mapeo
con el plano
BEGIN DefineSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_0"
ObjectName = "Traceplane_1"
FractureSet = "2814frac_Filter_1"
ComputeTraces = 1
ExportTracemap = 0
TracemapPath = ""
ComputeFracs = 0
ComputeConnected = 0
ComputeStats = 0
END
BEGIN RunSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_0"
#NewObjectName =
"NewObjectName" #optional
specify new object name
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "Traceplane_1_traces_%d"
END
END_LOOP
'seleccionando 31 mapas de trazas,
30 DFN y estructuras mapeadas
BEGIN SelectObject
Action = 1 #1=replace, 2=add,
3=rem, 4=toggle
Object = "2814frac_Filter_1"
BEGIN_LOOP(1,30,1)
Object = "SetDefinition_1"
END_LOOP
Object = "Traceplane_1_traces_1"
BEGIN_LOOP(2,31,1)
Object = "Traceplane_1_traces_2"
END_LOOP
END
'Visualizando la estadística de los
resultados de 31 mapas de trazas,
30 DFN y estructuras mapeadas en
una tabla ordenada
BEGIN ObjectStats
Object = "2814frac_Filter_1"
BEGIN_LOOP(1,30,1)
Object = "SetDefinition_1"
END_LOOP
Object = "Traceplane_1_traces_1"
BEGIN_LOOP(2,31,1)
Object = "Traceplane_1_traces_2"
END_LOOP
View = 1
#Path = "outputFile.sts"
END

```

## 8. Macro de Evaluación de resultados

Esta macro de FracMan genera 40 iteraciones con los parámetros de P32 y tamaño reales. Luego, mediante las propiedades que son medibles en el plano se procede a comparar con los datos observados, mediante el cálculo del error porcentual. Las propiedades que se miden son: P21, media de largo de traza, desviación de largo de traza y N° de trazas contenidas en un plano.

```

'Ciclos de 40 iteraciones para
parámetros de tamaño e intensidad
ajustados
BEGIN_LOOP(1,40,1)
BEGIN DefineFractureSetDefinition
DefinitionName = "SetDefinition"
FractureModel = "REGION"
RegionName = "RegionBox_1"
ClipToRegion = 1
UseSurfacePoints = 0 #0=centers,
1=surfacePts, 2=cellcenter (geocell
only)
BEGIN Properties
Name = "Aperture"
BEGIN Distribution
ValueType "Aperture" Units "m"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.001 [m]
MinValue = 0 [m]
END
Name = "Transmissivity"
BEGIN Distribution
ValueType "Transmissivity" Units
"m²/s"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 1e-005 [m²/s]
MinValue = 0 [m²/s]

```

```

END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 3.3 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 1.7 [m]
Parameter "Deviation" = 0.9 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
Name = "Storativity"
BEGIN Distribution
ValueType "Storativity" Units "-"
Type = "CONSTANT"
Parameter "Value" = 0.0001 [-]
MinValue = 0 [-]
END
END
*** Intensity
P32 = 3.3 [1/m]
AdjustedByTruncation = 1
*** Orientation
UsePole = 1
BEGIN OrientationDistribution
Type = "BOOTSTRAP"
Parameter "Mean Trend" = 85
Parameter "Mean Plunge" = 15
Parameter "Concentration" = 80
Object = "2814frac_Filter_1" Prop1
= "Trend" Prop2 = "Plunge" Weight
= ""
SubDistType = "FISHER"
MultiBoot = 1
Radius = -1
SpatialBootstrapMode = 2
#0=rand, 1=near, 2=radius,
3=invdist, 4=invdistsq
END
*** Size
BEGIN SizeDistribution
ValueType "Length" Units "m"
Type = "LOGNORMAL"
Parameter "Mean" = 1.7 [m]
Parameter "Deviation" = 0.9 [m]
MinValue = 0.5 [m]
END
*** Shape
NumSides = 64
Termination = 0
END
BEGIN GenerateFractureSet
DefinitionName = "SetDefinition"
#FractureSetName = "SetName"
#Optional name for generated set -
(replaces existing objects!)
END
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "SetDefinition_%d"
END
END_LOOP
'interceptar estructuras del mapeo
con el plano
BEGIN DefineSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_0"
ObjectName = "Traceplane_1"
FractureSet = "2814frac_Filter_1"
ComputeTraces = 1
ExportTracemap = 0
TracemapPath = ""
ComputeFrac = 0
ComputeConnected = 0
ComputeStats = 0
END
BEGIN RunSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_0"
#NewObjectName =
"NewObjectName" #optional
specify new object name
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "Traceplane_1_traces_1"
END
'ciclo para intersectar las 40
iteraciones de DFN con el plano
BEGIN_LOOP(1,40,1)
BEGIN DefineSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_%d"
"
ObjectName = "Traceplane_1"
FractureSet = "SetDefinition_%d"
ComputeTraces = 1
ExportTracemap = 0
TracemapPath = ""
ComputeFrac = 0
ComputeConnected = 0
ComputeStats = 0
END
END
END
BEGIN RunSurfaceIntersect
DefName =
"Surface_Fracture_Intersection_%d"
"
#NewObjectName =
"NewObjectName" #optional
specify new object name
END
BEGIN SetObjectOption
Visible = 0
Object = "Traceplane_1_traces_%d"
END
END_LOOP
BEGIN SelectObject
'seleccionando 41 mapas de trazas,
30 DFN y estructuras mapeadas
Action = 1 #1=replace, 2=add,
3=rem, 4=toggle
Object = "2814frac_Filter_1"
BEGIN_LOOP(1,40,1)
Object = "SetDefinition_1"
END_LOOP
Object = "Traceplane_1_traces_1"
BEGIN_LOOP(2,41,1)
Object = "Traceplane_1_traces_2"
END_LOOP
END
'Visualizando la estadística de los
resultados de 41 mapas de trazas,
40 DFN y estructuras mapeadas en
una tabla ordenada
BEGIN ObjectStats
Object = "2814frac_Filter_1"
BEGIN_LOOP(1,40,1)
Object = "SetDefinition_1"
END_LOOP
Object = "Traceplane_1_traces_1"
BEGIN_LOOP(2,41,1)
Object = "Traceplane_1_traces_2"
END_LOOP
View = 1
#Path = "outputFile.sts"
END

```

## 9. Macro de cálculo del tamaño real

Esta macro de *Microsoft Excel* lleva a cabo los cálculos para establecer el valor de la media de radio real y la desviación estándar del radio. Promedia los resultados de media de largo de traza y desviación estándar simulados de 260 iteraciones (20 por cada valor de tamaño escogido). Luego, genera un gráfico de Media de tamaño (radio equivalente) simulado versus Media de largo de traza simuladas (idem para la desviación estándar). Por último, grafica los



valores observados de media de largo de traza y desviación estándar de largo de traza utilizados para hacer los ajustes de los parámetros reales.

```

Sub Macro_tamaño()
' Acceso directo: CTRL+a
' Eliminando la información
innecesaria, ajustando la
visualización y el tamaño de
fuente.
ActiveWindow.Zoom = 60
Cells.Select
Selection.ColumnWidth = 5
Columns("A:A").Select
Selection.ColumnWidth = 16.14
Selection.ColumnWidth = 20
Columns("B:B").ColumnWidth =
15.71
Columns("B:B").ColumnWidth =
21.14
Rows("6:6").Select
With Selection.Interior
    .Pattern = xlSolid
    .PatternColorIndex =
xlAutomatic
    .Color = 65535
    .TintAndShade = 0
    .PatternTintAndShade = 0
End With
Rows("7:7").Select
With Selection.Interior
    .Pattern = xlSolid
    .PatternColorIndex =
xlAutomatic
    .Color = 65535
    .TintAndShade = 0
    .PatternTintAndShade = 0
End With
Range("B2").Select
With Selection.Interior
    .Pattern = xlSolid
    .PatternColorIndex =
xlAutomatic
    .Color = 65535
    .TintAndShade = 0
    .PatternTintAndShade = 0
End With
Range("B3").Select
With Selection.Interior
    .Pattern = xlSolid
    .PatternColorIndex =
xlAutomatic
    .Color = 65535
    .TintAndShade = 0
    .PatternTintAndShade = 0
End With
Range("B13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
Range("D13:E13").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("D13:O13"),
Type:=xlFillDefault
Range("D13:O13").Select
Range("C14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=SUM(R[-8]C:R[-
8]C[19])/COUNT(R[-8]C:R[-8]C[19])"
Range("C14").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("C14:O14"),
Type:=xlFillDefault
Range("C14:O14").Select
Range("D14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[19]:R[-
8]C[38])/COUNT(R[-8]C[19]:R[-
8]C[38])"
Range("E14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=SUM(R[-8]C[38]:R[-
8]C[57])/COUNT(R[-8]C:R[-8]C[19])"
Range("E14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[38]:R[-
8]C[57])/COUNT(R[-8]C[38]:R[-
8]C[57])"
Range("F14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=SUM(R[-8]C[57]:R[-
8]C[76])/COUNT(R[-8]C:R[-8]C[19])"
Range("BH46").Select
Range("F14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[57]:R[-
8]C[76])/COUNT(R[-8]C[57]:R[-
8]C[76])"
Range("G14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[76]:R[-
8]C[95])/COUNT(R[-8]C[76]:R[-
8]C[95])"
Range("H14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[95]:R[-
8]C[114])/COUNT(R[-8]C[95]:R[-
8]C[114])"
Range("I14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[114]:R[-
8]C[133])/COUNT(R[-8]C[114]:R[-
8]C[133])"
Range("J14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[133]:R[-
8]C[152])/COUNT(R[-8]C[133]:R[-
8]C[152])"
Range("K14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[152]:R[-
8]C[171])/COUNT(R[-8]C[152]:R[-
8]C[171])"
Range("L14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[171]:R[-
8]C[190])/COUNT(R[-8]C[171]:R[-
8]C[190])"
Range("M14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[190]:R[-
8]C[209])/COUNT(R[-8]C[190]:R[-
8]C[209])"
Range("N14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[209]:R[-
8]C[228])/COUNT(R[-8]C[209]:R[-
8]C[228])"
Range("O14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[228]:R[-
8]C[247])/COUNT(R[-8]C[228]:R[-
8]C[247])"
Range("P14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[247]:R[-
8]C[266])/COUNT(R[-8]C[247]:R[-
8]C[266])"
Range("Q14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[266]:R[-
8]C[285])/COUNT(R[-8]C[266]:R[-
8]C[285])"
Range("R14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[285]:R[-
8]C[304])/COUNT(R[-8]C[285]:R[-
8]C[304])"
Range("S14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[304]:R[-
8]C[323])/COUNT(R[-8]C[304]:R[-
8]C[323])"
Range("T14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[323]:R[-
8]C[342])/COUNT(R[-8]C[323]:R[-
8]C[342])"
Range("U14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[342]:R[-
8]C[361])/COUNT(R[-8]C[342]:R[-
8]C[361])"
Range("V14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[361]:R[-
8]C[380])/COUNT(R[-8]C[361]:R[-
8]C[380])"
Range("W14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[380]:R[-
8]C[399])/COUNT(R[-8]C[380]:R[-
8]C[399])"
Range("X14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[399]:R[-
8]C[418])/COUNT(R[-8]C[399]:R[-
8]C[418])"
Range("Y14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[418]:R[-
8]C[437])/COUNT(R[-8]C[418]:R[-
8]C[437])"
Range("Z14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[437]:R[-
8]C[456])/COUNT(R[-8]C[437]:R[-
8]C[456])"
Range("AA14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[456]:R[-
8]C[475])/COUNT(R[-8]C[456]:R[-
8]C[475])"
Range("AB14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[475]:R[-
8]C[494])/COUNT(R[-8]C[475]:R[-
8]C[494])"
Range("AC14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[494]:R[-
8]C[513])/COUNT(R[-8]C[494]:R[-
8]C[513])"
Range("AD14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[513]:R[-
8]C[532])/COUNT(R[-8]C[513]:R[-
8]C[532])"
Range("AE14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[532]:R[-
8]C[551])/COUNT(R[-8]C[532]:R[-
8]C[551])"
Range("AF14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[551]:R[-
8]C[570])/COUNT(R[-8]C[551]:R[-
8]C[570])"
Range("AG14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[570]:R[-
8]C[589])/COUNT(R[-8]C[570]:R[-
8]C[589])"
Range("AH14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[589]:R[-
8]C[608])/COUNT(R[-8]C[589]:R[-
8]C[608])"
Range("AI14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[608]:R[-
8]C[627])/COUNT(R[-8]C[608]:R[-
8]C[627])"
Range("AJ14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[627]:R[-
8]C[646])/COUNT(R[-8]C[627]:R[-
8]C[646])"
Range("AK14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[646]:R[-
8]C[665])/COUNT(R[-8]C[646]:R[-
8]C[665])"
Range("AL14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[665]:R[-
8]C[684])/COUNT(R[-8]C[665]:R[-
8]C[684])"
Range("AM14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[684]:R[-
8]C[703])/COUNT(R[-8]C[684]:R[-
8]C[703])"
Range("AN14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[703]:R[-
8]C[722])/COUNT(R[-8]C[703]:R[-
8]C[722])"
Range("AO14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[722]:R[-
8]C[741])/COUNT(R[-8]C[722]:R[-
8]C[741])"
Range("AP14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=SUM(R[-8]C[741]:R[-
8]C[760])/COUNT(R[-8]C[741]:R[-
8]C[760])"
Range("AQ14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=0.5+RC[-20]"
Range("AQ14").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("AQ1:JB1"),
Type:=xlFillDefault
Range("AQ1:JB1").Select
Range("C13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0.25"
Range("D13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0.5"
Range("E13").Select

```

```

    "=SUM(R[-8]C[95]:R[-8]C[114])/COUNT(R[-8]C:R[-8]C[19])"
    Range("H14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[95]:R[-8]C[114])/COUNT(R[-8]C[95]:R[-8]C[114])"
    Range("I14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[114]:R[-8]C[133])/COUNT(R[-8]C[114]:R[-8]C[133])"
    Range("J14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[133]:R[-8]C[152])/COUNT(R[-8]C[133]:R[-8]C[152])"
    Range("K14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[152]:R[-8]C[171])/COUNT(R[-8]C[152]:R[-8]C[171])"
    Range("L14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[171]:R[-8]C[190])/COUNT(R[-8]C[171]:R[-8]C[190])"
    Range("M14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[190]:R[-8]C[209])/COUNT(R[-8]C[190]:R[-8]C[209])"
    Range("N14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[209]:R[-8]C[228])/COUNT(R[-8]C[209]:R[-8]C[228])"
    Range("O14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-8]C[228]:R[-8]C[247])/COUNT(R[-8]C[228]:R[-8]C[247])"
    Range("O15").Select
    Range("C14:O14").Select
    Selection.AutoFill
    Destination:=Range("C14:O15"),
    Type:=xlFillDefault
    Range("C14:O15").Select
    Range("B16").Select

```

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-14]C[-1]"
Range("B17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-14]C[-1]"
Range("C16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-14]C[-1]"
Range("C17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-14]C[-1]"
Range("D17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "="
Range("D17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-1]"
Range("D16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-1]"
Range("E16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Range("F16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "6"
Range("E17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Range("F17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "6"
Range("O19").Select
' Generando gráfico de media de tamaño simulado vs media de largo de traza simulada
ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select
ActiveChart.ChartType = xlXYScatter
ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = "=Hoja1!$C$13:$O$13"
ActiveChart.SeriesCollection(1).Values = "=Hoja1!$C$14:$O$14"
ActiveChart.SeriesCollection(1).Name = "=Hoja1!$B$14"
ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.SeriesCollection(2).Name = "=Hoja1!$B$15"
ActiveChart.SeriesCollection(2).XValues = "=Hoja1!$C$13:$O$13"
ActiveChart.SeriesCollection(2).Values = "=Hoja1!$C$15:$O$15"

```

```

ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.SeriesCollection(3).Name = "=Hoja1!$B$16"
ActiveChart.SeriesCollection(3).XValues = "=Hoja1!$E$16:$F$16"
ActiveChart.SeriesCollection(3).Values = "=Hoja1!$C$16:$D$16"
ActiveChart.SeriesCollection(3).Values = "=Hoja1!$C$16:$D$16"
ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.SeriesCollection(4).Name = "=Hoja1!$B$17"
ActiveChart.SeriesCollection(4).XValues = "=Hoja1!$E$17:$F$17"
ActiveChart.SeriesCollection(4).Values = "=Hoja1!$C$17:$D$17"
ActiveSheet.Shapes("1 Gráfico").IncrementLeft 33.75
ActiveSheet.Shapes("1 Gráfico").IncrementTop -67.5
ActiveSheet.Shapes("1 Gráfico").ScaleWidth 1.4548611111, msoFalse, _
msoScaleFromTopLeft
ActiveSheet.Shapes("1 Gráfico").ScaleHeight 1.5619214786, msoFalse, _
msoScaleFromTopLeft
ActiveChart.ApplyLayout (1)
ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
Selection.Delete
ActiveSheet.ChartObjects("1 Gráfico").Activate
ActiveChart.ChartTitle.Select
Selection.Delete
ActiveSheet.ChartObjects("1 Gráfico").Activate
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.ForeColor.ObjectThemeColor = msoThemeColorAccent1
.ForeColor.TintAndShade = 0
.ForeColor.Brightness = 0
End With

```



```

Selection.Format.Line.Style =
msoLineSingle
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.Weight = 1
End With
ActiveChart.SeriesCollection(2).Sele
ct
ActiveChart.SeriesCollection(1).Sele
ct
Selection.MarkerStyle = -4142
ActiveChart.SeriesCollection(2).Sele
ct
Selection.MarkerStyle = -4142
Selection.Format.Line.Style =
msoLineSingle
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.Weight = 1
End With
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.ForeColor.ObjectThemeColor =
msoThemeColorAccent2
.ForeColor.TintAndShade = 0
.ForeColor.Brightness = 0
.Transparency = 0
End With
ActiveChart.SeriesCollection(1).Sele
ct
ActiveChart.SeriesCollection(3).Sele
ct
Selection.MarkerStyle = -4142
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.DashStyle = msoLineSysDash
End With
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.Weight = 1
End With
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.ForeColor.ObjectThemeColor =
msoThemeColorAccent1
.ForeColor.TintAndShade = 0
.ForeColor.Brightness = 0
.Transparency = 0
End With
ActiveChart.SeriesCollection(4).Sele
ct
Selection.MarkerStyle = -4142
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.ForeColor.ObjectThemeColor =
msoThemeColorAccent1
.ForeColor.TintAndShade = 0
.ForeColor.Brightness = 0
.Transparency = 0
End With
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.ForeColor.ObjectThemeColor =
msoThemeColorAccent2
.ForeColor.TintAndShade = 0
.ForeColor.Brightness = 0
.Transparency = 0
End With
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.Weight = 1
End With
ActiveChart.Axes(xlValue).AxisTitl
e.Select
ActiveChart.Axes(xlValue,
xlPrimary).AxisTitle.Text = _
"Media de Tamaño y SD
simuladas (m)"
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters.Text = _
"Media de largo de traza y SD
simuladas (m)"
With
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters(1,
42).ParagraphFormat
.TextDirection =
msoTextDirectionLeftToRight
.Alignment = msoAlignCenter
End With
With
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters(1, 5).Font
.BaselineOffset = 0
.Bold = msoTrue
.NameComplexScript = "+mn-
cs"
.NameFarEast = "+mn-ea"
.Fill.Visible = msoTrue
.Fill.ForeColor.RGB = RGB(0, 0,
0)
.Fill.Transparency = 0
.Fill.Solid
.Size = 10
.Italic = msoFalse
.Kerning = 12
.Name = "+mn-It"
.UnderlineStyle =
msoNoUnderline
.Strike = msoNoStrike
End With
With
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters(6, 37).Font
.BaselineOffset = 0
.Bold = msoTrue
.NameComplexScript = "+mn-
cs"
.NameFarEast = "+mn-ea"
.Fill.Visible = msoTrue
.Fill.ForeColor.RGB = RGB(0, 0,
0)
.Fill.Transparency = 0
.Fill.Solid
.Size = 10
.Italic = msoFalse
.Kerning = 12
.Name = "+mn-It"
.UnderlineStyle =
msoNoUnderline
.Strike = msoNoStrike
End With
ActiveChart.Axes(xlCategory).AxisTit
le.Select
ActiveChart.Axes(xlValue,
xlPrimary).AxisTitle.Text = _
"Tamaño y SD (radio equiv, m="
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters.Text = _
"Tamaño y SD (radio equiv, m="
With
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters(1,
28).ParagraphFormat
.TextDirection =
msoTextDirectionLeftToRight
.Alignment = msoAlignCenter
End With

```

```

With
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters(1, 28).Font
    .BaselineOffset = 0
    .Bold = msoTrue
    .NameComplexScript = "+mn-
cs"
    .NameFarEast = "+mn-ea"
    .Fill.Visible = msoTrue
    .Fill.ForeColor.RGB = RGB(0, 0,
0)
    .Fill.Transparency = 0
    .Fill.Solid
    .Size = 10
    .Italic = msoFalse
    .Kerning = 12
    .Name = "+mn-lt"
    .UnderlineStyle =
msoNoUnderline
    .Strike = msoNoStrike
End With
Range("Z37").Select

```

```

ActiveSheet.ChartObjects("1
Gráfico").Activate
ActiveChart.Axes(xlCategory).AxisTit
le.Select
    ActiveChart.Axes(xlValue,
xlPrimary).AxisTitle.Text = _
    "Tamaño y SD (radio equiv, m)"
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters.Text = _
    "Tamaño y SD (radio equiv, m)"
    With
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters(1,
28).ParagraphFormat
    .TextDirection =
msoTextDirectionLeftToRight
    .Alignment = msoAlignCenter
End With
    With
Selection.Format.TextFrame2.TextR
ange.Characters(1, 28).Font
    .BaselineOffset = 0

```

```

    .Bold = msoTrue
    .NameComplexScript = "+mn-
cs"
    .NameFarEast = "+mn-ea"
    .Fill.Visible = msoTrue
    .Fill.ForeColor.RGB = RGB(0, 0,
0)
    .Fill.Transparency = 0
    .Fill.Solid
    .Size = 10
    .Italic = msoFalse
    .Kerning = 12
    .Name = "+mn-lt"
    .UnderlineStyle =
msoNoUnderline
    .Strike = msoNoStrike
End With
Range("U37").Select
End Sub

```

## 10. Macro deP32

Esta macro de *Microsoft Excel* lleva a cabo los cálculos para establecer le valor de la intensidad de fracturamiento P32. Promedia los resultados de P21 y P32 simulados de 30 iteraciones (10 por cada valor de P32 escogido). Luego, hace el cálculo de la regresión lineal entre los valores promedio de ambas medidas de intensidad, y mediante el cálculo y proyección del P21 observado genera el resultado del P32 real modelado.

```

Sub Macro_P32()
' Acceso directo: CTRL+s
' Ajustando viasualización,
eliminando información innecesaria
Cells.Select
ActiveWindow.Zoom = 60
Cells.Select
Selection.ColumnWidth = 5
Selection.ColumnWidth = 28.14
Selection.ColumnWidth = 5
Range("A1").Select
Columns("A:A").ColumnWidth =
22.57
Rows("3:9").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp

```

```

Columns("B:B").ColumnWidth =
16
Rows("4:43").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("5:6").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("9:15").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("10:153").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
'Cálculo de promedios de valores
simulados de P32 y P21.
Range("B13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"promedios"

```

```

Range("B14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "P32"
Range("B15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "P21"
Range("C14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=SUM(R[-11]C:R[-
11]C[9])/COUNT(R[-11]C:R[-
11]C[9])"
Range("C14").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("C14:E14"),
Type:=xlFillDefault
Range("C14:E14").Select
Range("D14").Select

```

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-11]C[9]:R[-
11]C[18])/COUNT(R[-11]C[9]:R[-
11]C[18])"
Range("E14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-11]C[18]:R[-
11]C[27])/COUNT(R[-11]C[18]:R[-
11]C[27])"
Range("C14:E14").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("C14:E15"),
Type:=xlFillDefault
Range("C14:E15").Select
Range("C15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
    "=SUM(R[-6]C:R[-6]C[9])/COUNT(R[-
6]C:R[-6]C[9])"
Range("D15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-6]C[9]:R[-
6]C[18])/COUNT(R[-6]C[9]:R[-
6]C[18])"

```

```

Range("E15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=SUM(R[-6]C[18]:R[-
6]C[27])/COUNT(R[-6]C[18]:R[-
6]C[27])"
' p21 observado
Range("B16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "P21
obs"
Range("C16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-
7]C[-1]"
' establecer valores de m y c de la
corrección lineal entre P21 y P32
Range("Q13").Select
Range("I13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "m"
Range("I14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "c"
Range("J13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=INDEX(LINEST(R[2]C[-
7]:R[2]C[-5],R[1]C[-7]:R[1]C[-5]),1)"

```

```

Range("J13").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("J13:J15"),
Type:=xlFillDefault
Range("J13:J15").Select
Range("J15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ""
Range("J14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
    "=INDEX(LINEST(R[1]C[-7]:R[1]C[-
5],RC[-7]:RC[-5]),2)"
'Resultado: P32 lineal
Range("M16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "P32"
Range("N16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "(RC[-
11]-R[-2]C[-4])/R[-3]C[-4]"
Range("N17").Select
End Sub

```

## 11. Macro de Evaluación de resultados

Esta macro de *Microsoft Excel* lleva a cabo los cálculos para evaluar el ajuste de los parámetros. Genera 40 simulaciones de 30 iteraciones, y mediante los resultados de propiedades que se miden en el plano compara el promedio de los valores simulados con los datos observados.

```

Sub Macro_resultados()
' Acceso directo: CTRL+D
' Ajustando visualización,
eliminando información innecesaria,
estableciendo un tamaño de fuente.
Cells.Select
ActiveWindow.Zoom = 60
Cells.Select
Selection.ColumnWidth = 5
Selection.ColumnWidth = 4.71
Range("A2").Select
Columns("A:A").ColumnWidth =
21.43
Columns("B:B").ColumnWidth =
21.43
Rows("3:9").Select

```

```

Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("4:43").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("5:5").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("6:7").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("7:13").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Rows("8:151").Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
' cálculo de los promedio simulados
Range("B9").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"promedios"

```

```

Range("A10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-
7]C"
Range("A10").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("A10:A14"),
Type:=xlFillDefault
Range("A10:A14").Select
Range("A10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ""
Range("B11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
    "=AVERAGE(R[-7]C[1]:R[-7]C[40])"
Range("B11").Select

```

```

Selection.AutoFill
Destination:=Range("B11:B14"),
Type:=xlFillDefault
Range("B11:B14").Select
Range("B9").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ""
Range("B10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Prom.
Simulaciones"
Range("D10").Select
'Resultados observados
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Result.
Obs."
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-
7]C[-2]"
Range("D11").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("D11:D14"),
Type:=xlFillDefault
Range("D11:D14").Select

```

```

Range("G10").Select
'Cálculo del error relativo
porcentual (%)
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Error
experimental relativo"
Range("G11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=((RC[-
3]-RC[-5])/RC[-5])*100"
Range("G11").Select
Selection.AutoFill
Destination:=Range("G11:G14"),
Type:=xlFillDefault
Range("G11:G14").Select
Range("H11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "%"
Range("H12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "%"
Range("H13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "%"
Range("H14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "%"

```

```

Range("B11:G14").Select
Selection.NumberFormat =
"0.0000"
Selection.NumberFormat =
"0.000"
Selection.NumberFormat = "0.00"
Selection.NumberFormat = "0.0"
With Selection
.HorizontalAlignment =
xlCenter
.VerticalAlignment = xlBottom
.WrapText = False
.Orientation = 0
.AddIndent = False
.IndentLevel = 0
.ShrinkToFit = False
.ReadingOrder = xlContext
.MergeCells = False
End With
Range("D22").Select
End Sub

```

