



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE LAS FALLAS MAYORES (P21) EN LA MINA EL TENIENTE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**SEBASTIÁN IGNACIO GONZÁLEZ NEGRETE**

PROFESOR GUÍA:

ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE

2015

## Resumen

El desarrollo de la tecnología minera subterránea en los últimos años ha permitido un rápido avance en la construcción de túneles y labores, lo que ha llevado a tener una menor cantidad de tiempo para levantar información geológica relevante. Esto último ha producido la existencia de zonas sin información de estructuras, lo que constituye potencialmente un riesgo no solo a la infraestructura sino también a la vida de las personas. En este contexto se enmarca la presente memoria de título, en la cual se busca, a partir de estructuras mayores mapeadas en zonas con alta resolución de información, calcular la densidad de estructuras (P21) para así poder complementar la información de aquellas zonas con baja resolución en la mina El Teniente.

Los parámetros utilizados para los cálculos de P21 fueron: densidad de mapeo, largo de estructuras, espesor típico, amplitud, ondulación y efecto de la litología. La información fue obtenida de los mapeos históricos de las minas Reservas Norte (ReNo) y Esmeralda, en sus respectivos niveles de producción y hundimiento. Para analizar los resultados de P21 obtenidos, se dividió el problema en 3 casos comparativos: entre nivel de producción y hundimiento de una misma mina, entre dos zonas de una misma mina en un mismo nivel y entre dos minas distintas del yacimiento.

Los resultados muestran que entre los niveles de producción y hundimiento ubicados a una diferencia de cota de 17 metros, se encuentran las mismas familias, orientaciones y espesores de estructuras. Sin embargo, lo anterior no se traduce en que los valores de P21 sean similares, lo que sugiere que estos dependen de variables estadísticas como número de mapeos y/o densidad de mapeos y no de variables geológicas.

Por otra parte, las variaciones de P21 dentro de un nivel, estarían controladas por la cercanía a los sistemas de fallas y/o a los contactos litológicos, donde aquellos en que se involucra el Complejo Máfico El Teniente (CMET) suelen poseer valores más altos. Además, las dos minas a pesar de presentar litologías y características geométricas similares poseen densidades distintas (0,08 m/m<sup>2</sup> y 0,15 m/m<sup>2</sup> promedio). Si a lo anterior se le suma que la mina con mayor número de estructuras mapeadas (Esmeralda) posee un menor largo interpretado, indicaría que las diferencias se deben a una interpretación que subestima o sobrestima la información existente.

En cuanto a relaciones geométricas, se obtuvo una relación lineal entre espesor y largo de fallas, que mejoró aquella creada anteriormente en El Teniente y que se acerca más a la existente en la literatura. Utilizando dicha curva y ocupando la información de diferencias de P21 en distintas minas es posible concluir que mina Esmeralda subestima la información, por lo que se recomienda realizar nuevos estudios que permitan mejorar dichas interpretaciones.

*A mis padres:*

*Cristian, Eduardo, Margarita y Sonia*

*“Think in terms of shoes.*

*You don’t want the biggest you can find.*

*You want the pair that fits.”*

*The Name of the Wind, Patrick Rothfuss*

## **Agradecimientos**

A mi profesor guía, Andrés Brzovic, por confiar en mí para desarrollar esta memoria, por su paciencia y aportes a este trabajo. A la profesora Sofía Rebolledo no solo por estar siempre disponible y revisar el trabajo infinitas veces sino que además por sus palabras alentadoras en esos momentos difíciles. Al profesor Sergio Sepúlveda por sus duros, pero certeros, comentarios acerca de este trabajo.

A la Superintendencia de Geología de la División El Teniente de Codelco por financiar esta memoria. Además, a las personas de dicha institución que hicieron distintos aportes como: José Seguel, Ignacio Fredes, Karen Baraona, Andrea Rojas y Paulina Schaster. También a mis compañeros memoristas Iván Rojas y Alonso Encina por hacer los almuerzos y la estadía en Rancagua más agradable.

A Blanca por su ayuda y sabios consejos con los (muchos) problemas burocráticos de la Universidad.

A Tania y Katy, no solo por su amistad, sino también por ayudarme a corregir el formato de este trabajo, sin su ayuda aún estaría cambiando todo de manera manual.

Al Geogrupo, que hicieron que estos años fueran alocados y divertidos, no olvidaré nunca esas salidas a la Fuente Suiza, el viaje a Perú y los distintos terrenos que pasamos juntos.

A Dani Fuentes, Laura, Pablo y Pau por estar ahí en uno de los momentos claves de mi desarrollo personal.

A Willy, que me ayudo a crear los códigos en Matlab, corregir la ortografía y redactar ideas, pero por sobre todo por apoyarme en los momentos de desmotivación, de dificultad creativa, económica e incluso ayudarme cuando estaba en el extranjero.

A mis abuelos, mis segundos padres, que en todo este periodo de universidad se han encargado de mí y me han quitado todas las preocupaciones domesticas que puedan existir.

A mi hermana por todas esas conversaciones, sacadas de vuelta y compensar toda la inutilidad que he mostrado desde pequeño.

A mis padres por soportar mi mal carácter, por sacrificar tanto por darme una buena educación, pero por sobre todo, por dejarme ser libre y apoyarme al 100% en mis decisiones.

## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Antecedentes generales de la mina El Teniente.....	1
1.2.	Ubicación y vías de acceso .....	3
1.3.	Motivación .....	4
1.4.	El Problema .....	4
1.5.	Objetivos .....	6
1.6.	Metodología de trabajo.....	7
1.7.	Zonas de estudio .....	7
1.7.1.	Reservas Norte.....	7
1.7.2.	Esmeralda .....	8
1.8.	Estudios previos.....	9
2.	Marco Geológico.....	10
2.1.	Geología regional .....	10
2.2.	Litologías.....	11
2.2.1.	Rocas estratificadas .....	11
2.2.2.	Rocas Intrusivas.....	14
2.3.	Estructuras.....	15
2.3.1.	Pliegues .....	16
2.3.2.	Fallas .....	16
2.3.3.	Discordancias.....	16
2.4.	Marco Geotectónico.....	17
2.4.1.	Evolución Andina.....	18
2.4.2.	Génesis de los mega depósitos de la Zona Central de Chile.....	20
2.5.	Geología del Yacimiento El Teniente .....	21
2.5.1.	Litología .....	22
2.5.2.	Geología Estructural .....	31
2.5.3.	Alteración y mineralización .....	32
3.	Metodología .....	36
3.1.	Obtención de datos .....	36

3.1.1.	Datos discontinuos.....	36
3.1.2.	Datos Continuos.....	37
3.2.	Comparación de estructuras mapeadas entre ambos niveles.....	37
3.2.1.	Comparación de orientación entre ambos niveles .....	37
3.2.2.	Comparación de características estructurales entre ambos niveles .....	38
3.3.	Comparación de estructuras interpretadas entre ambos niveles .....	38
3.4.	Método de los círculos .....	39
3.4.1.	Círculo óptimo .....	39
3.4.2.	Medición de largo de estructuras interpretadas (l).....	40
3.4.3.	Medición del largo de las labores (L) .....	40
3.4.4.	Cálculo de mapeos dentro de un círculo (n).....	40
3.4.5.	Cálculo de espesores dentro de un círculo ( $\epsilon$ ) .....	41
3.5.	Cálculos de P21 o estructuras interpretadas .....	41
3.6.	Cálculo de densidad de mapeo o de estructuras proyectadas ( $\delta$ ).....	41
3.7.	Cálculo de estándar de densidad de mapeo .....	42
3.8.	Relación entre espesor ( $\epsilon$ ) y largo de las estructuras (l) .....	42
3.9.	Mapas de P21 .....	43
3.9.1.	Grilla de Esmeralda .....	43
3.9.2.	Grilla Reservas Norte.....	44
3.9.3.	Interpolación.....	45
3.10.	Diferencias de densidad de estructuras .....	46
3.10.1.	Diferencias en distintas zonas de una sola mina.....	46
3.10.2	Diferencias entre dos minas .....	46
4.	Resultados y discusiones.....	47
4.1.	Consistencia de datos .....	47
4.1.1.	Mina Esmeralda.....	47
4.2.	Círculo Óptimo .....	50
4.2.1.	Cambio de P21 en función del radio .....	51
4.2.2.	Cambio de densidad de mapeos en función del radio.....	53
4.2.3.	Elección del radio.....	54
4.3.	Densidad mínima de mapeo.....	54
4.4.	Mapas de P21 .....	55

4.4.1.	Esmeralda Hundimiento .....	56
4.4.2.	Esmeralda Producción.....	57
4.4.3.	Comparación de P21 entre los niveles de Esmeralda.....	58
4.4.4.	ReNo Hundimiento.....	58
4.4.5.	ReNo Producción .....	59
4.4.6.	Comparaciones entre los niveles de ReNo .....	60
4.4.7.	Extensión K y 4Sur.....	60
4.4.8.	Comparación entre ReNo y Esmeralda .....	62
4.5.	Diferencias de densidad de estructuras .....	62
4.5.1.	Diferencias de densidad de estructuras entre dos niveles .....	63
4.5.2.	Diferencias de P21 en un mismo nivel.....	66
4.5.3.	Diferencias de Intensidad entre ReNo y Esmeralda .....	73
4.6.	Espesor vs Largo.....	77
4.6.1.	Espesores en Esmeralda .....	77
4.6.2.	Espesores en ReNo .....	79
4.6.3.	Comparación de espesores típicos en los distintos sistemas de fallas.....	81
4.6.4.	Relaciones de espesor con largo .....	82
4.7.	Geometría fallas mayores .....	84
4.7.1.	Ondulación de Fallas .....	84
4.7.2.	Amplitud de Fallas .....	85
4.7.3.	Ondulación vs Amplitud .....	86
4.7.4.	Amplitud vs Largo.....	87
4.7.5.	Amplitud vs Espesor .....	87
4.8.	Recomendaciones de mapeo .....	89
4.8.1.	Mapeo necesario .....	89
4.8.2.	Área a cubrir.....	90
5.	Conclusiones.....	91
6.	Bibliografía .....	93

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Métodos de explotación usados en El Teniente.....	2
Figura 1.2 Niveles y cotas de las minas actuales en explotación..	2
Figura 1.3: Ubicación de El Teniente y vías de acceso por la Carretera del Cobre. ....	3
Figura 1.4 Respuesta generada por fallas ante el avance de las labores en la mina El Teniente.....	4
Figura 1.5: Mapa Geológico de mina Esmeralda .....	5
Figura 1.6: Mapa que contiene todas las estructuras mapeadas en Esmeralda Hundimiento. ....	6
Figura 1.7: Ubicación de las zonas de Reservas Norte y Esmeralda.....	9
Figura 2.1: Unidades Geomorfológicas de la VI región. ....	10
Figura 2.2: Mapa Geológico de la VI región en la zona de alta cordillera.....	14
Figura 2.3: Estructuras tipo Riedel en zonas de transcurrencia sinistral .....	17
Figura 2.4: La zona de Flat Slab divide la Zona Volcánica Central (ZVC) de la Zona Volcánica Sur (ZVS).....	18
Figura 2.5: Evolución tectónica al sur de los $-33^{\circ}$ .....	20
Figura 2.6: Límite de la ley de Cobre de 0,5%..	22
Figura 2.7: Fotomicrografías de las unidades pertenecientes al Complejo Félsico .....	26
Figura 2.8: Fotografías de las diferentes unidades del Complejo de Brechas .....	28
Figura 2.9: Unidades litológicas de mayor tamaño en el nivel 6 de El Teniente.....	30
Figura 2.10: Zona de Falla El Teniente (TFZ) y su relación con las litologías..	31
Figura 2.11: Perfil de enriquecimiento secundario dentro de la mina. ....	35
Figura 3.1: Comparación de familias de estructuras en Esmeralda.....	38
Figura 3.2: Círculos concéntricos con diferencia de 10 metros entre cada uno de ellos.	
Figura 3.2b: Círculos de radio 50 metros con centro ubicado a 50 metros del centro del círculo de radio 100 metros. ....	39
Figura 3.3: Relación de escala entre el espesor de la falla y su longitud.....	42
Figura 3.4: Grilla de Esmeralda Hundimiento.....	44
Figura 3.5: Grilla de Reservas Norte Hundimiento.....	45
Figura 4.1: Zonas estructurales en Esmeralda por la presencia de los grandes sistemas de fallas B y P..	47

Figura 4.2: Comparación de dip/dip dir de estructuras mayores mapeadas.....	48
Figura 4.3: Comparación de acumulación de polos en mina Esmeralda, sector 1.....	49
Figura 4.4: Comparación de espesores en sector 1 de Esmeralda.....	50
Figura 4.5: Comparación de estructuras de las distintas minas estudiadas. ....	51
Figura 4.6: Variación de intensidad (P21) en función del radio del círculo utilizado. s...	52
Figura 4.7: Zona de Esmeralda Hundimiento con baja densidad de labores. ....	52
Figura 4.8: Variación de densidad de mapeo en función del radio del círculo utilizado..	53
Figura 4.9: Zona de Esmeralda Producción con bajos valores de densidad de mapeo independiente del radio.. ....	54
Figura 4.10: Mapa de densidad de estructuras de Esmeralda Hundimiento.. ....	56
Figura 4.11: Mapa de labores de Esmeralda Hundimiento.. ....	57
Figura 4.12: Mapa de densidad de estructuras de Esmeralda Producción.. ....	58
Figura 4.13: Mapa de densidad de estructuras de ReNo Hundimiento.. ....	59
Figura 4.14: Mapa de densidad de mapeo de ReNo Producción.....	60
Figura 4.15: Comparación de nivel de hundimiento con producción del sector 4 Sur. ....	61
Figura 4.16: Comparación de intensidades de Esmeralda con 4 Sur .....	62
Figura 4.17: Comparación de P21 de Esmeralda con ReNo.. ....	62
Figura 4.18: Comparación de P21 entre los niveles de hundimiento con producción de mina Esmeralda. ....	63
Figura 4.19: Comparación de P21 entre niveles de hundimiento y producción de Esmeralda aplicando un filtro de una estructura cada 5 metros. ....	64
Figura 4.20: Comparación de estructuras mayores mapeadas, entre hundimiento y producción, en radios con mismas coordenadas de centro, pero distinta cota. ....	65
Figura 4.21: Comparación de P21 con densidad de mapeos (<10%) y número de estructuras similares (<5%) .....	65
Figura 4.22: Mapa geológico del nivel de Esmeralda Hundimiento.....	66
Figura 4.23: Mapa de intensidades unidos con litología en nivel de hundimiento de Esmeralda.....	67
Figura 4.24: Zoom a zona centro de Esmeralda.....	67
Figura 4.25: Zonas con particularidades de densidad de estructuras y litología.....	68
Figura 4.26: Mapa de densidad de estructuras y litología de Reservas Norte Hundimiento. ....	69
Figura 4.27: Sector NE de Reservas Norte. ....	69

Figura 4.28: Zona de alta densidad de estructuras en Reservas Norte hundimiento.. ....	70
Figura 4.29: Zona de alta densidad de estructuras de Reservas Norte Producción. ....	70
Figura 4.30: Densidad de estructuras en función de las litologías.. .....	72
Figura 4.31: Mapa de densidad de estructuras unido con estructuras mayores interpretadas en nivel de Esmeralda Hundimiento. ....	73
Figura 4.32: Densidad de estructuras en función de sistemas de fallas de Esmeralda y Reservas Norte .....	74
Figura 4.33: Comparación de densidad de labores entre Esmeralda y ReNo en sus niveles de hundimiento. ....	74
Figura 4.34: Comparación de largo de estructuras interpretadas vs mapeadas en Esmeralda y ReNo.....	75
Figura 4.35: Comparación entre ReNo y Esmeralda acerca de estructuras interpretadas en función de densidad de mapeo.....	76
Figura 4.36: Estructuras de Esmeralda hundimiento aplicando un filtro de espesor típico mayor a 2 cm. ....	78
Figura 4.37: Estructuras con espesor típico mayor a 3 centímetros en Reservas Norte. .	81
Figura 4.38: Relación de largo de las estructuras con su espesor.....	82
Figura 4.39: Comparación de largos interpretados y espesores medidos, de ambas minas, con la curva propuesta .....	83
Figura 4.40: Esquema de ondulación.....	84
Figura 4.41: Sistemas con distinta ondulación.....	85
Figura 4.42: Representación grafica de amplitud .....	86
Figura 4.43: Amplitud medida en los sistemas de fallas.....	86
Figura 4.44: Ondulación vs Amplitud de las fallas de mina El Teniente.....	87
Figura 4.45: Relación de amplitud con Largo de falla.....	88
Figura 4.46: Relación de espesor típico medio con amplitud de fallas.....	88
Figura 4.47: Densidad de estructuras en función de estructuras mayores mapeadas en Esmeralda.....	89
Figura 4.48: Densidad de estructuras en función de área mapeadas en Esmeralda.....	90

## Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de estructuras en mina El Teniente.....	32
Tabla 2: Clasificación de Estructuras Geológicas Yacimiento El Teniente según Push (1994).....	36
Tabla 3: Resumen de las familias observadas y las orientaciones con mayor concentración. ....	49
Tabla 4: Resumen de densidad de mapeos en distintas zonas de las diferentes minas del yacimiento. ....	55
Tabla 5: Resumen de las características principales de los sistemas de Fallas de las minas ReNo y Esmeralda. Recopiladas desde Seguel (2013).....	77
Tabla 6: Resumen de espesores de estructuras mayores en minas Esmeralda y ReNo ...	77
Tabla 7: Resumen de la distribución de espesores típicos de mina Esmeralda.....	78
Tabla 8: Resumen de espesores divididos entre los asociados al sistema de falla B, P o sin asociación .....	79
Tabla 9: Resumen de la distribución de espesores típicos de mina Reservas Norte .....	79
Tabla 10: Resumen de espesores divididos entre los asociados al sistema de falla N1, C, G o sin asociación.....	81

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes generales de la mina El Teniente

La mina El Teniente, es un mega yacimiento de Cobre-Molibdeno (Cu-Mo) que pertenece a la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO). Es la mina subterránea en operación más grande del mundo, con un área aproximada de 6 km<sup>2</sup>, una extensión vertical, actual, de 1km y posee más de 3000 km en túneles. Su extracción promedio es de 160.000 toneladas por día.

La mina comenzó su explotación a gran escala a partir de 1905, sin embargo, hay evidencia que desde la época colonial existían pequeños trabajos de extracción mineral (Baros, 1995). En 1915 la “*Braden Cooper Company*”, anterior propietaria, vende el yacimiento a la “*Kenecott Corporation*”. En 1967, ocurre la chilenización del cobre, por lo que el Estado se convierte en socio mayoritario de la mina, al adquirir el 51% de las acciones, pasando la empresa a tomar el nombre de “Sociedad minera El Teniente”. Finalmente, en 1971 ocurre la nacionalización del cobre, con lo que el Estado de Chile se convierte en el único dueño de El Teniente.

El Teniente se ubica en el arco magmático más joven (Mioceno-Plioceno) de la Zona Volcánica Sur Andina, donde la alteración hidrotermal de distintos pulsos félsicos dieron lugar a la formación del yacimiento (Maksaev, 2004). Éste, se encuentra emplazado en rocas volcánicas de la Formación Farellones (Mioceno) y brechas hidrotermales (Kay, Mpdozis, Ramos, & Munizaga, 1991).

La mineralización rentable principal del yacimiento es calcopirita, bornita y molibdenita, las que se ubican en distintos tipos de vetillas, que se encuentran como enrejado o *stockwork*.

El método de explotación se denomina Hundimiento (*Caving*), en su variante de Paneles (*Panel*), que reemplazó al de Bloques (*Block*) en 2001 (Figura 1.1). En la Figura 1.2 se observan los niveles que actualmente están siendo explotados, además de los

futuros proyectos en desarrollo (Nuevo Nivel Mina), ambos están ubicados en los contornos de la Brecha Braden.

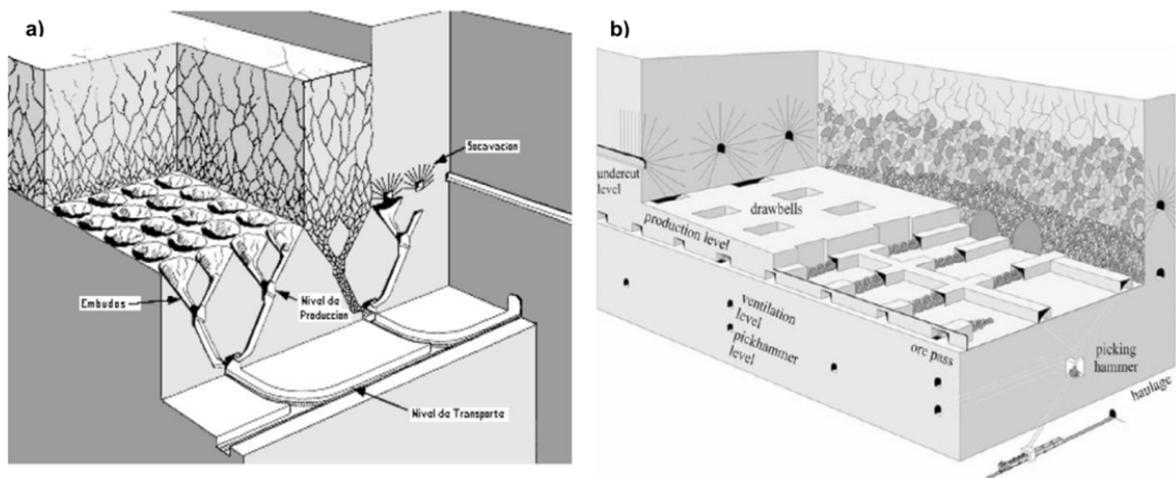


Figura 1.1: Métodos de explotación usados en El Teniente. En la Figura a se observa la variante de bloques usado hasta el 2001; mientras que en la b, la variante de paneles que se utiliza actualmente. (Imagen tomada de Harrison, 2009).

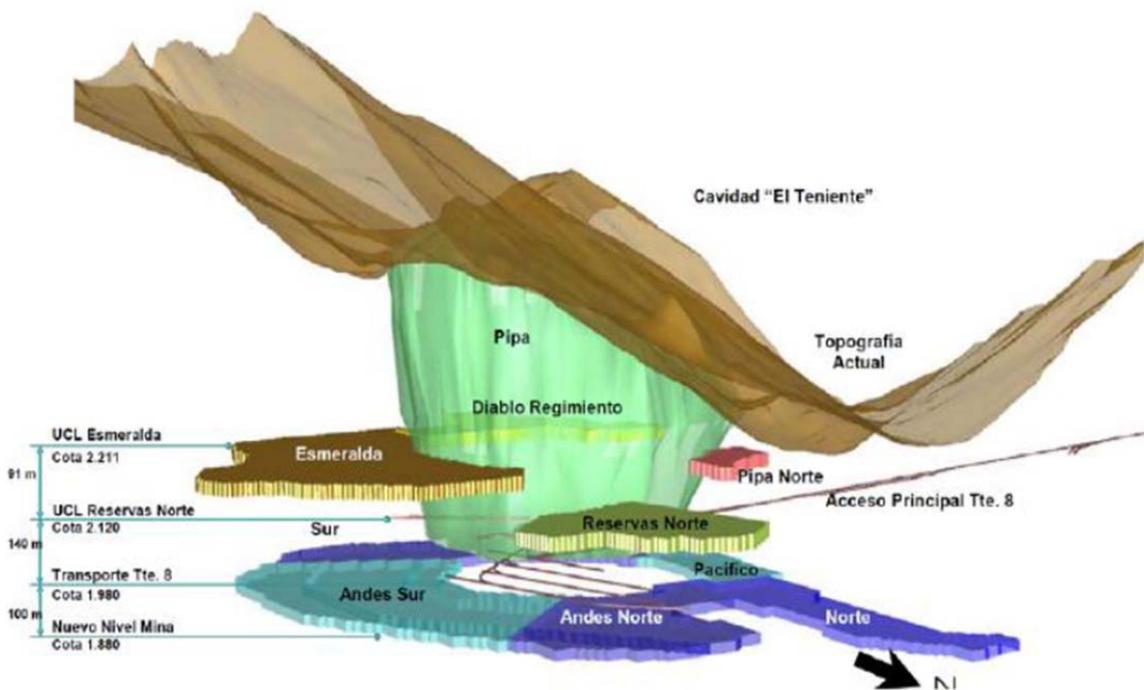


Figura 1.2 Niveles y cotas de las minas actuales en explotación. Además se muestran los desarrollos de Nuevo Nivel Mina (Imagen tomada de Harrison, 2009).

## 1.2. Ubicación y vías de acceso

El yacimiento se encuentra ubicado en la Cordillera de los Andes Centrales de Chile, en la VI Región del Libertador Bernardo O'higgins, Provincia del Cachapoal, Comuna de Machali, en las coordenadas  $-34^{\circ}05$  norte y  $70^{\circ}21$  oeste, a 39 kilómetros al NE de Rancagua, 72 kilómetros al SE de Santiago y a 3km al SE del ex campamento minero de Sewell (Figura 1.4).

El acceso a la mina desde la ciudad de Rancagua se realiza por la carretera Eduardo Frei Montalva (ex carretera El Cobre), que une la ciudad con Colón Alto, donde se encuentran distintos departamentos de la División El Teniente. Desde acá, es posible ingresar mediante un tren eléctrico que llega al nivel Ten-8 o por vehículo, vía el camino hacia Sewell. Para ingresar a los diversos niveles de la mina se utilizan 3 piques (B, C o 2) y/o rampas.



Figura 1.3: Ubicación de El Teniente y vías de acceso por la Carretera del Cobre. La imagen inferior izquierda esta sacada desde [turismovirtual.cl](http://turismovirtual.cl), mientras que la de la derecha es tomada de (Padilla, 2004)

### 1.3. Motivación

Debido a los avances en la tecnología minera subterránea, cada vez es posible realizar la explotación de yacimientos a una mayor velocidad, lo que ha llevado a mejorar la producción y reducir los costos. Sin embargo, lo anterior también ha tenido impactos negativos, como la baja recopilación de información, esto último debido al rápido avances en las labores y al poco tiempo que existe para mapear, debido a que los frentes son cubiertos con hormigón proyectado (*shotcret*), por lo tanto, la cantidad de estructuras mayores mapeadas ha disminuido.

Por otra parte, contar con una mayor cantidad de mapeos permite mejorar o aumentar la precisión de los modelos geológicos, los que son de una vital importancia en la minería subterránea. Las fallas generan respuestas sísmicas ante el avance de los frentes, lo que a su vez puede provocar eventos catastróficos, como estallidos de rocas o colapso de túneles (Figura 1.4), siendo entonces necesario caracterizarlas para así poder controlar o predecir las reacciones de éstas.



Figura 1.4 Respuesta generada por fallas ante el avance de las labores en la mina El Teniente. En la izquierda se observa un estallido de rocas, en la derecha el colapso de un túnel. Imágenes tomadas de (Seguel, 2012)

### 1.4. El Problema

El proceso de creación de mapas geológicos en El Teniente consta de cuatro partes. Primero, se levanta la información de las estructuras en los frentes sin fortificar; luego, éstas son ingresadas como rectas discontinuas en el software Xilab;

posteriormente, se interpretan para dar continuidad a las estructuras mapeadas; finalmente se crea un modelo/mapa geológico (Figura 1.5).

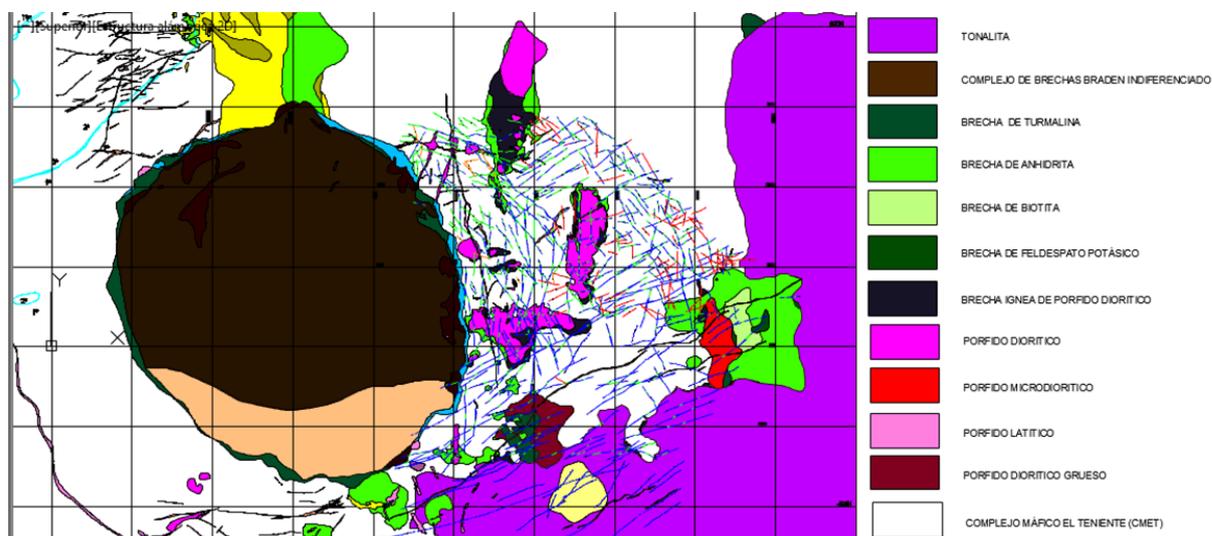


Figura 1.5: Mapa Geológico de mina Esmeralda que contiene las estructuras y litologías mapeadas. Imagen tomada desde Plano Esmeralda Hundimiento 1:1000, creado por la Superintendencia de Geología de la División El Teniente (2013)

En la Figura 1.6, se observa cómo en dos sectores de mina Esmeralda, que poseen áreas similares, presentan diferencias de casi 400% en cantidad de estructuras mapeadas, siendo el sector más nuevo el que posee una menor cantidad. Esta falta de información, impide generar mapas geológicos de alta confiabilidad. Para interpretar la información se han proyectado las estructuras mapeadas desde un nivel superior (TEN-5). Sin embargo, dichas estructuras, no tienen el mismo sustento, pero dado que existen buenos y abundantes mapeos en la zona, es esperable que existan reglas o correlaciones entre algunas características de fallas que permitan dar robustez a la interpretación.

Para lo anterior se transforman datos geológicos de dos o tres dimensiones en parámetros cuantitativos con el objetivo de describir las características de las estructuras. Esto se conoce como **Parámetro de Warburton (P21)**, o largo de una discontinuidad por unidad de roca expuesta o vista, y puede ser definido también como “la intensidad o densidad de fracturamiento en un área determinada”

En este estudio se sugiere estudiar las características de las fallas con el objetivo de encontrar estas correlaciones para complementar aquellas zonas sin información.

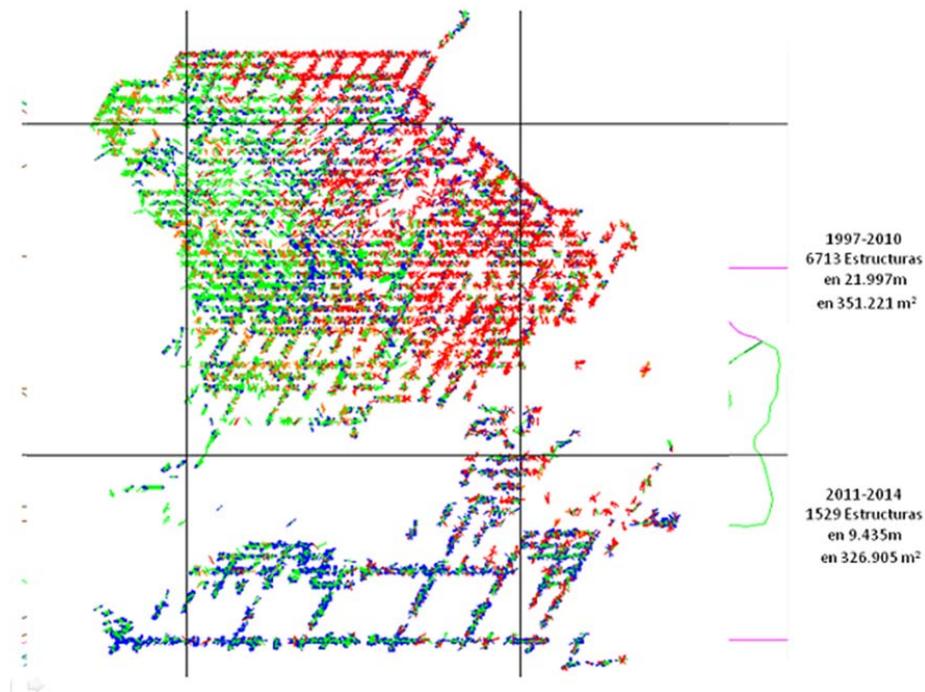


Figura 1.6: Mapa que contiene todas las estructuras mapeadas en Esmeralda Hundimiento. La zona sur presenta casi 4 veces menos de estructuras en comparación al norte en áreas de tamaños similares.

### 1.5. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es explicar las diferencias en la densidad de fallas mapeadas en las minas Esmeralda y ReNo y aportar antecedentes que permitan mejorar la interpretación de las estructuras mayores para dar confiabilidad a los mapeos estructurales de ambas minas.

Para lo anterior, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar las orientaciones de las fallas en los niveles de producción y hundimiento de ambas minas.
2. Calcular la densidad de fallas (P21) en ambos niveles de ReNo y Esmeralda.
3. Establecer una relación entre el largo de las estructuras observadas históricamente en El teniente versus el espesor que estas presentan.
4. Calcular la densidad de estructuras mapeadas ( $\delta$ ) en ambas minas. Posteriormente comparar con la interpretación realizada (P21).

## 1.6. Metodología de trabajo

Para la ejecución de este estudio se ha dividido el trabajo en diversas etapas, que se explican a continuación:

**Recopilación y análisis de información bibliográfica**, que permite comprender el problema, para así luego poder simplificarlo y optimizar la forma de resolverlo.

La siguiente etapa del trabajo verifica la **Consistencia de datos**. Para esto se compararán las características estructurales (orientación y espesor) de varios sectores de los niveles de hundimiento y producción. Posteriormente, con esta información se contrastarán las interpretaciones en las mismas zonas y su relación con la consistencia de mapeos, además se establecen los casos en que ambos presentan buenas relaciones, para así utilizar dicha información a manera de filtro.

El **Cálculo de densidad de estructuras** se realiza en base a los planos de estructuras interpretadas mediante el software *ArcGis* y se aplica el filtro establecido en el punto anterior. Posteriormente, para **visualizar la intensidad** de mejor manera, se crearon mapas de P21 continuos mediante el programa *Matlab* y su función de interpolación.

Finalmente, se realiza el **Análisis de resultados gráficos** que junto a la información recopilada en la bibliografía permite interpretar y discutir los resultados.

## 1.7. Zonas de estudio

Las zonas de estudio corresponden a las minas Reservas Norte (ReNo) y Esmeralda (Figura 1.7)

### 1.7.1. Reservas Norte

Se ubica al norte de la Pipa Braden y se encuentra en el nivel Teniente Sub6. Su nivel de producción está situado en la cota 2102, mientras que hundimiento, en 2121. Reservas Norte se encuentra en funcionamiento desde el año 1997, posee 1894 estructuras mayores mapeadas, y abarca un área aproximada de 0,655 km<sup>2</sup>.

En esta mina se encuentran tres sistemas de Fallas. El más largo es N1, de continuidad superior a 1500 m, mientras que los restantes, C y G, son de continuidad no superior a los 700 m.

La litología más común es CMET, pero existe presencia de pórfido diorítico, dacita y brechas de anhidrita.

#### 1.7.2. Esmeralda

Se ubica al este de la Brecha Braden y se encuentra en el nivel Teniente 6. Su nivel de producción está situado en la cota 2192, mientras que hundimiento en 2210. Se halla en funcionamiento desde el año 1992, posee 2573 estructuras mayores mapeadas, y abarca un área aproximada de 0,558 km<sup>2</sup>.

En esta mina se encuentran cuatro sistemas de fallas, siendo dos particularmente grandes (B y P), con extensiones verticales que abarcan distintos niveles y continuidad horizontal superior a 1 km. Los restantes (NE y J) presentan extensión local, no superior a 500 m.

La litología más común y que actúa como roca caja es CMET. También, en la parte centro de la mina hay presencia de pórfidos dioríticos y brechas dioríticas. Esta mina posee en sus bordes Tonalita y el complejo de Brecha Braden (referencia interna SGL-I-123/2003)

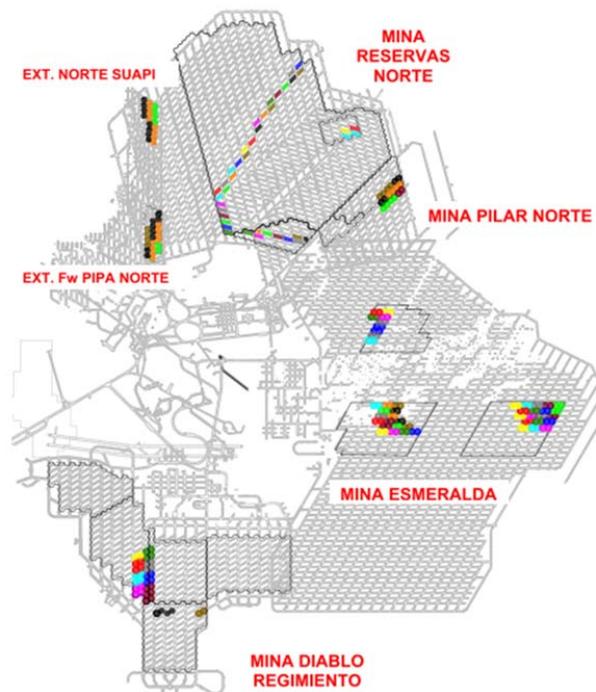


Figura 1.7: Ubicación de las zonas de Reservas Norte y Esmeralda (referencia interna SGL-I-123/2003)

### 1.8. Estudios previos

La Superintendencia de Geología, de la división El Teniente, ha realizado trabajos previos acerca de la densidad de estructuras y las características de las mismas. Sin embargo, no existe ningún trabajo previo que intente relacionar ambos parámetros.

Algunos autores que han estudiado dichas variables en ReNo o Esmeralda son:

Schaster (2013), calculó en Esmeralda la intensidad en función de diferentes radios, para observar el efecto de la escala en esta variable, concluyendo que a partir de cierto rango los valores tienden a estabilizarse. Además, calculó el P21 para diversos sectores de Esmeralda y Reservas Norte, encontrando diferencias de intensidad entre dos niveles y dentro de uno solo.

Seguel (2013), realizó una caracterización de las fallas principales que cruzan los actuales sectores en explotación. También obtuvo diferentes relaciones lineales entre características intrínsecas de las fallas, siendo la más importante aquella que relacionaba el espesor con el largo.

## 2. Marco Geológico

### 2.1. Geología regional

A la altura de los  $-34^{\circ}$  latitud, Charrier (1981) definió tres unidades morfológicas distintas. En el oeste, la Cordillera de la costa, que se compone esencialmente de rocas sedimentarias y volcánicas del Paleozoico, éstas se encuentran intruídas por el Batolito Costero, el que representaría el arco magmático del Paleozoico Tardío. Hacia el este, se encuentra el Valle Central, una depresión con rellenos cuaternarios que presentan orientación norte-sur con un ligero desplazamiento hacia el oeste. Finalmente, hacia el oriente, se encuentra la Cordillera Principal, la que está formada por grandes secuencias de intercalaciones de rocas volcánicas con estratificaciones de tipo marino-continental; la edad de estas rocas abarca desde finales del Triásico hasta el Cuaternario (Figura 2.1). Estas intercalaciones se encuentran intruídas por plutones y diques, que serían manifestaciones de apófisis de cuerpos de mayor envergadura. En el flanco occidental de esta cordillera, en la VI región, se encuentra ubicado el mega-yacimiento El Teniente.



Figura 2.1: Unidades Geomorfológicas de la VI región. Modificado de Börguel (1983)

## 2.2. Litologías

### 2.2.1. Rocas estratificadas

Las formaciones estratigráficas de la Cordillera Principal, en la VI región, ordenados de manera cronológica son:

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

Son rocas sedimentarias clásticas ubicadas en la zona este de la región. Dicha formación está definida por Klöhn (1960). Posee un Miembro Superior Evaporítico de 500-600 m en el punto de mayor potencia, lo que representa un ciclo marino en el Kimmeridgiano, y un Miembro Inferior Detrítico y Calcáreo de potencia 100-200 m (Vicente & Davidson, 1973). Su contacto superior es de tipo concordante con la Formación Río Damas.

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

Definida por Klöhn (1960). Su constitución es de roca sedimentaria clástica, con intercalaciones de depósitos de origen volcánico de tipo efusivo y sedimentos químicos ocasionales, lo que indicaría un ambiente continental de tipo terrestre subaéreo a lagunar, representando el término de un ciclo regresivo. Su espesor promedio es de 3000 m. Bajo ésta se encuentra la Formación Nacientes del Teno y sobre ella de manera concordante se deposita la Formación Baños del Flaco. Posee un contacto por falla con la Formación Leñas-Espinoza (Charrier, 1973)

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

Definida por Klöhn (1960) y corregida 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 Río Dama.

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

Definida por Klöhn (1960) y corresponde a rocas sedimentarias calcáreas de tipo marino, con intercalaciones detríticas y volcánicas, lo que indicaría la transgresión-regresión marina del Kimmerdgiano. Su potencia varía de manera lateral, hacía el oeste, desde 1100 m hasta 2300 m. Charrier, en 1981, redefine el miembro superior de la Formación Leñas-Espinoza (Klöhn 1960) al asignarlo a ésta. Su espesor promedio es de aproximadamente 1000 m. Posee contactos concordantes en su base con la Formación Rio Damas y Leñas-Espinoza; además es sobreyacida de manera concordante por la Formación Colimapu, sin embargo en algunos sectores el límite superior se encuentra erosionado y cubierto, de manera discordante, por la Formación Coya-Machalí.

e) Formación Colimapu (Barremiano-Albiano):

Definida inicialmente por Klöhn (1960) y luego estudiada por González y Vergara (1962). 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 R. , 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 (Figura 9). 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. Levi (1989) plantea que existe metamorfismo de bajo grado en esta formación. Su contacto inferior es discordante con la Formación Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Rio 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), de litología predominante volcánica, compuesta por sedimentitas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas, y rocas piroclásticas que se alternan con depósitos lagunares (areniscas, lutitas, tufitas y calizas). Presenta potencias de al menos 2400 m. Se distribuye en franjas norte-sur y se encuentra delimitada por la Formación Coya-Machalí por ambos lados (Figura 9). Ésta formación contiene al mega yacimiento El Teniente. Presenta contactos inferiores de tipo discordancia angular con la Formación Coya-Machalí y se encuentra cubierta de manera parcial con la Formación Colorado-La Parva (Thiele, 1980). Charrier y Munizaga (1979) datan esta formación entre el Mioceno Medio y Superior.

h) Formación Colón-Coya (Plioceno-Pleistoceno):

Fue reconocida por primera vez por Enrione (1972), pero fue definida por primera vez como formación por Gómez (2001). Son depósitos laháricos con intercalaciones de ceniza, coladas andesíticas y gravas fluviales. La potencia es variable, desde algunos centímetros a unos 150 m. Su contacto inferior es con las formaciones Coya-Machalí y Farellones, siendo concordante pero rellenando la paleotopografía. Su techo es la topografía actual. Dataciones de Charrier y Munizaga (1979) coinciden con los resultados más actuales de Cuadra (1986), los que corresponden a Plioceno-Pleistoceno (2,3-1,3 Ma) (Figura 2.2)

i) Depósitos no consolidados (Plioceno-Pleistoceno):

Se ubican en las zonas de drenaje actual del valle, que corresponden a los principales ríos y afluentes. Sus depósitos son aluviales, glaciales, de escombros y de remociones (Charrier, 1983).

Lo anteriormente desarrollado, se puede observar en el mapa geológico presentado en la Figura 2.2.

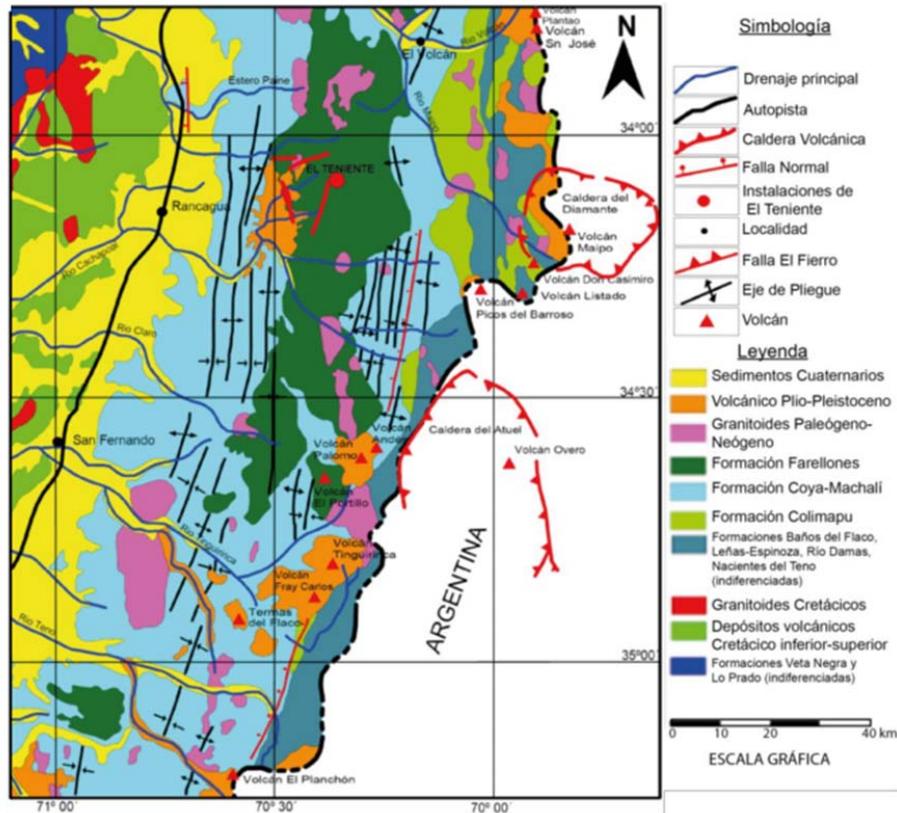


Figura 2.2: Mapa Geológico de la VI región en la zona de alta cordillera. (Imagen modificada de Charrier et al., 1996 y tomada de Harrison, 2010).

### 2.2.2. Rocas Intrusivas

En la zona en que se emplaza El Teniente, se encuentran intruyendo a las formaciones del Mioceno: Farellones y Coya-Machalí (Skewes, 2002). Además, forman alineaciones norte-sur, creando cinco franjas de intrusivos que se agrupan en complejos ígneos del Paleógeno-Neógeno (Oligoceno Superior al Mioceno Superior), con edades entre los 34,5 a los 5,59 Ma (Falcón & Rivera, 1998). Posee una amplia variedad de composiciones como: granodioritas de horblenda y biotita, pórfidos diorítico-andesítico, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos). Además, debido a que su carácter va desde plutónico a hipoabisal, posee una diversidad de texturas.

También existen cuerpos de tamaño inferior que representan, principalmente, stocks, diques, filones y apófisis provenientes de los cuerpos intrusivos mayores. Su

composición varía desde granitos, granodioritas, tonalitas, monzonitas a dioritas cuarcíferas (Charrier, 1981).

La edad de estos cuerpos puede ser agrupada, según Kurtz (1997) y vía el método Ar/Ar, en 3 unidades:

- 1) Complejo Plutónico Antiguo (Oligoceno Superior- Mioceno Inferior): Su edad se encuentra entre los  $21,6 \pm 4,9$  y  $16,2 \pm 1,2$  Ma.
- 2) Complejo Plutónico Teniente (Mioceno Medio-Mioceno Superior): Presenta dos unidades, la más antigua de edad  $12,4 \pm 2,5$  Ma, mientras que la más joven varía entre  $8,8 \pm 0,1$  y  $7,7 \pm 0,1$  Ma.
- 3) Complejo Plutónico Joven (Mioceno Superior): De edad  $6,6 \pm 0,1$  Ma y  $5,5 \pm 0,2$  Ma

La actividad magmática de la zona sucedió entre el Oligoceno Superior al Mioceno Superior, lo que es contemporáneo a las edades de las Formaciones Coya-Machalí y Farellones (Kurtz et. al, 1997; Falcón y Rivera, 1998)

### 2.3. Estructuras

Chile a escala regional, entre los  $-33^{\circ}\text{N}$  y  $-39^{\circ}\text{N}$ , presenta estructuras NW y NNW, que fueron formadas durante los eventos tecto-magmáticos del Paleozoico-Mesozoico (Godoy y Lara, 1994). Éstas, acotan los segmentos tectónicos que se disponen oblicuamente a la Cordillera actual, siendo reactivadas reiterativamente durante el Mesozoico-Cenozoico (Rivera y Cembrano, 2000), lo que explicaría la distribución en franjas de los intrusivos del Mioceno (Falcón y Rivera, 1998).

Los eventos tectónicos fueron controlados por zonas de transcurrencia sinistral,  $\text{N } 50^{\circ} \text{ W}$  (Zona de Falla Río Blanco-Codegua), lo que generó un sistema Riedel, de fracturas tipo R sinestrales de orientación  $\text{N } 60^{\circ} \text{ W}$  y antitéticas tipo R' dextrales con orientación  $\text{N } 50^{\circ} \text{ E}$  (Falcón y Rivera, 1998). Lo anterior puede ser observado en la Figura 2.3.

Se pueden identificar además en la región, tres tipos diferentes e importantes de estructuras.

### 2.3.1. Pliegues

Descritas en un principio por Klöhn (1960) y posteriormente por Charrier (1994) como sinclinales y anticlinales que afectan principalmente a la Formación Farellones. Presenta un suave buzamiento hacia el sur con ejes de rumbo norte-sur, pero con variaciones entre N30°W y N30°E (Gómez, 2001). La continuidad longitudinal se encuentra delimitada por los sistemas de fallas N°30 W (Rivera y Falcón, 2000), como se observa en la Figura 2.3.

### 2.3.2. Fallas

De orientación predominante N30°W, el sistema se compone de siete zonas de fallas que se distribuyen entre la Cordillera de la Costa y la de los Andes, sin embargo, en la Depresión Intermedia el relleno sedimentario oblitera la traza de las fallas, por lo que es menos visible que en las topografías más altas. Las fallas más cercanas al yacimiento son la falla Piuquencillo, El Azufre y Juanita que se encuentran al norte, centro y sur respectivamente. Éstas cortarían a los pliegues de la Formación Farellones y además, en conjunto con el lineamiento Tinguiririca-Navidad formarían una cuenca volcano tectónica, según Rivera y Falcón (2000). Otras fallas de importancia, pero menor tamaño, se encuentran en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí y corresponderían a fallas normales con desplazamientos verticales, asociados a la tectónica de bloques Plio-Cuaternaria resultante del alzamiento andino (Charrier, 1981) En este proceso también estarían involucradas las fallas inversas de la franja oriental.

### 2.3.3. Discordancias

Las tres fases compresivas que afectaron a la región son manifestadas como tres discordancias de carácter orogénico (Klöhn, 1960):

- 1) Una primera fase en el Cretácico Superior que puso en discordancia a la Formación Farellones con las rocas volcánicas cuaternarias.
- 2) Una segunda fase con edad en discusión entre Oligoceno Inferior y/o Mioceno Inferior (Charrier y otros, 1996) que explicaría la discordancia entre la Formación Coya-Machalí y la Formación Colimapu.

- 3) Una última fase en el Mioceno-Plioceno que genera un plegamiento débil en Farellones y que produce la discordancia con la Formación Colón-Coya.

Además, también pueden ser incluidas las fallas descritas por Charrier (1981) en el apartado anterior, ya que generarían intercalaciones de roca poco competente con la Formación Coya-Machalí.

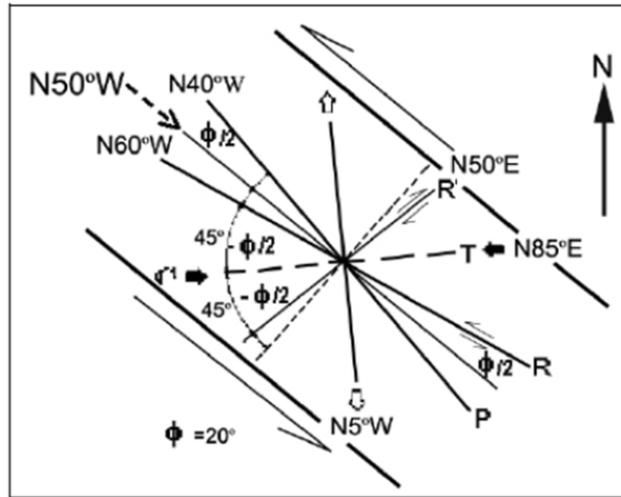


Figura 2.3: Estructuras tipo Riedel en zonas de transcurrancia sinistral de rumbo N50°W. Modificado de Falcón y Rivera (1998)

#### 2.4. Marco Geotectónico

Al este de la intersección de la dorsal y la fosa chilena se encuentran tres de los grandes depósitos nacionales: El Teniente, Río Blanco-Los Bronces y los Pelambres, en dicha zona se encuentra el segmento tectónico andino de bajo ángulo o *flat slab* (Figura 2.4), que se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica actual (Kurtz y otros, 1997).



Figura 2.4: La zona de Flat Slab divide la Zona Volcánica Central (ZVC) de la Zona Volcánica Sur (ZVS). Las líneas punteadas muestran las profundidades de la Zona de Benioff. También es posible observar la ubicación de los megayacimientos de cobre de esta zona. Modificada de Stern y Skewes, 1994 y 1995.

#### 2.4.1. Evolución Andina

La evolución del cordón montañoso de los Andes se produjo mediante dos ciclos orogénicos mayores: el ciclo pre-Andino, a finales del Paleozoico, caracterizado por la apertura de grandes cuencas; y el ciclo Andino (Mesozoico a Cenozoico). Éste último posee 5 etapas, de diferentes condiciones tectónicas que modifican la geografía de los Andes (Charrier et al., 1996):

Etapa 1 (Triásico Superior-Jurásico Inferior, 205 a 180 Ma): Se desarrolla un sistema de grabens con orientación NW-NNW.

Etapa 2 (Jurásico Inferior-Jurásico Superior, 180 a 135 Ma): Durante este periodo hubo un peak de magmatismo, lo que llevó a formar grandes intrusivos que se convertirían en lo que es la actual Cordillera de la Costa y parte de la Cordillera Principal. Además, a fines de este periodo se creó una cuenca de tras-arco.

Etapa 3 (Jurásico Superior-Cretácico Inferior, 135 a 95 Ma): En este período se formaron cuencas tanto de intra-arco como de tras-arco, ambos en y al este del arco volcánico, respectivamente.

Etapa 4 (Cretácico Superior-Terciario Inferior, 95 a 24 Ma): Se encuentra marcada por una fuerte sedimentación tanto continental como marina, para luego sufrir alta erosión.

Etapa 5 (Neógeno-Presente, 24 Ma): Desarrollo de dominios volcánicos y plutónicos muy diferentes entre sí.

Posteriormente, en el Mioceno Inferior, la corteza continental bajo la Cordillera de los Andes actual era delgada y además se encontraba en una subducción de inclinación extrema ( $>25^\circ$ ). Luego, en el Mioceno Medio-Plioceno Temprano, la zona de subducción disminuyó el ángulo, lo que hizo que la corteza se engrosara y alzara (Figura 2.5). Además, el descenso del ángulo no se hizo a la misma tasa en todo Chile. Al norte de los  $-33^\circ\text{N}$  fue más rápido y con mayor deformación que al sur de éste (Stern & Skewes, 1994 y 1995).

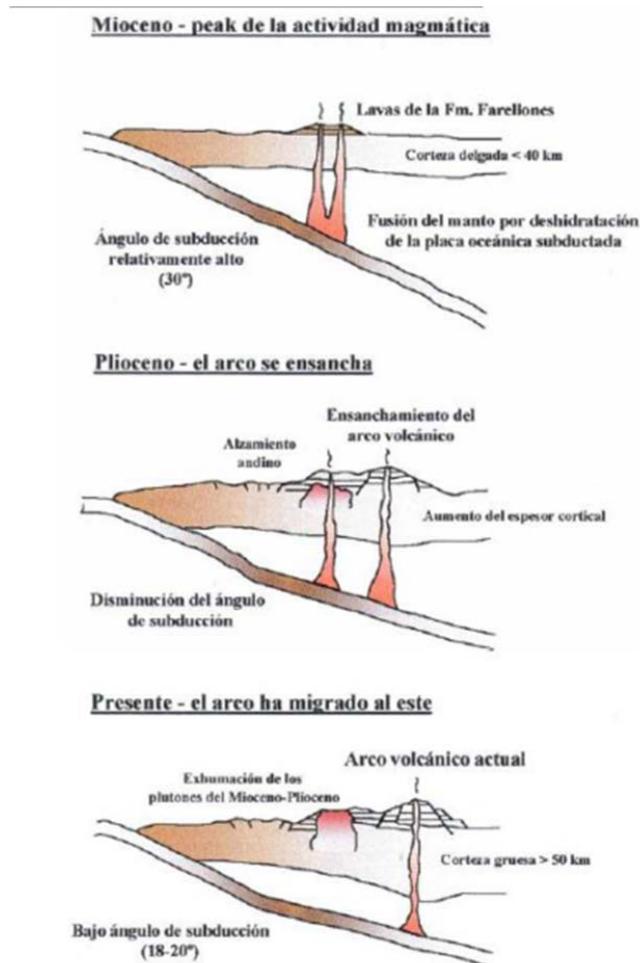


Figura 2.5: Evolución tectónica al sur de los  $-33^{\circ}$  desde el Mioceno hasta la actualidad. Modificado de Stern y Skewes (2005)

#### 2.4.2. Génesis de los mega depósitos de la Zona Central de Chile

El origen de estos depósitos se debería a la disminución del ángulo de subducción, que llevó a un engrosamiento cortical y alzamiento en el Mioceno Medio, lo que a su vez hizo que los grandes plutones ascendieran comparativamente con la superficie, lo que produjo una liberación de fluidos magmáticos ricos en metales, particularmente cobre, que al enfriarse originaron grandes mineralizaciones de tipo pórfido cuprífero (Skewes & Stern, 1995). La disminución hacia el sur en la edad de los yacimientos de la zona central, muestra que existe un vínculo genético con la migración del foco de subducción de la Dorsal de Juan Fernández (Stern y Skewes, 1997).

## 2.5. Geología del Yacimiento El Teniente

El Teniente es un mega yacimiento hipógeno de cobre molibdeno, que posee una producción histórica de 12.5 Mton y con recursos estimados de 75 Mton (Skewes et al., 2002). Sus leyes de Cu y Mo son 0,63 y 0,02%, respectivamente. Corresponde a la mayor concentración de cobre en la corteza terrestre (Sillitoe y Perelló, 2005), alojándose principalmente en calcopirita, bornita y molibdenita. Además, el yacimiento presenta enriquecimiento secundario rico en calcosina (Cuadra, 1986). Se encuentra alojado en rocas intrusivas, piroclásticas, volcánicas y subvolcánicas, que pertenecen a la Formación Farellones, de edad Miocena Media a Miocena Superior (Camus, 1975 y Cuadra, 1986)

La génesis del yacimiento se debería a eventos continuos de deformación, intrusión, mineralización y alteración, que ocurrió en un lapso menor a 5,3 Ma y donde la generación de metales rentables ocurrió en un período menor a los 1,2 Ma (Maksaev, 2002; Maksaev, 2004; Canell et al., 2005).

Maksaev y otros (2004), consideran que el Teniente es un yacimiento de tipo pórfido cuprífero que se formó a partir de los distintos episodios de intrusión de magmas félsicos, asociados a alteración hidrotermal. Skewes et al. (2002), propone que el yacimiento sería realmente una megabrecha, que se origina por la exsolución violenta de fluidos magmáticos y que la formación de vetas tardías generaría una alteración sericítica que ayudaría a la concentración de Cu.

El tipo de mineralización predominante corresponde a un enrejado de vetillas o *stockwork* (70%) en rocas máficas, la que presenta la forma de un cuerpo elíptico en planta (Figura 2.6). El 30% restante, corresponde a cobre como cemento en los distintos cuerpos de brecha o como matriz en los intrusivos félsicos. En la parte central del yacimiento, se ubica la Brecha Braden, que muestra una forma de cono invertido y que dependiendo del sector pertenece a un tipo de brecha distinto, siendo notoriamente la Brecha de turmalina la más abundante.

En lo que respecta a los sistemas estructurales, la mina presenta tres sistemas con orientación preferenciales: NS, NE y NNW, donde la última es la de mayor extensión y que pone en contacto unidades distintas de rocas.

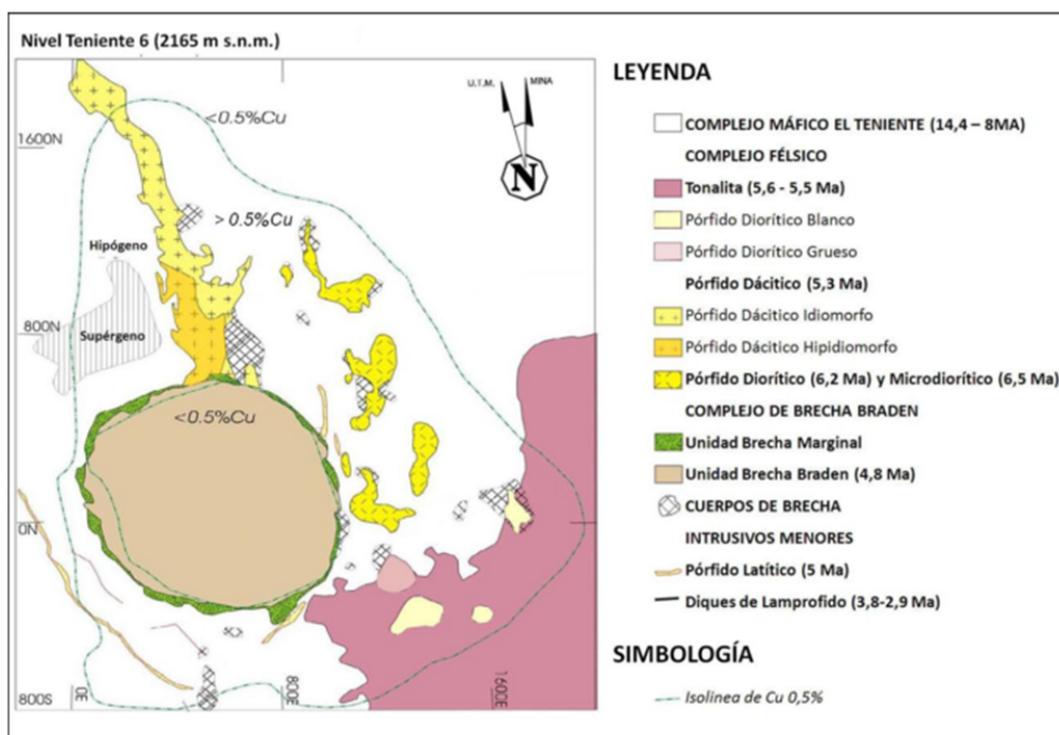


Figura 2.6: Límite de la ley de Cobre de 0,5%. Dentro de esa franja se concentran los enrejados de vetillas o stockword. La imagen corresponde al Nivel 6 de El Teniente (2165 m).

### 2.5.1. Litología

En superficie la Formación dominante, en el distrito, corresponde a Farellones, la que se encuentra intruida por rocas ígneas intermedias (Kay y otros, 1999) mientras que en la zona del yacimiento, dicha formación lo es por el Complejo Máfico El Teniente (CMET) y por cuerpos de composición félsica (Ossandon, 1974; Camus, 1975; Skewes, 2000). Además, se reconocen brechas ígneas y magmático-hidrotermales en los contactos entre los diversos cuerpos intrusivos con el CMET. La Brecha Braden, el último evento del yacimiento, corta a los intrusivos anteriores (Camus, 1975). Por último, existen estructuras de menor tamaño como diques y vetas que cortan a todas las estructuras nombradas anteriormente (Cuadra, 1986; Skewes y otros, 2002).

#### 2.5.1.1. Complejo Máfico El Teniente (CMET)

Llamadas anteriormente como “Andesitas de la mina” y renombradas por Skewes y otros (2002) al observar que no solo contenía rocas volcánicas. Es la unidad más extensa y que alberga casi la totalidad de la mineralización en forma de *stockword*.

Agrupación de rocas de color pardo a negro de composición básica como: gabros, diabasas, basaltos, pórfidos basálticos y brechas de biotita (Burgos, 2002; Skewes y otros, 2002). Posee verticalmente forma de lacolito, de aproximadamente 2 km (Skewes y Arévalo, 1997; Munizaga y otros, 2002).

Entre los minerales de este complejo destacan: plagioclasa, relictos de piroxeno y biotita por alteración potásica, esto último es lo que le da el color oscuro a la roca (Burgos, 2002; Villalobos, 1975). Su textura varía de afanítica a porfídica con fenocristales de plagioclasa (Cuadra, 1986), esto último es lo que hacía anteriormente que esta unidad fuera llamada como andesitas de la mina. El tamaño de grano estaría determinado por la ubicación con respecto a los intrusivos, aumentando hacia el centro de éstos.

La roca original se encuentra obliterada por la alteración, sin embargo, es posible reconocer algunos minerales como: biotita, cuarzo, anhidrita, sericita, actinolita, clorita y turmalina (Skewes, 2002).

#### 2.5.1.2. Complejos Félsicos

Corresponde a intrusivos de edades desde el Mioceno al Plioceno. Presentan formas subverticales, por lo que se asocian a stocks, apófisis o diques provenientes de intrusivos de mayor tamaño en profundidad. Presentan afinidad calcoalcalina y contenidos de SiO<sub>2</sub> mayores al 56% (Rabbia, Reich, Hernandez., & King, 2000)

Las litologías que comprenden este complejo se encuentran definidos por los “Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003” (referencia interna SGL-I-123/2003). La textura de éstas se pueden observar en la Figura 2.7.

##### 2.5.1.2.1. Pórfido Dacítico

Anteriormente denominado como Pórfido Teniente, Dacita Porfídica o Dacita (Cuadra, 1986; Rojas, 2002; Skewes y otros, 2002). Son cuerpos tabulares y subverticales que intruyen al CMET de manera N-S a NNW al norte del yacimiento. Posee una longitud de 1500 m y una potencia que va desde los 50 m en superficie a 300

m en el nivel Ten-8 (Figura 2.2). Además, su zona sur se encuentra truncada por la Brecha Braden, lo que genera una brecha con matriz de Turmalina y clastos del pórfido.

Su color es gris claro a blanco, posee fenocristales de oligoclasa, biotita y algunos cuarzos (Cuadra, 1986) lo que indica que es una roca rica en feldespato alcalino pero pobre en sílice. Presenta dos texturas: porfídica idiomorfa y porfídica hipidiomorfa, en las zonas de contacto y centrales, respectivamente.

El emplazamiento de esta unidad se encuentra asociado al principal evento mineralizador (Ojeda y otros, 1980). Mediante el método de U/Pb en circones, se infiere una edad de cristalización en  $5,28 \pm 0,10$  Ma (Maksaev y otros, 2004). Cuadra (1986) le asignó una edad de emplazamiento de 4.6 a 4.7 Ma a esta unidad.

#### 2.5.1.2.2. Tonalita

Antiguamente conocida como Diorita Sewell (Skewes et al., 2002). Es un cuerpo de gran área (200 m<sup>2</sup>) que intruye en forma de stock al CMET en la zona SE del yacimiento (Faunes, 1981).

Posee un color gris claro. La textura varía dependiendo del sector del intrusivo, siendo porfídico en las zonas distales y fanerítico en el centro de éste. Presenta alteración cuarzo-sericita-clorita fuerte en la totalidad del intrusivo (Cuadra, 1986). Es de carácter calcoalcalino y su porcentaje de SiO<sub>2</sub> varía entre 63,6% y 64,2% (Rabbia et al., 2000; Reich, 2001).

Su edad, según Cuadra (1986) y datada mediante K/Ar, es de  $7,1 \pm 1,0$  Ma; mientras que Maksaev (2004) mediante  $40 \text{ Ar}/39 \text{ Ar}$  le asignó una edad de  $5,47 \pm 0,12$  Ma.

#### 2.5.1.2.3. 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, fílica 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.

#### 2.5.1.2.4. Pórfido Microdiorítico

Antiguamente denominado como Pórfido A (Spröhnle, 1990). Se ubica en el sector centro-este del yacimiento. Corresponde a una diorita de grano fino, con xenolitos de andesita y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994). Se encuentra en contacto por intrusión tanto como con la Tonalita como con el CMET (Figura 9), lo que genera brechas ígneas e hidrotermales, las que poseen leyes altas de cobre.

La edad de cristalización, datada mediante U/Pb en circones, corresponde a  $6,46 \pm 0,11$  Ma (Maksaev et al., 2004).

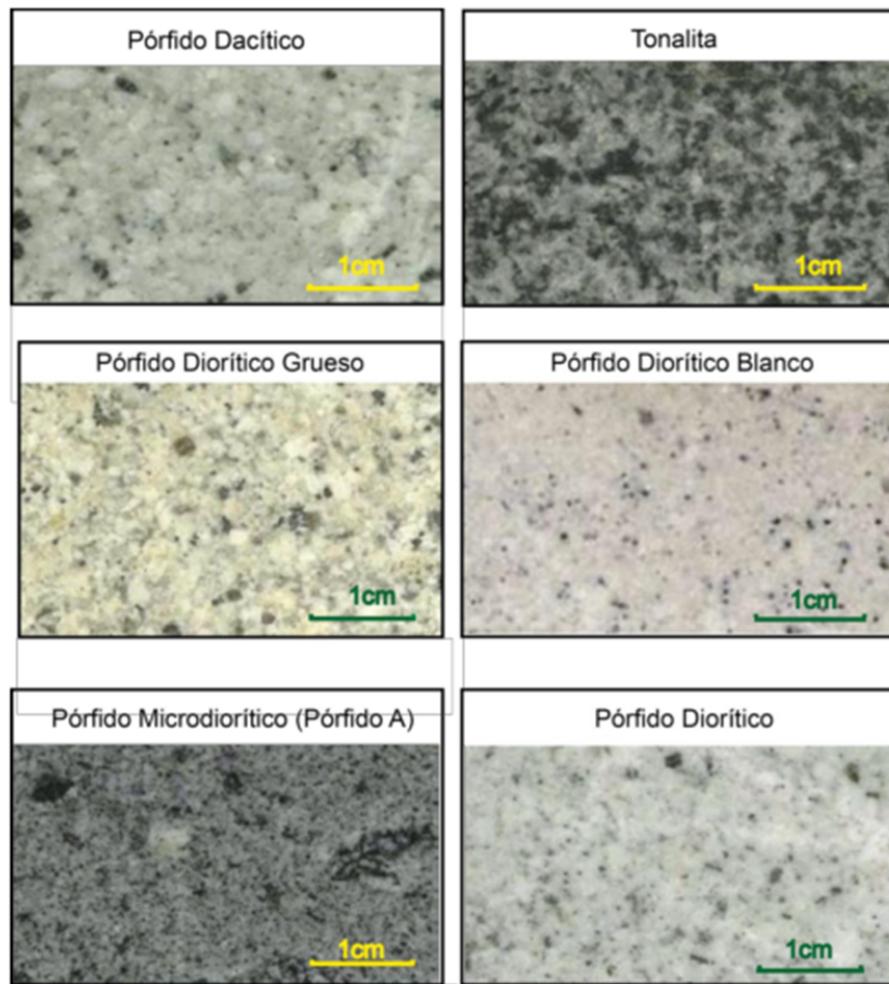


Figura 2.7: Fotomicrografías de las unidades pertenecientes al Complejo Félsico de El Teniente (Referencia interna SGL-I-123/2003)

### 2.5.1.3. 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.

#### 2.5.1.3.1. Unidad Brecha Braden

Es la unidad central del complejo. Posee fragmentos redondeados a sub angulosos de mala selección. Sus fragmentos corresponden a los intrusivos que son cortados por la brecha: andesita, diorita, dacita y latita. Su matriz está compuesta por polvo de roca y posee cemento de sericita con cantidades menores de turmalina, calcita y pirita. Es una unidad de baja ley y baja estructuras mayores.

#### 2.5.1.3.2. Unidad Brecha Marginal

Rodea a la unidad Brecha Braden como un anillo de 50 m a 60 m en superficie, pero que disminuye en profundidad (Cuadra, 1986). Sus fragmentos son angulosos a sub angulosos de composición polimíctica y que se encuentran cementados mayoritariamente por turmalina y cuarzo, con cantidades menores de anhidrita, yeso, carbonatos y sulfuros. Presenta un contacto gradual con la otra unidad, lo que se reconoce por la variación porcentual de turmalina (Ojeda et al., 1980). A diferencia de la otra brecha, sí posee menas, principalmente calcopirita, bornita, tenantita-tetraedrita. Posee baja cantidad de estructuras mayores.

#### 2.5.1.4. Cuerpos de Brecha

Arredondo (1994) distinguió diferentes brechas en función del contenido de su matriz, las que se observan en la Figura 2.8.

##### 2.5.1.4.1. Brechas de Anhidrita

Se encuentra en el sector NE y SE del yacimiento. Posee fragmentos máficos y félsicos con alteración, mayoritariamente de tipo sericítica. Presenta leyes de cobre mayor que las litologías que la rodean.

##### 2.5.1.4.2. Brechas de Turmalina

Se encuentra principalmente al norte de la Brecha Braden. Es polimíctica, donde los fragmentos félsicos se asocian a las etapas de mineralización tardi-magmática e hidrotermal principal; mientras que los máficos se encontrarían relacionados con la etapa hidrotermal tardía.

#### 2.5.1.4.3. Brechas de Biotita

Se encuentra en las zonas hipógenas del yacimiento, en los alrededores de la Pipa Braden. Es polimíctica, con alteración biotítica, que en el caso de los fragmentos máficos existe un reemplazo total por ésta, lo que estaría asociado con la infiltración de vetillas de biotita (Skewes, 1999 y Skewes, 2000). Su cemento puede contener: plagioclasas, cuarzo, bornita-calcopirita, anhidrita y yeso.

#### 2.5.1.4.4. Brechas Ígneas

Se ubica en los contactos de CMET con los intrusivos félsicos. Los clastos son predominantemente silíceos, su matriz de biotita y el cemento puede ser anhidrita, cuarzo y feldespatos.

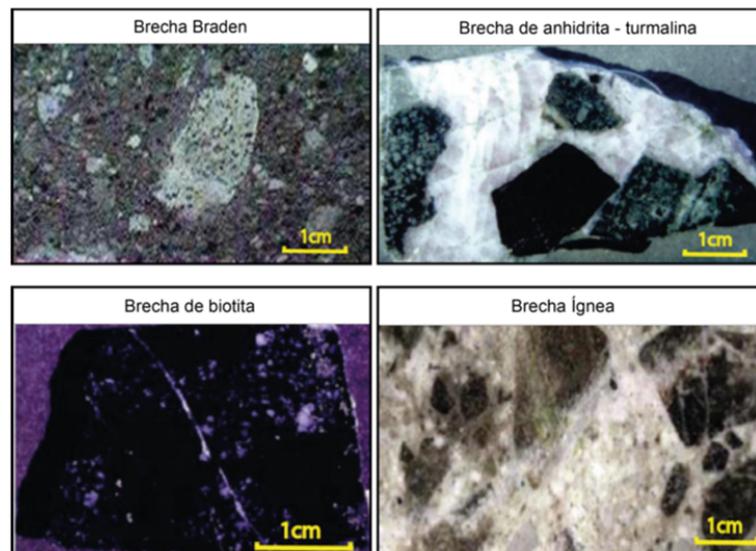


Figura 2.8: Fotografías de las diferentes unidades del Complejo de Brechas El Teniente (Skewes, 2004)

#### 2.5.1.5. Intrusivos Menores

Corresponde a unidades estériles y de menor volumen. Su origen está relacionado con los últimos eventos reconocidos en el yacimiento.

#### 2.5.1.5.1. Pórfido Latítico

Definida inicialmente como latita porfídica (Howell y Molloy, 1960). Son diques de poca potencia y anulares con respecto a la Brecha Braden. Son cuerpos irregulares, brechizados y discontinuos. Los fenocristales de mayor presencia son feldespato y biotita. La edad, según Makshev y Munizaga (2000), indica  $4,82 \pm 0,09$  Ma. Dichos valores muestran que sería anterior a la Brecha Braden (Riveros, 1991).

#### 2.5.1.5.2. 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).

#### 2.5.1.5.3. Diques de Cuarzo y Anhidrita

Se encuentran en abundancia en la zona norte y oeste del yacimiento. Su potencia varía de 10 cm a 3 m, con manteos subverticales. No presentan halos de alteración y sus contactos son bien definidos (Brzovic, 1996; Morales y Pereira, 1996).

#### 2.5.1.5.4. Diques de Andesita

Corta a la Tonalita en la parte sur de ésta. Es un cuerpo tabular, con potencia de 0,5 a 1 m. Es de color gris a negro y textura porfídica.

En la Figura 2.9 se muestran las litologías del yacimiento en el nivel TEN-6, en la cota 2165.

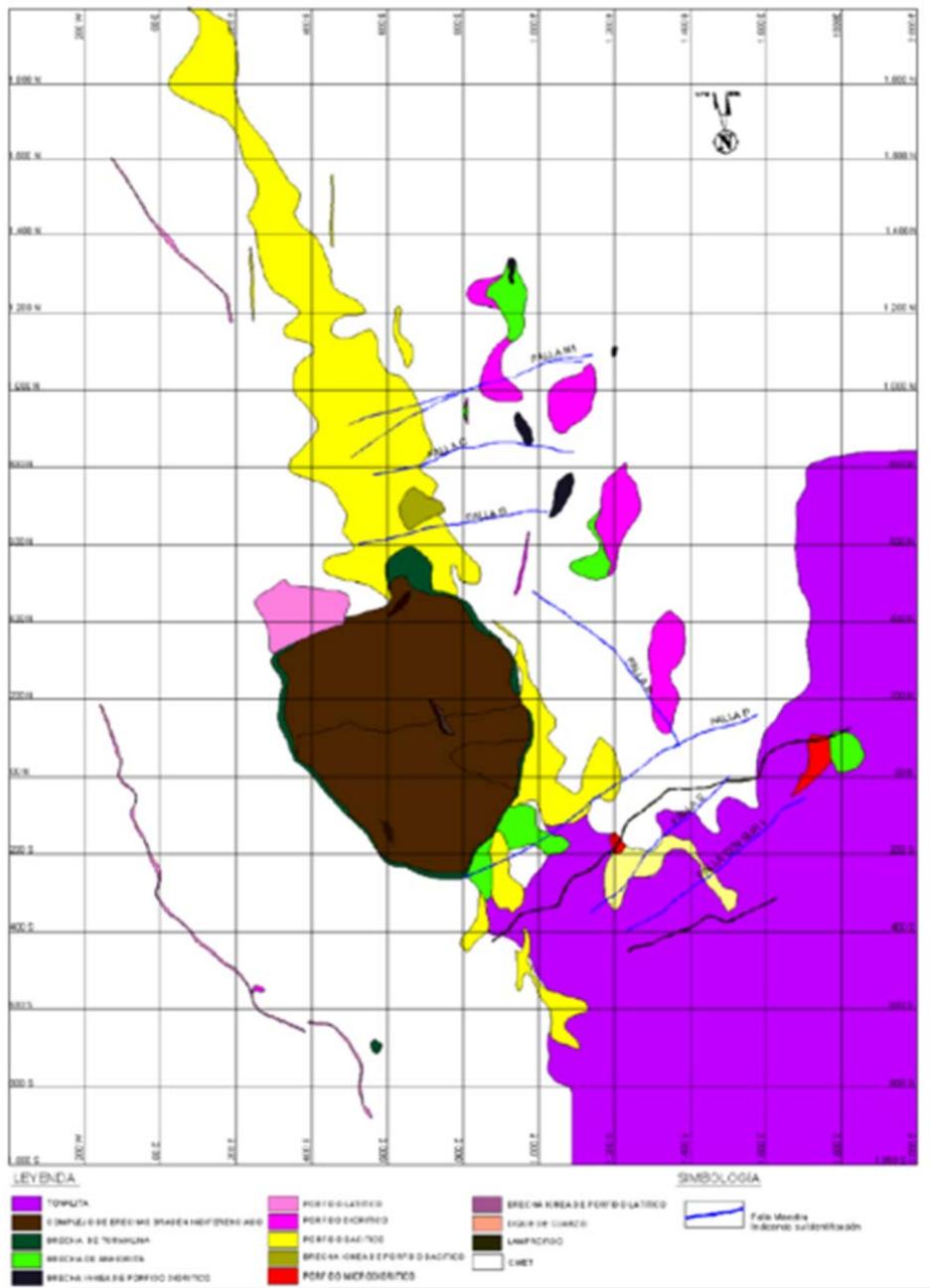


Figura 2.9: Unidades litológicas de mayor tamaño en el nivel 6 de El Teniente. Tomado de plano de “Orientaciones Preferenciales” confeccionado por la Superintendencia de Geología de la División El Teniente.

### 2.5.2. Geología Estructural

Existen tres sistemas estructurales preferenciales. El primero, de un largo distrital, de orientación NNW, que controla fallas menores, contactos y geometría de vetas y vetillas. Los restantes sistemas, son de menor tamaño y orientación NS y NE.

De acuerdo a Garrido (1995), el yacimiento se ubica en una zona de cizalle, de orientación  $N65^{\circ}E$  denominada Zona de Falla El Teniente (ZFT). Ésta se encuentra caracterizada por tres dominios estructurales, los que se definen como zonas de mayor frecuencia relativa de fallas, constituidos en su mayoría por estructuras de rumbo subvertical.

La ZFT posee una extensión de 14 km y un ancho de 3 km, está limitado al norte por la Quebrada Teniente y al sur por la falla Amarga (Figura 2.10). Dentro de la zona que cubre la falla, las estructuras se comportan de manera distinta a las reconocidas en el entorno, independiente sobre la litología que actúen. Éstas se encontrarían activas antes, durante y después de la formación del yacimiento, además, serían las responsables del emplazamiento de la Brecha Braden (Garrido, 1992).

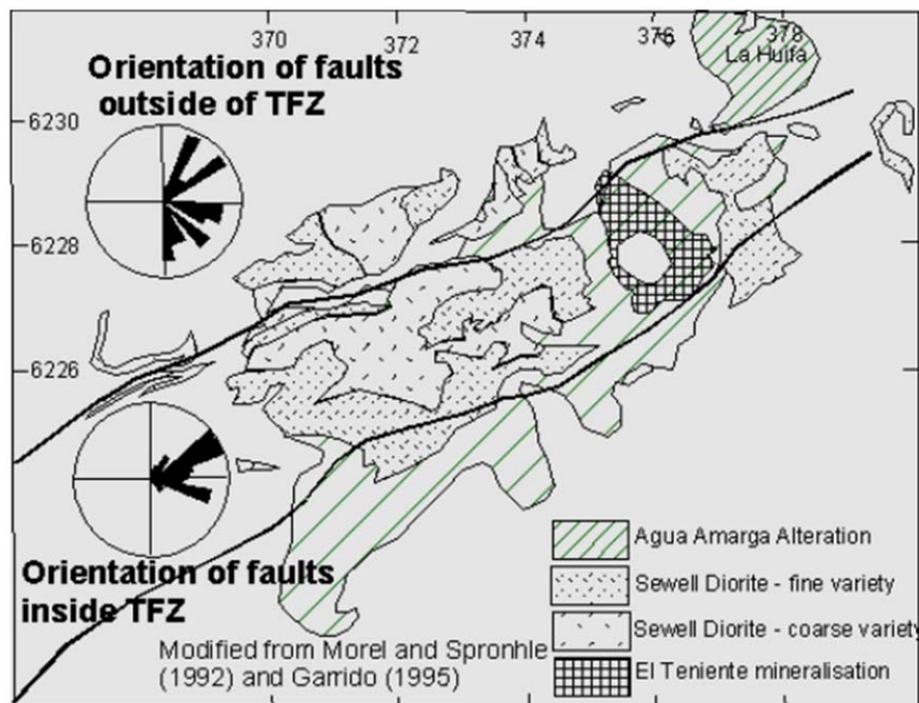


Figura 2.10: Zona de Falla El Teniente (TFZ) y su relación con las litologías. La TFZ controla el comportamiento de las estructuras. Imagen modificada de Garrido (1995).

El emplazamiento de la Brecha Braden, al ser violenta, generó fracturas en la roca caja e intrusivos, donde luego se hospedaría gran parte de la mineralización en forma de *stockwork*. Además, muchas de las estructuras generadas por la brecha son radiales a ella dentro del área cercana.

En El Teniente, las estructuras pueden ser clasificadas según su continuidad (Tabla 1) y relleno (ver apartado 2.5.3).

Tabla 1: Clasificación de estructuras en mina El Teniente

Tipo de estructuras	Continuidad	Espesor Típico	Ejemplo
Distritales	>1 km	>1 m	ZFT
Maestras	>500 m	Entre 5 y 120 cm	Fallas Mina
Mayores	>100 m	> 7 mm	Diques
Intermedias	>4 m y <100 m	<5 mm	Lamprofido
Menores	<4 m	<2 mm	Vetas

La mena primaria en promedio posee un largo menor a 4 metros, suelen estar selladas, formando un *stockwork* y cortan a las estructuras mayores. Mientras que la mena secundaria, se ubica en las partes altas del yacimiento, por lo que ha estado expuesta al ambiente, sufriendo lixiviación y pérdida del sello de la estructura.

### 2.5.3. Alteración y mineralización

La mineralización se debe a una secuencia y superposición de eventos de alteración. Existen dos fases generadoras de minerales: una hipógena que se divide en tres sub-etapas y una supérgena. Ambas, relacionadas a la intrusión de los cuerpos diorítico, dacítico y Brecha Braden (Howell y Molloy, 1960). Las vetillas generadas por alteración pueden ser divididas en: Tardimagmáticas, Principales y Tardías. En la Figura 2.11, se observa la distribución de mineralogía, origen y tipo de mena en los distintos niveles de la mina.

#### 2.5.3.1. 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).

#### 2.5.3.2. Etapa Hidrotermal Principal

Este evento se sobreimpone al anterior y se produce por la reacción de fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. La alteración típica asociada corresponde a la de tipo fílica, la cual oblitera la mineralogía y texturas preexistentes (Ojeda et al., 1980). La mineralización corresponde a: calcopirita, pirita, bornita y molibdenita, que se distribuye tanto en vetillas como, escasamente, en halos de alteración (Zuñiga, 1982). Las vetillas principales son de cuarzo, anhidrita y calcopirita. Además, las vetillas hidrotermales principales o HP se asocian a esta etapa.

En el CMET la mineralogía se reemplaza casi completamente por cuarzo-sericita, aunque también existe sustitución por anhidrita y clorita, que se forman a partir de la biotita tardimagmática y de los feldespatos de este complejo.

#### 2.5.3.3. Etapa Hidrotermal Tardía

Su origen está relacionado a la Unidad de Brecha Marginal, que es la zona externa del complejo de la Brecha Braden (Villalobos, 1975). La alteración predominante es cuarzo-sericita en los fragmentos de la brecha; relleno de anhidrita, yeso, turmalina en vetas; y halos de alteración calcita-clorita-cuarzo-sericita. La mineralogía consiste en calcopirita, pirita y molibdenita (Zuñiga, 1982), que se distribuye de manera concéntrica a las brechas. Arévalo y otros (1998), dividen esta etapa de acuerdo al contenido de Turmalina, en que la penetrabilidad es máxima a mayor contenida de ésta.

#### 2.5.3.4. Etapa Póstuma

Última etapa hipógena que está asociada a la consolidación de la Brecha Braden. La alteración asociada al cemento corresponde a calcita, pirita y sericita; mientras que la asociación de los clastos corresponde solamente a sericita. Esta etapa está marcada por la presencia de minerales de baja temperatura como: ankerita, anhidrita, baritina, blenda, cuarzo, galena, turmalina y yeso, las que rellenan estructuras (Ojeda et al., 1980). La mineralización hipógena se encuentra completamente en vetas y corresponde a calcopirita, pirita, tenantita-tetraedrita, molibdenita y galena-esfeno.

#### 2.5.3.5. Etapa Supérgena

Se encuentra en las partes altas del yacimiento y se formó debido al contacto con el ambiente, lo que provocó una lixiviación de minerales, que dejó una elipse de alteración de aproximadamente 15 km<sup>2</sup> (Camus, 1974; Ojeda y otros, 1980), que coincide con las zonas de enriquecimiento secundario y sigue el borde de la Brecha Braden y del Pórfido Dacítico (Floody y Huete, 1998).

Los minerales de alteración corresponden a caolinita mayoritaria y una cantidad menor de montmorillonita, alunita y sericita. La mineralización se formó a partir del reemplazo total de sulfuros, no obstante, este proceso fue gradual y selectivo, siendo en primera instancia reemplazada la bornita y luego la calcopirita, para formar calcosina y covelina. Durante la lixiviación la pirita no fue alterada (Álvarez, 1990). La edad del evento sucedió entre los 5,3 a 4,7 Ma (Cuadra, 1986 y Maksaev et al., 2001).

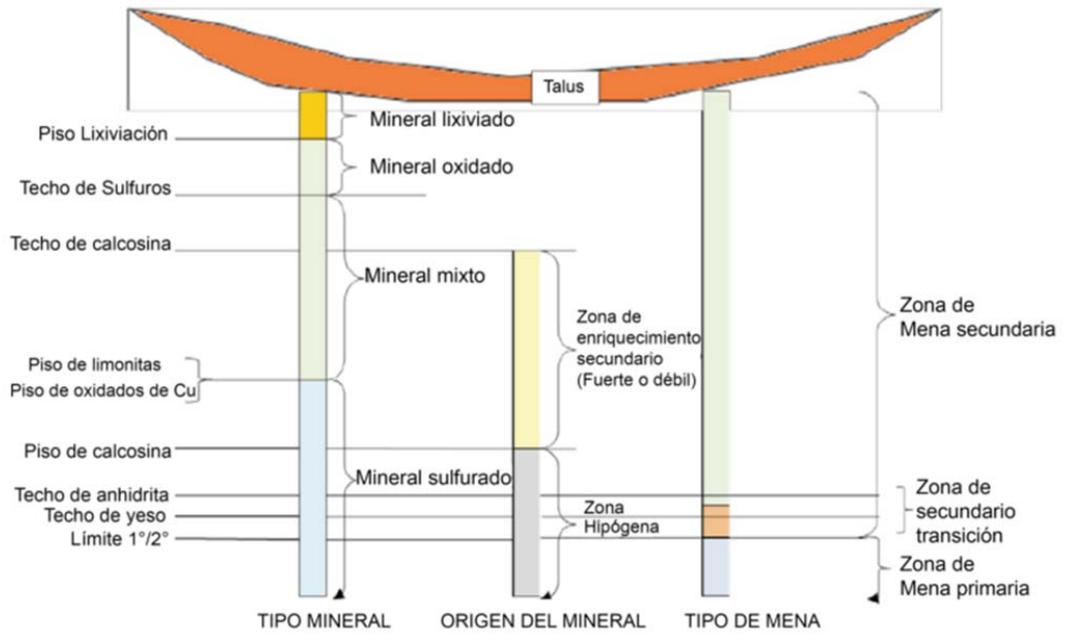


Figura 2.11: Perfil de enriquecimiento secundario dentro de la mina. Contienen el tipo de mineral, su origen y a que mena se encuentran asociada (Referencia interna, SGL-I-123/2003)

### 3. Metodología

#### 3.1. Obtención de datos

Debido al esquema de trabajo existente en El Teniente, es posible separar los datos en dos tipos: uno que presenta carácter discontinuo o puntual, que corresponde al mapeo directo en galería, y otro que contiene un carácter interpretativo o continuo, basado en la extensión de las estructuras puntuales.

##### 3.1.1. Datos discontinuos

Han sido obtenidos desde la base de datos del software *Xilab*, la que contiene los mapeos de estructuras de las diversas minas de El Teniente. Cada punto contiene información acerca del tipo de estructura, planaridad, dip, dip dir, espesor típico, espesor máximo, espesor mínimo, relleno y abundancia de éste. Además, es posible obtener la litología; sin embargo, ésta no está asociada a un punto en particular sino a un conjunto de éstos.

##### 3.1.1.1. Filtro en base a clasificación de Push

La base de datos presenta todos los mapeos de la zona, incluyendo estructuras menores como vetillas o vetas, sin embargo, debido a que estas fueron generadas en un evento diferente (Zúñiga, 1982), no son útiles para análisis de densidad de estructuras, por lo que es necesario aplicar un filtro previo en base a la clasificación propuesta por Push (1994), la cual consiste en que las mismas deben poseer un espesor típico de al menos 7 mm y una continuidad mayor a 100 m (Tabla 1).

Tabla 2: Clasificación de Estructuras Geológicas Yacimiento El Teniente según Push (1994)

Tipo de estructura	Continuidad	Espesor Típico
Distrital	>1 km	>1m
Maestra	>500 m	Entre 5 y 100 cm
Mayor	> 100m	> 7mm
Intermedia	>4 y >100 m	<5 mm
Menor	> 4 m	< 2 mm

### 3.1.1.2. Filtro en base a tipo de estructura

Dentro de las estructuras mayores es posible encontrar distintos tipos según su relleno o mineralogía, lo que a su vez indica su temporalidad (Vry et al., 2010). Debido a esto, se han dividido los mapeos según su relleno en hidrotermal principal (HP), hidrotermal tardía (HT) o Tardimagmática (TM).

### 3.1.2. Datos Continuos

Se obtienen a partir de los planos realizados por la Superintendencia de Geología de la División El Teniente, para los niveles de producción y hundimiento de los sectores Esmeralda (Referencia interna: GL91-0670) y Sub 6 (Referencia interna: GL91-04649). Además, se descartan las estructuras catalogadas como proyectadas, pues ellas son generadas debido a su ocurrencia en niveles superiores (Teniente Sub 4) mas, no vistas por falta de mapeo en los niveles actuales.

## 3.2. Comparación de estructuras mapeadas entre ambos niveles

La diferencia de cota entre los niveles de producción y hundimiento es de 17 metros, por lo que es esperable que las estructuras mayores mapeadas no varíen ni en características ni en orientación entre ambos niveles. Para comprobar la premisa anterior, se realiza una comparación de orientación y características estructurales entre los diferentes dominios

### 3.2.1. Comparación de orientación entre ambos niveles

Se desarrolla mediante la comparación de grillas dip vs dip dir generadas por el programa *Matlab*, con el fin de observar si se presentan las mismas familias de orientación, esto es visible incluso a pesar de que dos niveles puedan poseer distinta cantidad de estructuras, pues está dirigida a cumplir un criterio cualitativo de distribución de orientaciones y no de densidad de ellas (Figura 3.1)

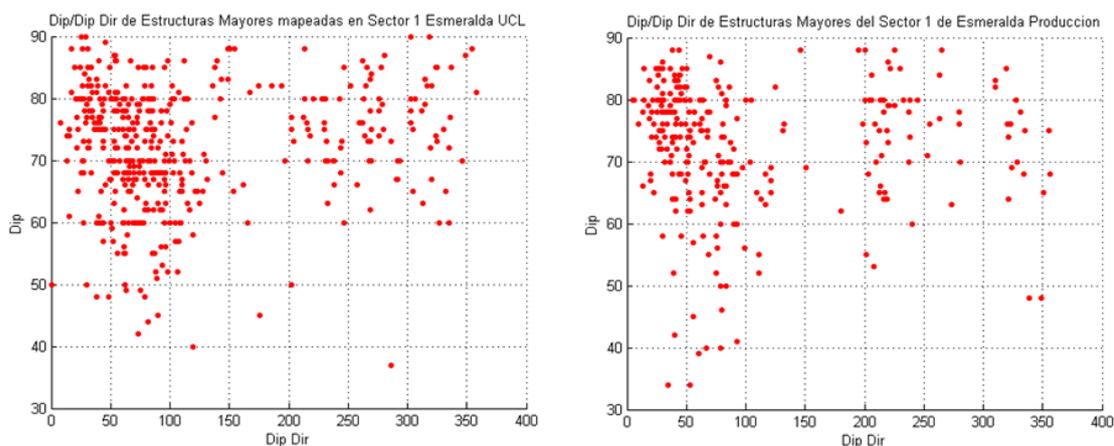


Figura 3.1: Comparación de familias de estructuras en Esmeralda. La figura de la izquierda se ve con mayor densidad, esto se debe a que presenta 441 estructuras, mientras que la de la derecha solo 286. Sin embargo, siguen siendo visibles las 3 familias de orientación (Dip Dir: 0-90/200-270/300-360).

### 3.2.2. Comparación de características estructurales entre ambos niveles

La Constante de Fisher (K) es el grado de dispersión de un set con  $n$  discontinuidades (Fisher, 1953). Dicha constante suele ser expresada de manera porcentual y es utilizada para medir la consistencia en un set de estructuras mediante el software *Dips* y, al igual que la prueba anterior, es independiente si poseen una cantidad distinta de estructuras.

También se realiza una comparación de la distribución y frecuencia de espesores típicos mapeados entre los niveles de producción y hundimiento en un mismo dominio estructural.

### 3.3. Comparación de estructuras interpretadas entre ambos niveles

Para evaluar la interpretación se unen las estructuras de los planos de hundimiento y producción en uno solo, pero diferenciando con distintos colores las estructuras de cada nivel. De manera secundaria es posible observar aquellas zonas que poseen menor mapeo, comparativamente, en los niveles, pues la interpretación no es otra cosa que la extensión de estructuras discontinuas.

### 3.4. Método de los círculos

Este método, desarrollado por Schachter (2013), consiste en evaluar tanto valores continuos como discontinuos, en un determinado radio (R) a partir de cierto centro (X,Y), para luego poder caracterizar un sector en función de múltiples círculos que cubran el área. Es importante notar que el tamaño del radio R puede hacer variar fuertemente las caracterizaciones por lo que es necesario determinar un valor óptimo antes de realizar cualquier cálculo.

#### 3.4.1. Círculo óptimo

Debido a que algunos valores son dependientes del valor de R, es necesario obtener un radio a partir del cual los valores de densidad sean similares con respecto al aumento de éste. Para esto se escogieron al azar 11 pares de (X,Y) en el plano de Esmeralda y ReNo, posteriormente se crearon 10 círculos concéntricos con diferencia de radio de 10 metros entre sí con respecto a dichos centros (Figura 3.2a). Además, para controlar que no hubieran cambios bruscos por particularidades dentro de las figuras, se crearon 4 círculos de radio de 50 metros, ubicados con centro a 50 metros de diferencia de los centros (X, Y) elegidos al azar anteriormente (Figura 3.2b)

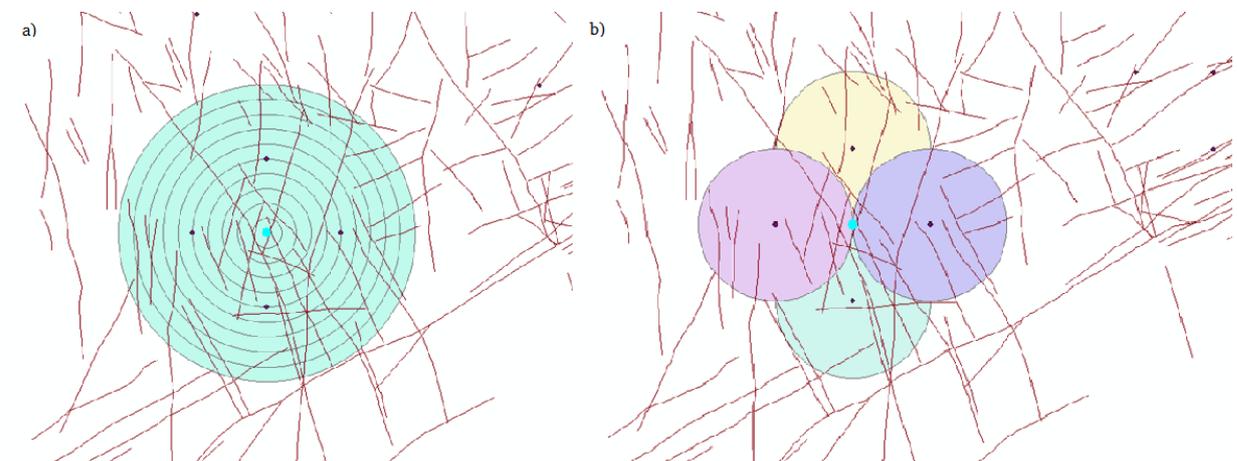


Figura 3.2: Círculos concéntricos con diferencia de 10 metros entre cada uno de ellos. Figura 3.2b: Círculos de radio 50 metros con centro ubicado a 50 metros del centro del círculo de radio 100 metros.

### 3.4.2. Medición de largo de estructuras interpretadas (l)

Mediante la función *buffer* del programa *ArcMap* se generan círculos a partir de un determinado centro y radio, luego con la función *intersect* es posible determinar las estructuras interpretadas que entran en dichos círculos, ya que el programa intercepta las “líneas” (estructuras) con los círculos creados. Posteriormente se mide el largo de éstas líneas (l), ya que es un parámetro necesario para el cálculo de densidad de estructuras.

### 3.4.3. Medición del largo de las labores (L)

El proceso es similar a la medición del largo de estructuras (l), con la diferencia de que se interceptan los círculos con los mapas de labores mineros en vez del mapa de estructuras interpretadas. El valor L se calcula como:

$$L = \frac{\text{Largo medido}}{2} [\text{m}]$$

Esto debido a que la función *intersect* de *ArcMap* entrega un valor de todas las trazas que intercepta el círculo y dado que cada túnel posee dos paredes (en dos dimensiones) es necesario dividir por la mitad para obtener el metraje real. Esta medición es necesaria para calcular la densidad de mapeos realizados y así poder dar validez al cálculo del P21

### 3.4.4. Cálculo de mapeos dentro de un círculo (n)

Desde el software *Xilab* se pueden exportar las trazas de las estructuras como una composición de distintos vértices (x,y). Luego mediante el programa *Matlab*, es posible obtener cuáles de estos vértices entran en los círculos de radio R y centro (X,Y), siempre que cumplan con la función:

$$(X - x)^2 + (Y - y)^2 < R^2$$

Posteriormente es necesario aplicar un filtro, ya que distintos (x,y) pueden estar asociado a la misma traza de una estructura aumentando el valor de mapeos dentro de un círculo.

### 3.4.5. Cálculo de espesores dentro de un círculo ( $\epsilon$ )

A través del software *Fracman*, es posible generar desde la representación bidimensional de estructuras un arreglo tridimensional de éstas. Luego se genera un plano que al interceptar las estructuras proyectadas permite ver la distribución de espesores, además, existe la opción de visualizar nuevas distribuciones en radios determinados.

Paralelamente al proceso anterior, se determinan los espesores típicos a partir de los vértices (x,y) calculados en el punto 3.4.4 para comparar entre distribución de espesores de estructuras proyectadas y estructuras mapeadas.

### 3.5. Cálculos de P21 o estructuras interpretadas

El P21 es un valor de densidad que se define como el largo de las estructuras en un área determinada independiente de cuanto haya sido posible observar dentro de ella (Warburton, 1980). Se calcula como:

$$P21 = \frac{\sum l}{\pi R^2} \left[ \frac{m}{m^2} \right]$$

Donde l es el largo total de las estructuras dentro de un círculo (medido en 3.4.2) con radio R óptimo (obtenido en 3.4.1)

### 3.6. Cálculo de densidad de mapeo o de estructuras proyectadas ( $\delta$ )

La densidad de mapeo ( $\delta$ ) es un valor que indica la cantidad de los mismos realizados en un área o metraje determinado, debido a que las estructuras proyectadas dependen de la cantidad de mapeos realizados, estos valores pueden considerarse como iguales. Dependiendo de la dimensión deseada puede ser calculada como:

$$\delta = \frac{n}{L} \left[ \frac{\text{estructuras}}{m} \right] \text{ (1 dimensión)}$$

$$\delta = \frac{n}{\pi R^2} \left[ \frac{\text{estructuras}}{m^2} \right] \text{ (2 dimensiones)}$$

Donde n son las estructuras mapeadas dentro del círculo (calculadas en 4.4.4), L es el largo de las labores (medidas en 4.4.3) y R el radio del círculo (obtenido en 4.4.1). Para este trabajo se utilizó la densidad en dos dimensiones.

### 3.7. Cálculo de estándar de densidad de mapeo

La densidad de mapeo ( $\delta$ ) puede ser usada para validar otros parámetros que estén relacionados secundariamente con el número de mapeos ( $n$ ), por ejemplo, el cálculo de P21 incluye el largo total de las estructuras ( $l$ ), el cual no está directamente relacionado con  $n$ , sin embargo, a mayor número de mapeos en un área determinada, es decir, densidad de mapeo, crece la certeza, con que se pueden interpretar las estructuras y por lo mismo, el valor de P21 es más confiable. Es por esta razón que es importante encontrar un(os) valor(es) de  $\delta$  a partir del cual sea estadísticamente seguro trabajar con ciertas variables. Una buena aproximación es que el valor del número de mapeos ( $n$ ) pueda cubrir un centímetro de información en un plano de cierta escala, por ejemplo, si nuestro mapa se encuentra en una escala de 1:10000 deberíamos tener al menos un dato en 100 metros, que es lo mismo que  $0,01 \frac{\text{estructuras}}{m^2}$ .

### 3.8. Relación entre espesor ( $\epsilon$ ) y largo de las estructuras ( $l$ )

De acuerdo a Gudmundsson (2000) existe una relación lineal entre el espesor y el largo de las fallas, además según Seguel (2013) esta relación también se cumpliría para las estructuras de tercer orden o mayores de El Teniente (Figura 3.3).

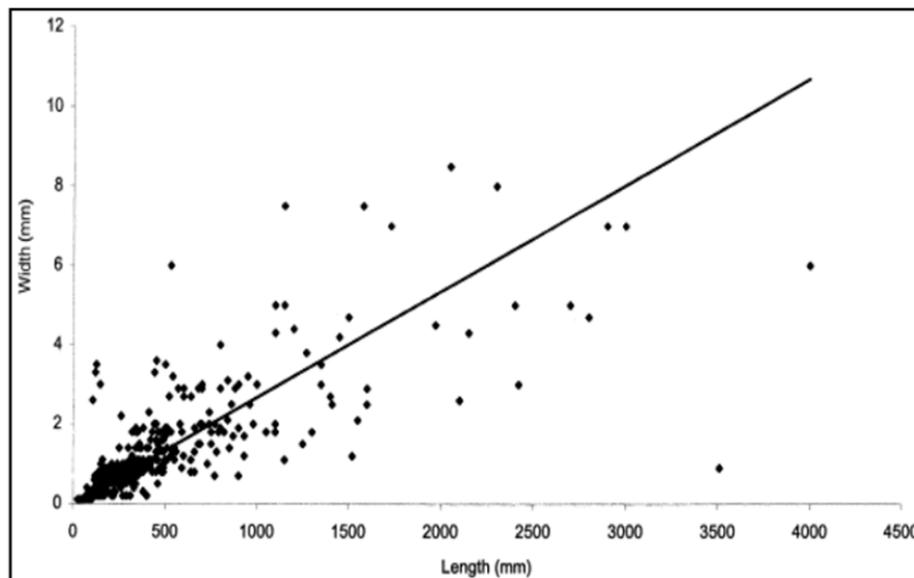


Figura 3.3: Relación de escala entre el espesor de la falla y su longitud. (Tomado de Gudmundsson, 2000)

Una forma de abordar el problema es relacionar la distribución de espesores (calculada en 3.4.5) con la distribución de largo, sin embargo, es necesario saber qué largo corresponde a qué espesor, lo que no es posible determinar directamente usando el método de los círculos, pero es posible hacer una aproximación estadística. Otra variante es tomar el largo unitario de cada mapeo y las coordenadas de las estructuras en los mapas de interpretación para luego relacionarlo con las coordenadas y espesores unitarios de cada mapeo de la base de datos en *Xilab*, este método fue el que se ocupó en este trabajo debido a que presenta más información y menos sesgo que ocupar una distribución.

### 3.9. Mapas de P21

Los valores de P21 son dependientes del área en que son tomados, sin embargo, como el método de los círculos considera que los radios son constantes, la única variable es la sumatoria de los largos que se encuentran dentro del círculo. Si el centro del círculo es desplazado infinitesimalmente, el valor de P21 también cambiará infinitesimalmente; de esta manera es posible construir mapas continuos de P21, estos mapas permiten observar el cambio de densidad de estructuras en los distintos niveles de la mina, lo que permite identificar zonas de mayor o menor fallamiento.

#### 3.9.1. Grilla de Esmeralda

La construcción de un mapa continuo de P21 necesita datos equidistantes en dos dimensiones, debido a esto es necesario construir una grilla que abarque toda el área de la mina. Debido a una limitación de programación, las grillas deben formar un paralelepípedo de dos dimensiones, por lo que en ocasiones se obtienen datos con valores iguales a 0, estos puntos pueden ser utilizados como condiciones de borde en caso de tener mapeos en esa zona (en el caso contrario, simplemente indican una ausencia de información). Para cubrir el área completa de Esmeralda se construye una grilla de 18 columnas y 19 filas separadas cada 50 metros, dando un total de 342 datos calculados. El punto inicial de la grilla corresponde a los 588N y 935E (Figura 3.4)

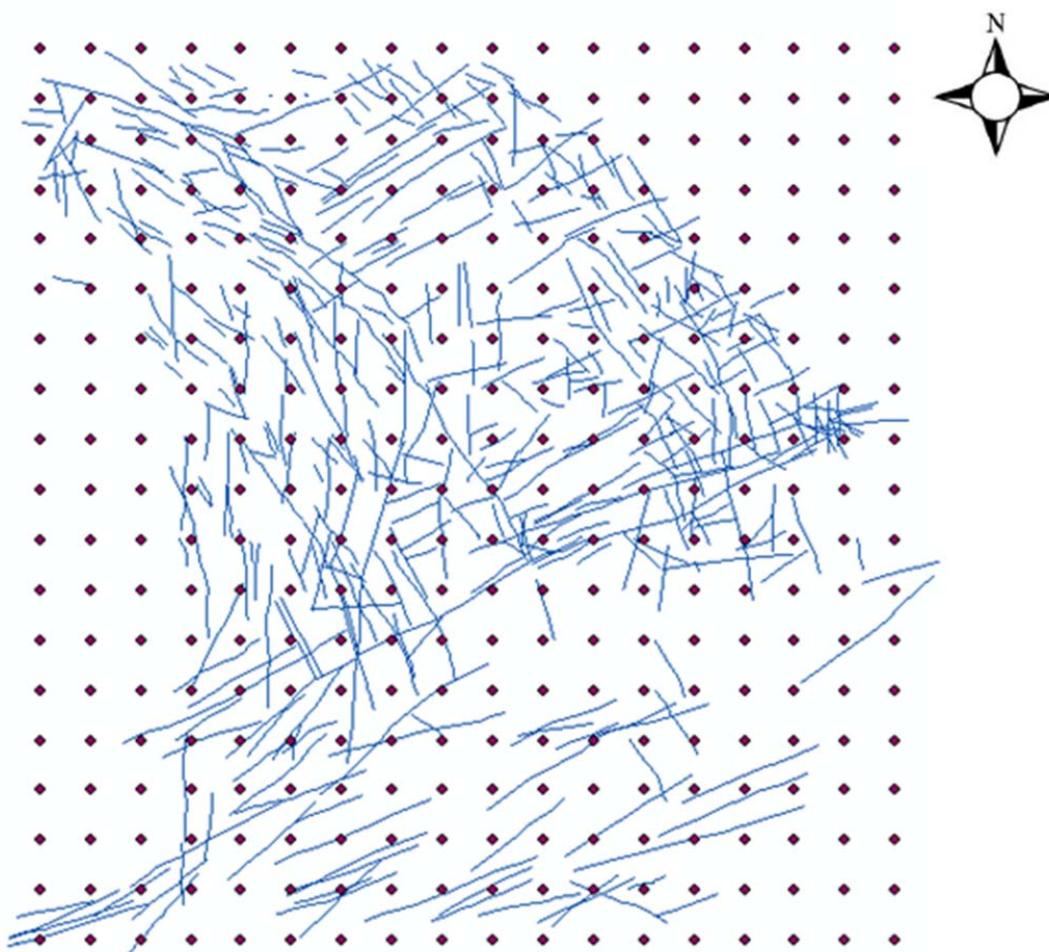


Figura 3.4: Grilla de Esmeralda Hundimiento. Los puntos se encuentran separados cada 50 metros, tanto en la vertical como la horizontal. La grilla de Esmeralda Producción posee los mismos puntos

### 3.9.2. Grilla Reservas Norte

Para abarcar la superficie de Reservas Norte se creó una grilla de 17 columnas y 14 filas separadas cada 50 metros, resultando un total de 238 datos calculados, el punto inicial de la grilla corresponde a 1184 N y 479E (Figura 3.5)

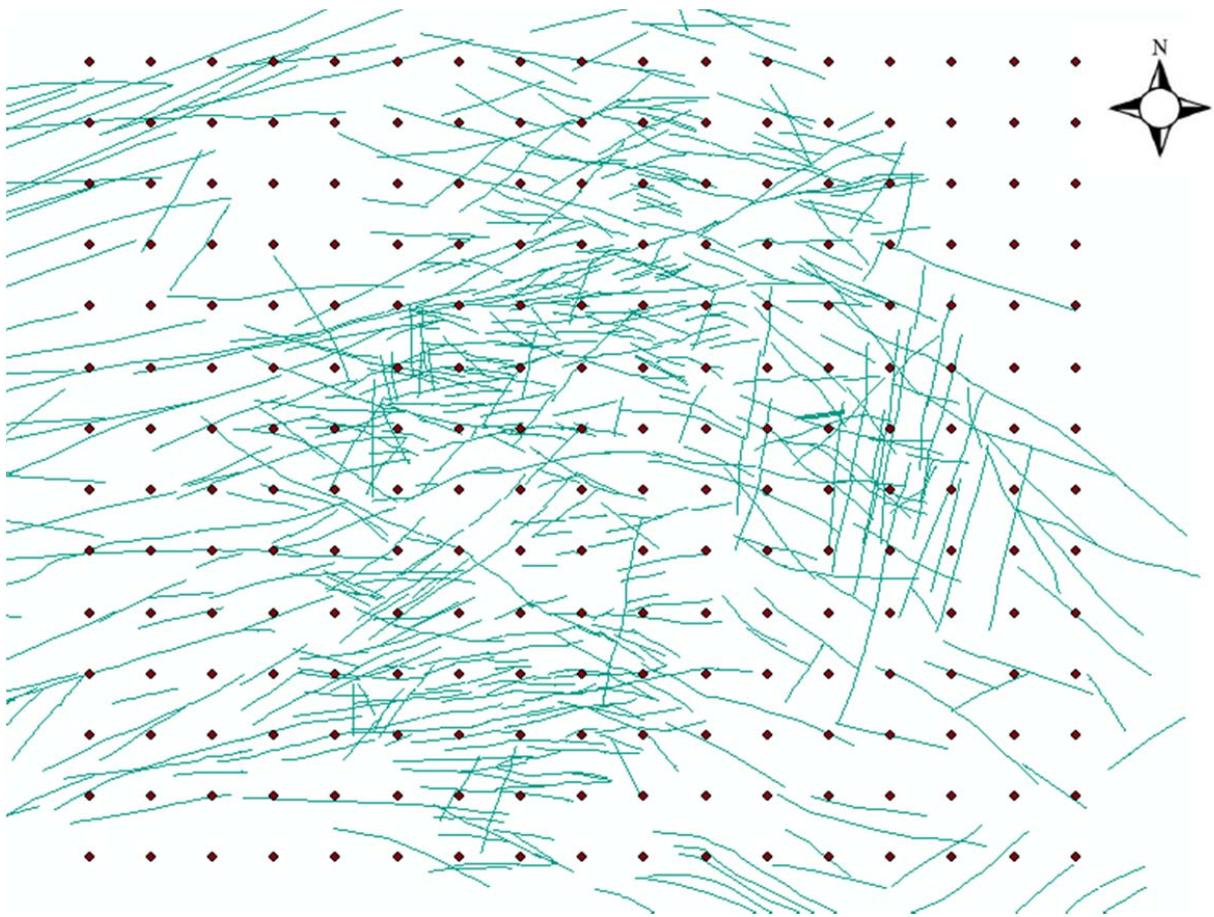


Figura 3.5: Grilla de Reservas Norte Hundimiento. Los puntos se encuentran separados cada 50 metros tanto en la horizontal como la vertical. Pareciera que la grilla deja fuera estructuras, sin embargo, esas corresponden a otro sector de la mina llamado Dacita.

### 3.9.3. Interpolación

Para obtener los valores continuos de P21 se crea un código en *Matlab* (Anexo 1) que ocupa la función de *interpolar*, la que obtiene nuevos puntos y valores (P21) a partir de los datos discretos de la grilla y luego asigna un color en función de su valor, donde aquellos de tonalidades mas cálidas indican valores altos mientras que los de colores fríos indican valores bajos.

El paso de interpolación corresponde a la distancia en la grilla donde se crea un nuevo punto de información a partir de la existente. A menor paso mejor será la resolución obtenida. Para estos cálculos el paso utilizado fue de 25, debido a que corresponde al punto intermedio entre la distancia de dos o más puntos de la grilla.

### 3.10. Diferencias de densidad de estructuras

Derivado de los mapas de P21 se observa una diferencia en esta variable a lo largo de los mapas creados. Para buscar una respuesta a qué puede producir este efecto, se opta por dividir el problema en dos escalas distintas.

#### 3.10.1. Diferencias en distintas zonas de una sola mina

Los datos recopilados en una sola mina son mapeados bajo los mismos estándares, por esta razón, estadísticamente no pueden variar mucho, lo que sugiere que las diferencias de P21 responden a diferencias en las variables geológicas, por lo anterior se construyen gráficos de P21 vs distintas variables geológicas como: litología y planaridad. Para acotar el problema en cada gráfico, los puntos se dividen de acuerdo a si corresponden a zonas de: baja, media o alta densidad de fracturamiento, ocupando la misma escala utilizada en 3.9.3.

#### 3.10.2 Diferencias entre dos minas

Si dos minas de un mismo yacimiento poseen características geológicas similares, la diferencia de densidad o P21 no pueden variar demasiado, entonces la discrepancia de valores sugiere que se debe a razones estadísticas. Para comprobar lo anterior esto se construyen gráficos para ambas minas que compararan variables estadísticas como: P21 vs número de mapeos, P21 vs densidad de mapeos, P21 vs largo interpretado. Luego, se procede a comparar estos gráficos para determinar con exactitud que variable es la que genera estos errores.

## 4. Resultados y discusiones

### 4.1. Consistencia de datos

Debido a la gran cantidad de estructuras mayores mapeadas en ambas minas (2080 en ReNo y 2524 en Esmeralda), evaluar la consistencia de datos entre los niveles de producción y hundimiento debe ser reducido a áreas más pequeñas o subconjuntos, esto debido a que hundimiento presenta menor acceso a los datos debido a una menor cantidad de labores, de esta manera se evita sobreestimar o subestimar familias de estructuras en aquellas zonas con menos túneles.

#### 4.1.1. Mina Esmeralda

Para definir los sectores a dividir en Esmeralda, lo mejor es ocupar los dominios estructurales, que son limitados por las dos grandes estructuras que cruzan el sector, las fallas B y P (descritas en 1.7.2), dividiendo la mina en 3 zonas (Figura 4.1).

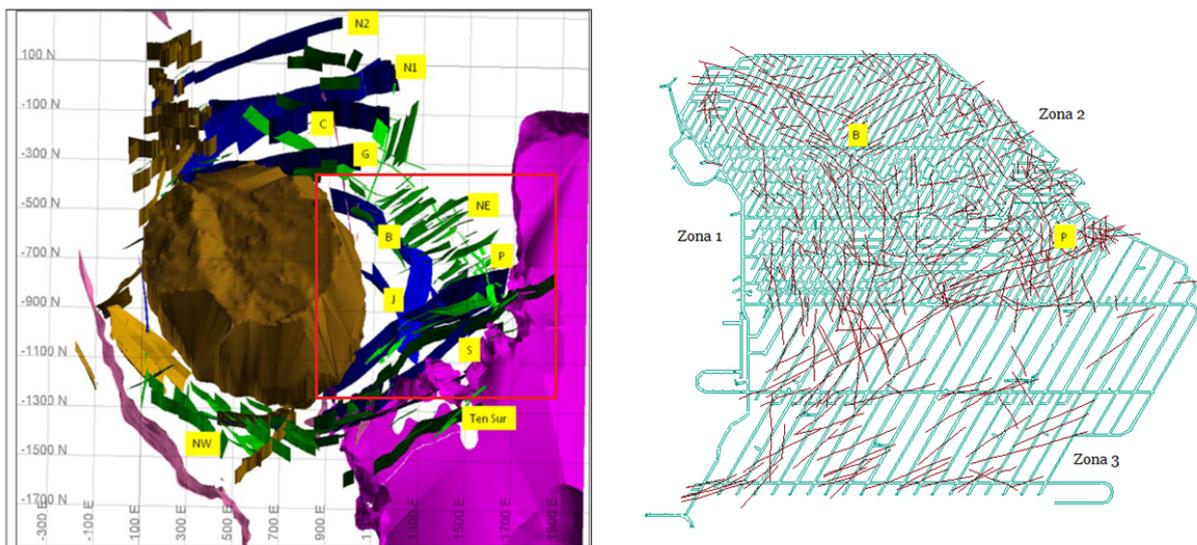


Figura 4.1: Zonas estructurales generadas en Esmeralda por la presencia de los grandes sistemas de fallas B y P. La imagen de la izquierda está tomada desde Seguel (2013).

#### 4.1.1.1. Consistencia de orientación

En la Figura 4.2, se observa la comparación de familias de estructuras entre los niveles de hundimiento y producción del sector 1 de mina Esmeralda. Es posible identificar en ambas imágenes a 2 grandes familias de alto manteo (dip), pero con rumbos distintos y opuestos, predominando los NW. Sin embargo, en estos gráficos no es posible saber cuál es la orientación más recurrente.

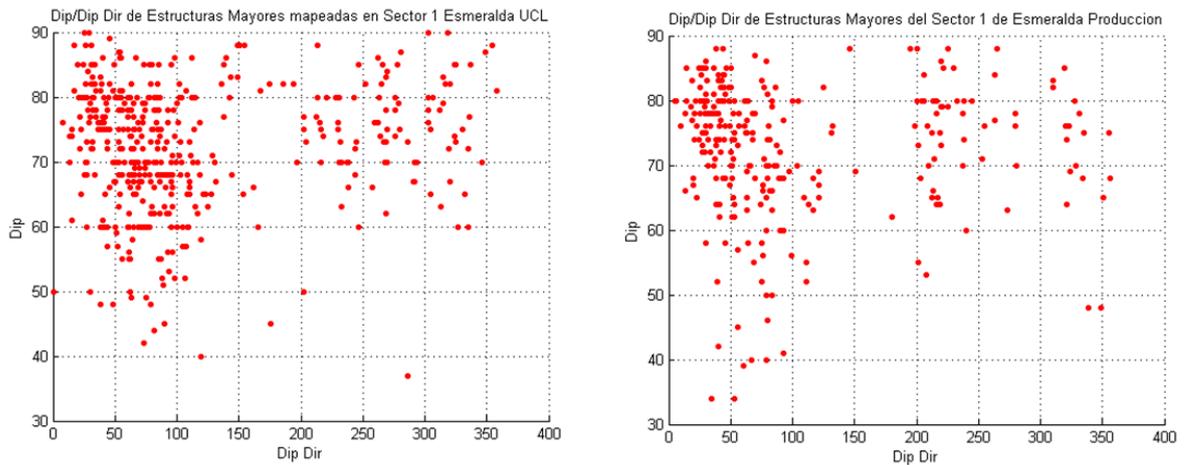


Figura 4.2: Comparación de dip/dip dir de estructuras mayores mapeadas. Se observan dos grandes familias, una con dip dir menor a 150 y otra con mayor a 200.

En la Figura 4.3 se compara la acumulación de polos entre los niveles de hundimiento y producción del sector 1 de mina Esmeralda. Se observa, que si bien poseen dips similares, la máxima concentración de dips dir varía lo que indica orientaciones parecidas pero con densidades de polos distintas.

La Tabla 3 contiene los mismos análisis anteriores para los sectores restantes de Esmeralda. El sector 2 posee la mayor consistencia, ya que presenta las mismas familias y casi exactamente las mismas máximas de acumulación, mientras que el sector 3, si bien exhibe el mismo número de familias y la misma máxima acumulación, no presenta el segundo máximo, esto debido a que el nivel de hundimiento muestra varias zonas de acumulación con porcentajes en torno al 4% (valor menor, pero similar a la segunda máxima). En general, la consistencia de los mapeos en cuanto a orientación entre ambos niveles es buena, incluso cuando la diferencia de datos registrados es muy diferente (50%). Las figuras de otras zonas se encuentran en el Anexo 2.

Tabla 3: Resumen de las familias observadas y las orientaciones con mayor concentración.

Sector	Número de estructuras	Número de familias	Dip/Dip Dir máximo (%)	2do Dip/Dip Dir máximo (%)
Hundimiento 1	441	2	70/67 (9%)	78/33 (7%)
Producción 1	286	2	78/29 (14.5%)	69/83 (9%)
Hundimiento 2	297	4	80/329 (8.7%)	79/235 (7%)
Producción 2	265	4	80/325 (14.4%)	74/239 (6%)
Hundimiento 3	522	2	81/334 (6.3%)	78/102 (4%)
Producción 3	732	2	80/328 (6.5%)	84/139 (6%)

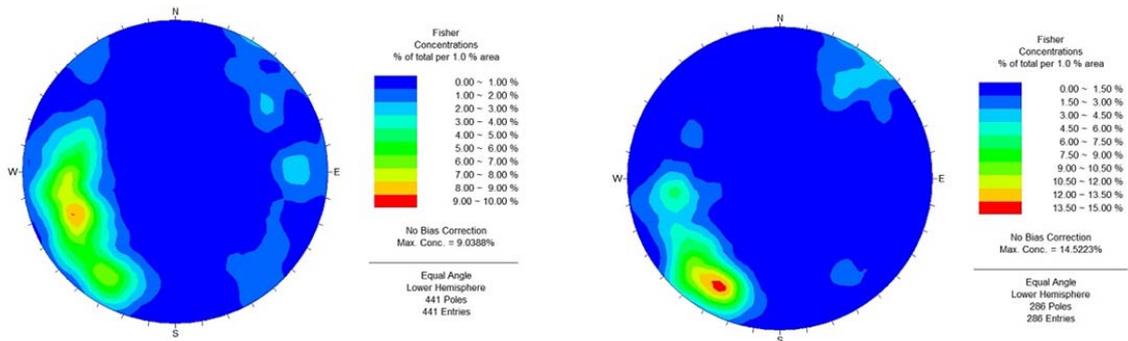


Figura 4.3: Comparación de acumulación de polos en mina Esmeralda, sector 1. Se observa que ambos niveles poseen una concentración máxima de dips similares, pero de dips dir distinto.

#### 4.1.1.2 Consistencia de espesores típicos

En la Figura 4.4 se observa que el valor de la frecuencia de espesores típicos no suele coincidir entre los mismos sectores de dos niveles distintos, pero si en el porcentaje acumulado. La razón de esto se debe a que la cantidad de mapeos son diferentes entre ambos niveles (441 y 286 respectivamente), sin embargo, su distribución no cambia al tratarse de una medida porcentual.

Los sectores 1 y 2 poseen la misma distribución de espesores, alcanzando su máxima frecuencia, por lejos, en los espesores de 1 cm (40% del total). El sector 3

(Anexo 3) también tiene máxima frecuencia de espesores típicos en 1 cm, sin embargo, posee una cantidad importante que es menor a los 10 mm (30% del total)

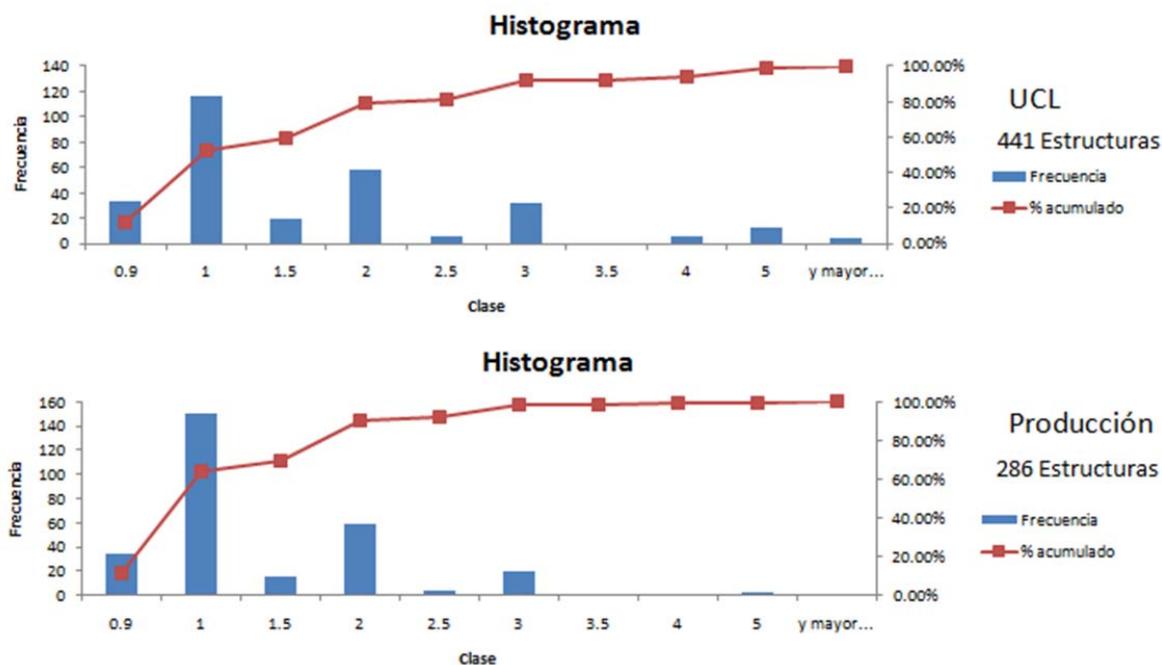


Figura 4.4: Comparación de espesores en sector 1 de Esmeralda. Ambas curvas de acumulación presentan la misma forma, pero con frecuencias distintas, a pesar de esto son consistentes.

#### 4.2. Círculo Óptimo

La elección del radio a usar, para las mediciones, es elegida en función de qué variables son las que se quieren cuantificar y en qué lugar.

Las estructuras interpretadas, no solo contienen información directa para el cálculo del P21 e indirecto para la densidad de mapeo, sino que además pueden ser usadas para: hacer cálculos de largo vs espesores y largo de estructuras interpretadas vs número de mapeos realizados. Es por esto, que las estructuras interpretadas se consideraran, para este trabajo, como el mejor candidato para encontrar el radio óptimo.

En la Figura 4.5 es posible observar que ReNo presenta a simple vista una mayor cantidad de estructuras interpretadas que Esmeralda, entonces si se elige un radio mínimo, para esta última mina, que permita mantener de alguna manera constante o en

un rango aceptable los valores, éstas también deberían ser válidas para ReNo, pues contienen más información por metro cuadrado.

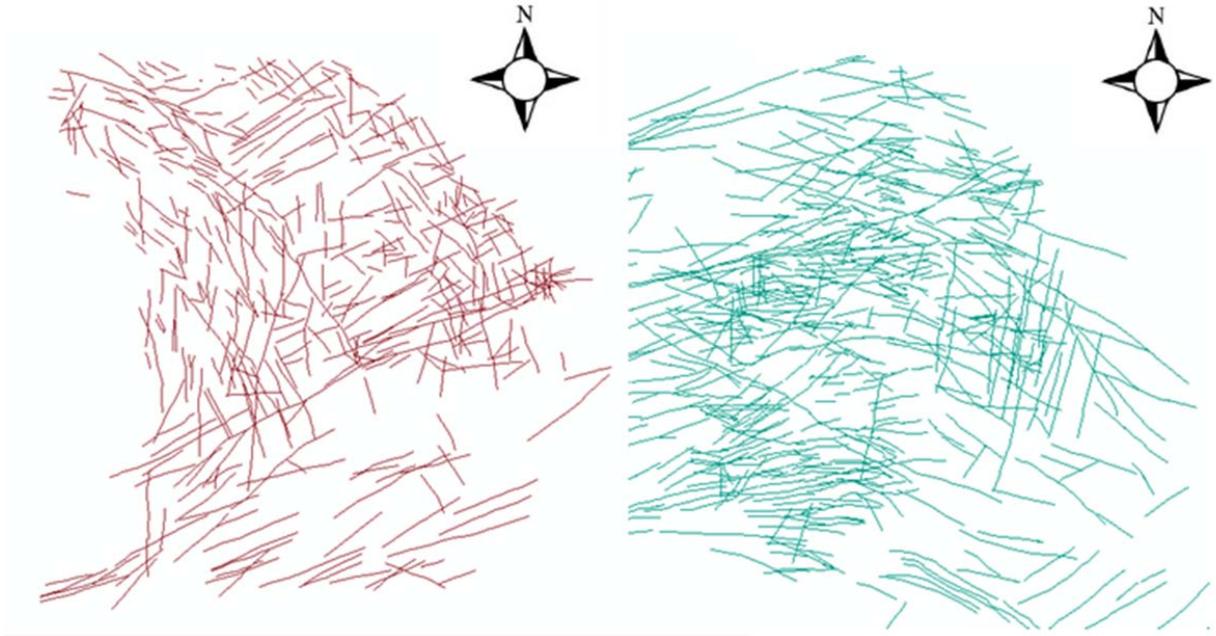


Figura 4.5: Comparación de estructuras de las distintas minas estudiadas. Se observa que ReNo (a la derecha, en verde) posee mayor cantidad de estructuras interpretadas que Esmeralda (a la izquierda, en rojo).

#### 4.2.1. Cambio de P21 en función del radio

La Figura 4.6 muestra que los valores máximos de P21 se reducen considerablemente desde un radio de 10 metros hasta uno de 50 metros, para luego mantenerse relativamente constantes y cercanos a los  $0,1 \text{ m/m}^2$ . En el caso de los valores mínimos de P21, éstos van en aumento hasta el radio de 60 metros, con excepción de puntos aislados de la zona de producción que nunca aumentan de los  $0,01 \text{ m/m}^2$ , esto debido a que se encuentran medidos en una zona con muy baja densidad de labores (Figura 4.7). Es importante notar que el decrecimiento de los máximos de P21 con respecto al radio sucede debido a que a mayor valor van aumentando las zonas sin estructuras o sin interpretación. Así mismo, el aumento de los mínimos es debido a que radios pequeños pueden no tomar ninguna estructura, ambos casos deben ser eliminados al hacer un tratamiento estadístico o generarán un efecto de ruido y puede no representar fielmente una zona estudiada (Golder Associates, 2002)

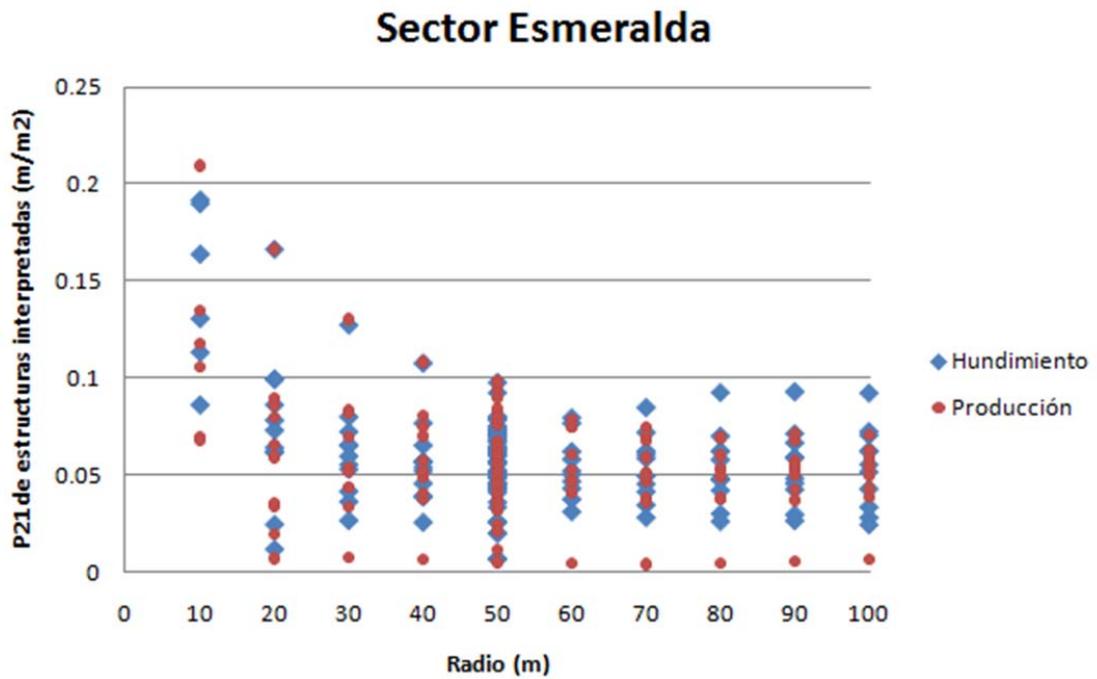


Figura 4.6: Variación de intensidad (P21) en función del radio del círculo utilizado. Aproximadamente a los 60 metros los valores se estabilizan tomando valores “equivalentes”, es decir, son independientes de la dimensión. Aquellos puntos de la zona de producción en que el P21 nunca aumenta de los 0,01 m/m<sup>2</sup> se deben a que fueron medidos en una zona del nivel que no presenta labores, a diferencia del nivel de hundimiento que si las presenta en dichas coordenadas.

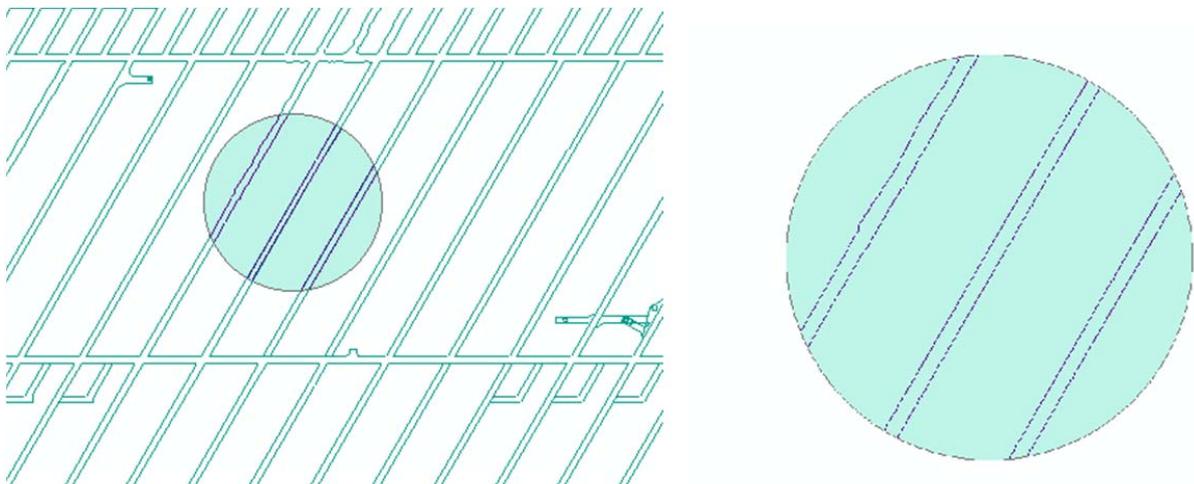


Figura 4.7: Zona de Esmeralda Hundimiento con baja densidad de labores, esto afectaría a que la cantidad de estructuras mapeadas disminuya y por ende las estructuras interpretadas confiables disminuyan.

#### 4.2.2. Cambio de densidad de mapeos en función del radio

La densidad de mapeo es un valor que indica la cantidad de los mismos realizados en un área determinada. En la Figura 4.8 se observa que la máxima de éste valor decrece fuertemente desde 0,25 n/m a 0,14 n/m desde un radio 10 m a uno de radio 50 m. En cambio, los valores mínimos, de 0,03 n/m, se mantienen casi constantes a cualquier radio, con excepción de aquellos puntos del nivel de producción que presentan el mismo problema nombrado en el apartado 4.2.1. El decrecimiento de los máximos de densidad de mapeo obedece, al igual que el P21, a que a menores radios es posible tocar zonas particulares con alto número de mapeos que no reflejan la verdadera distribución de éstos en el del sector (serian como *clusters* de mapeos). El caso de los mínimos constantes se debe a una zona que tiene bajos mapeos (1 cada 30 metros), pero bien distribuidos en una zona con labores simétricas (Figura 4.9)

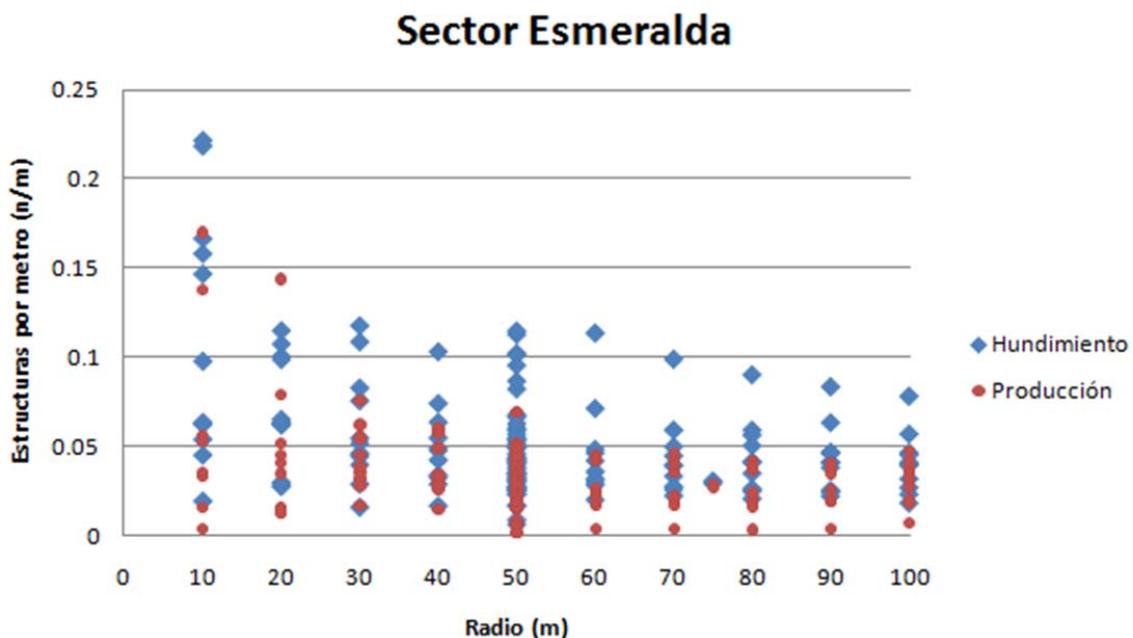


Figura 4.8: Variación de densidad de mapeo en función del radio del círculo utilizado. Aproximadamente a los 50 metros los valores se estabilizan tomando valores “equivalentes”, es decir, independientes de la dimensión. Aquellos puntos de la zona de producción en que la densidad de mapeos nunca aumenta de los 0,01 n/m se deben a que fueron medidos en una zona del nivel que no presenta labores, a diferencia del nivel de hundimiento que si las presenta en dichas coordenadas.

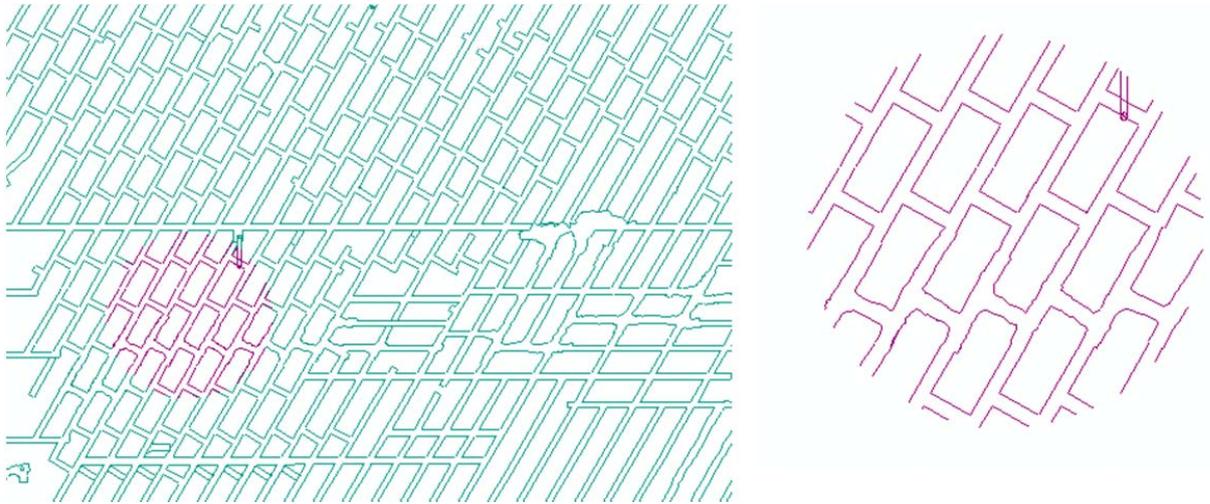


Figura 4.9: Zona de Esmeralda Producción con bajos valores de densidad de mapeo independiente del radio. Esto se debe que a pesar de poseer pocos mapeos estos se encuentran bien distribuidos en una zona con túneles simétricos.

#### 4.2.3. Elección del radio

Por lo expuesto en los apartados 4.2.1 y 4.2.2, el radio común donde se estabilizan los valores máximos ocurre en radios de 50 metros, mientras que los mínimos o son constantes o se estabilizan a 60 metros, sin embargo, estos últimos se ven afectados fuertemente por las labores que logran interceptar los círculos. Lo anterior puede ser corregido al crear un valor mínimo de mapeos en cierto largo de labores, por lo que un radio de 50 metros es una mejor elección al cubrir ambas. Además, debido al tamaño máximo de las minas (Esmeralda  $850 \times 940 \text{ m}^2$ , ReNo  $889 \times 750 \text{ m}^2$ ), es decir, la unión de la línea recta mínima de los puntos más al norte con los del sur y los del este con el oeste, es más simple cubrirlos con múltiplos de 50 que de 60 y por lo tanto facilita el tratamiento matemático y computacional.

#### 4.3. Densidad mínima de mapeo

Escoger un valor mínimo es difícil debido a que éste depende de la escala que se quiera utilizar y a pesar de que las minas del yacimiento poseen escalas similares, las estructuras no están limitadas solo a éstas, por lo que evaluar ciertas características como el largo puede ser complejo, sin embargo, una buena aproximación es comparar los valores de aquellos sectores que poseen una cantidad buena de mapeos, y que han

llevado a construir un buen modelo estructural, con aquellos sectores que son considerados insuficientes (Brzovic, 2014).

En la Tabla 4 es posible observar que los valores de densidad promedio en aquellos lugares con buenos mapeos es de aproximadamente 0,04 estructuras por metro, que es lo mismo que una estructura mapeada cada 25 metros, sin embargo, este valor es promedio, por lo que también es posible encontrar valores cercanos a 0,025 estructuras por metro o una estructura mapeada cada 40 metros, dicho valor es lejano al promedio de aquellos sectores que están considerados como mapeados insuficientes con 0,015 o una estructura mapeada cada 66 metros, donde los máximos apenas alcanzan los 0,020 o una estructura mapeada cada 50 metros. Por lo anterior, un corte aceptable para los análisis estadísticos, es usar aquellos que sean mayores a 0,025 est/m. La escala más pequeña usada en los mapas es de 1:2500, por lo que si se quiere cubrir un centímetro de información, es necesario tener en promedio, al menos, una estructura mapeada cada 25 metros, por lo que el valor elegido anteriormente tiene sentido.

Tabla 4: Resumen de densidad de mapeos en distintas zonas de las diferentes minas del yacimiento. Los nombres en verde corresponden a aquellos sectores que son considerados como bien mapeados debido a que equivalen a la escala elegida, mientras que en rojo aquellos que son considerados como insuficientes.

Nombre	Densidad de mapeo (estructuras/m)	Un mapeo cada cuantos metros
Esmeralda	0,043	23,25
Diablo	0,0415	24,09
ReNo	0,0395	25,31
Qda Teniente	0,0385	25,97
Esmeralda	0,014	71,42
Diablo	0,0174	57,47
ReNo	0,0076	131,57
Qda Teniente	0,0178	56,17

#### 4.4. Mapas de P21

Estos mapas de calor permiten ubicar, en las zonas de color cálido, aquellos lugares que poseen mayor densidad de estructuras. Ambos niveles de una mina, teóricamente por estar separadas por menos de 17 metros, deberían tener la misma

densidad y zonas con características geológicas similares, sin embargo, para este caso se debe tener en cuenta que hay secciones que difieren en cuanto a densidad de mapeo y densidad de labores, por lo que es necesario hacer una descripción y análisis, por separado, de cada nivel antes de compararlos.

#### 4.4.1. Esmeralda Hundimiento

En la Figura 4.10 se observa que este nivel presenta 5 zonas de alta intensidad, con 4 de ellas muy cercanas entre sí con una misma dirección (NE-SW), que es próxima al centro del mapa. También existe un quinto punto en la zona NW del nivel. Además, sobre el 0 °N existe una intensidad más alta (0.05 a 0.12 m/m<sup>2</sup>) en comparación a los del sur (0-0.065 m/m<sup>2</sup>), esto se debe a que el número de labores es menor en la parte meridional (Figura 4.11). También existe un menor número de mapeos en el SE, por lo que los valores tienden a ser cercanos a 0.

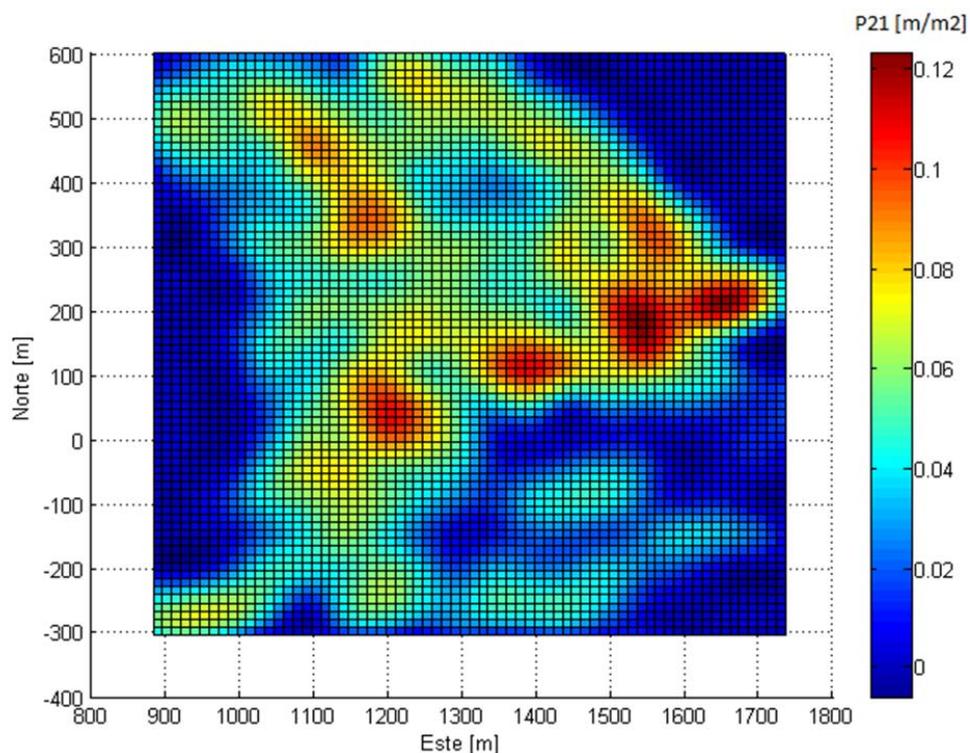


Figura 4.10: Mapa de densidad de estructuras de Esmeralda Hundimiento. Existen 5 puntos cálidos, 4 en el centro y 1 en el NW.

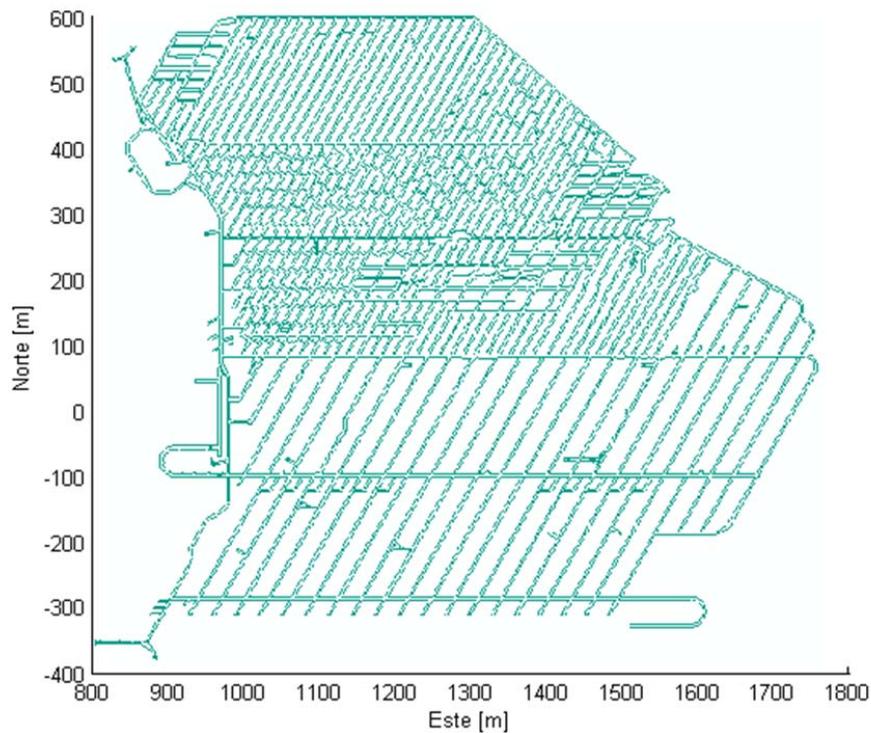


Figura 4.11: Mapa de labores de Esmeralda Hundimiento. El sector norte posee una mayor (casi 3 veces) densidad de túneles que la del sur.

#### 4.4.2. Esmeralda Producción

La Figura 4.12 muestra 3 zonas de densidad de estructuras mayor a  $0,1 \text{ m/m}^2$ . Una de ellas ubicada como una gran franja entre los  $100\text{N}-300\text{N}$  y  $1100\text{E}-1700\text{E}$ , con un máximo de  $0,12 \text{ m/m}^2$  en los  $150\text{N}-1100\text{E}$ . Los otros 2 lugares, comparativamente, son más bien puntuales y se encuentran en los  $150\text{S}$ , sin embargo, entre los  $100\text{N}$  y  $100\text{S}$  los valores de intensidad son 0, esto debido a que no existen mapeos en esta zona, ya que aún no hay desarrollo de túneles en el lugar. Esta falta de información podría generar de manera virtual los máximos, ya que la zona no mapeada podría tener valores similares de densidad de estructuras como sugiere la poca información existente en los  $50\text{S}-1500\text{E}$ , lo que o aumentaría el tamaño de la franja que se observa en el norte o mostraría que la densidad de estructuras es similar en todo el nivel.

#### 4.4.3. Comparación de P21 entre los niveles de Esmeralda

Ambos niveles alcanzan valores de densidad de estructuras máximos similares ( $0,12 \text{ m/m}^2$ ), sin embargo, los lugares de ocurrencia parecen estar desplazados. La gran franja del nivel de producción se encuentra unos 100 metros más al norte que la zona que concentra 4 puntos cálidos del nivel de hundimiento y además, alcanza valores ligeramente menores, lo que refuerza la teoría de que existiría una banda de mayor envergadura que no es visible por el hecho de tener menos mapeos y menos labores en la zona sur de ambos niveles. Es más, los dos puntos de tonalidad cálida aislados en el nivel de producción, registran los mismos valores de densidad de estructuras ( $0,11 \text{ m/m}^2$ ) y la misma longitud (100 m) en la coordenada este que dos de los valores máximos de la zona central de hundimiento.

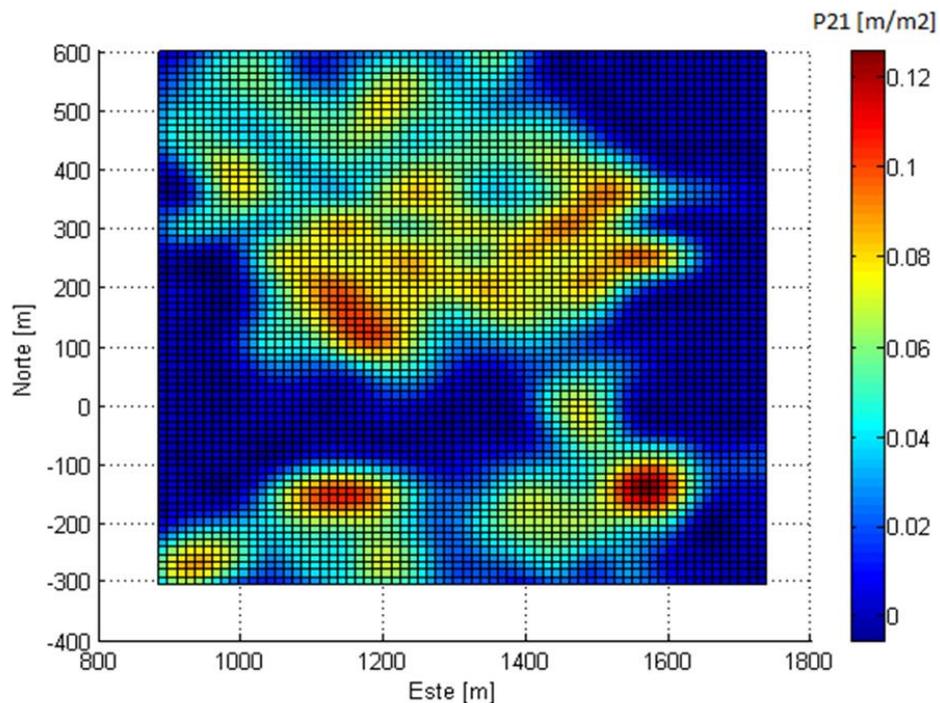


Figura 4.12: Mapa de densidad de estructuras de Esmeralda Producción. Se observan 3 puntos calientes, uno como una gran franja en los 200 N; y dos zonas aisladas en los 200 S.

#### 4.4.4. ReNo Hundimiento

En la Figura 4.13, se observa que existen cuatro zonas de alta densidad de estructuras, destacando de manera particular la de mayor valor en el sector centro-NW. Los restantes sectores se distribuyen: dos en el SW y uno al E. Las 4 zonas presentan

cierta continuidad entre ellas, formando un anillo que posee una pequeña abertura al NE y otra de mayor tamaño al centro-SE. Los valores bajos de P21 se concentran en el centro y SE del mapa, donde el primero, de acuerdo al estándar establecido, posee una densidad de mapeo aceptable (0.04 est/m), mientras que el segundo se encuentra bajo el mínimo establecido (0,008 est/m), debido mayormente a la baja densidad de labores de esa parte de la mina (Figura 4.33)

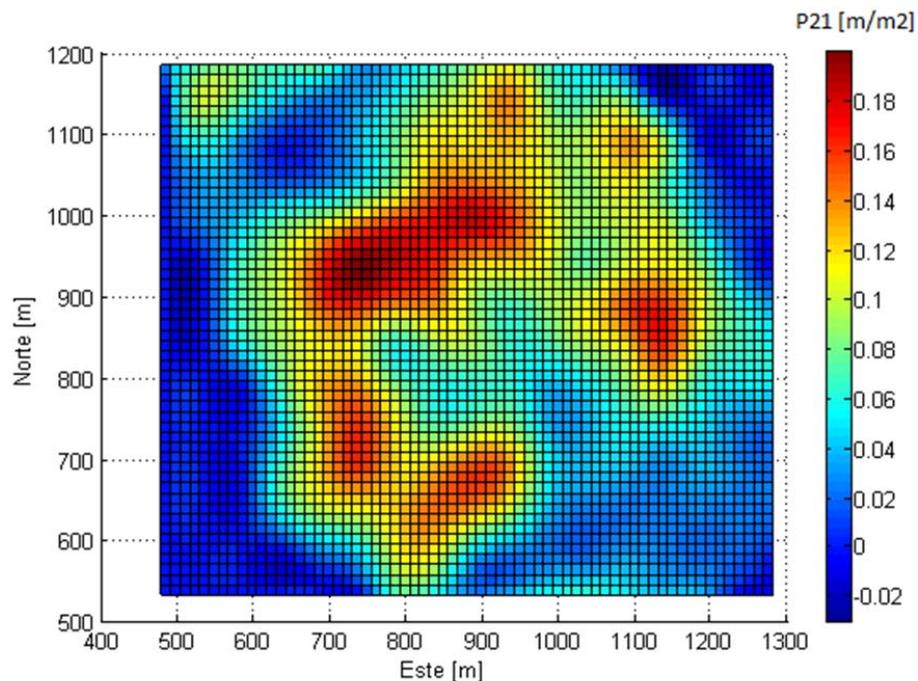


Figura 4.13: Mapa de densidad de estructuras de ReNo Hundimiento. Se observan 4 puntos calientes semi-continuos con forma de anillo. Posee una abertura en la zona SE.

#### 4.4.5. ReNo Producción

La Figura 4.14 muestra 3 zonas de alta densidad de estructuras, siendo particularmente alta la franja alargada ubicada al E del mapa. Las otras dos zonas se ubican al SW y N. Al igual que en hundimiento, los sectores de alta intensidad forman un anillo con una pequeña abertura (3000 m<sup>2</sup>) en el NE y, a diferencia del otro nivel, otra mayor al NW (30000 m<sup>2</sup>), sin embargo, esta última abertura se debería a la baja densidad de mapeos de esa zona (0,007 est/m). La zona centro presenta bajo P21, pero con buena densidad de mapeo (0,037 est/m) (Anexo 4).

#### 4.4.6. Comparaciones entre los niveles de ReNo

Los valores máximos de ambos sectores son similares ( $\sim 0.19 \text{ m/m}^2$ ), sin embargo, éstos son alcanzados en zonas distintas, lo que probablemente responde a la densidad de mapeo, ya que los máximos valores de ésta se encuentran concordantes con los máximos de intensidad respectivos de cada nivel, aún así, pareciera que la zona NW y E poseen rangos mayores que el resto. Además, ambos niveles parecen tener forma de anillo y coinciden en una pequeña apertura en la parte NE de la Figura. El centro del anillo posee baja intensidad con altos mapeos en ambos casos.

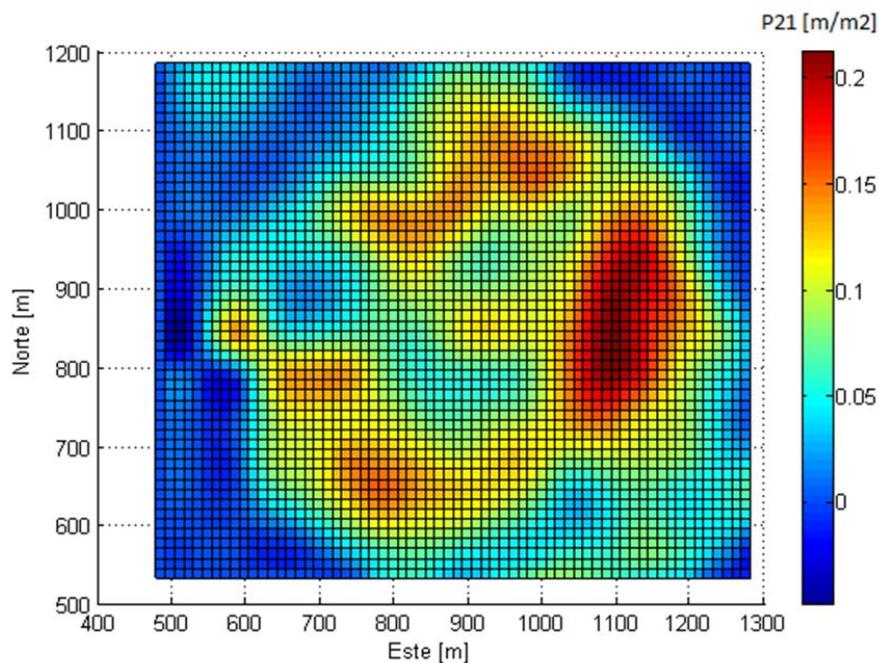


Figura 4.14: Mapa de densidad de mapeo de ReNo Producción. Se observan 4 puntos calientes semi-continuos con forma de anillo. Posee una apertura en la zona NW.

#### 4.4.7. Extensión K y 4Sur

Esta mina se encuentra ubicada exactamente en las mismas coordenadas que Esmeralda, solo que 120 metros más arriba. Debido a que la interpretación estructural es del año 1993, no existen de manera digital los mapeos, solo las interpretaciones. Sin embargo, puede ser útil observar su mapa, ya que en El Teniente tanto las estructuras como la litología suele tener un comportamiento sub vertical, por lo que variaciones en las mismas coordenadas de diferentes cotas no suelen ser muy grandes

En la Figura 4.15 se observa que las densidades de estructuras son muy similares entre ambos niveles, tanto en valores como en las zonas donde ocurren, salvo en el sector centro donde el nivel de producción posee valores cercanos a las 0,15 m/m<sup>2</sup>, es decir casi 0,05 m/m<sup>2</sup> más que en hundimiento.

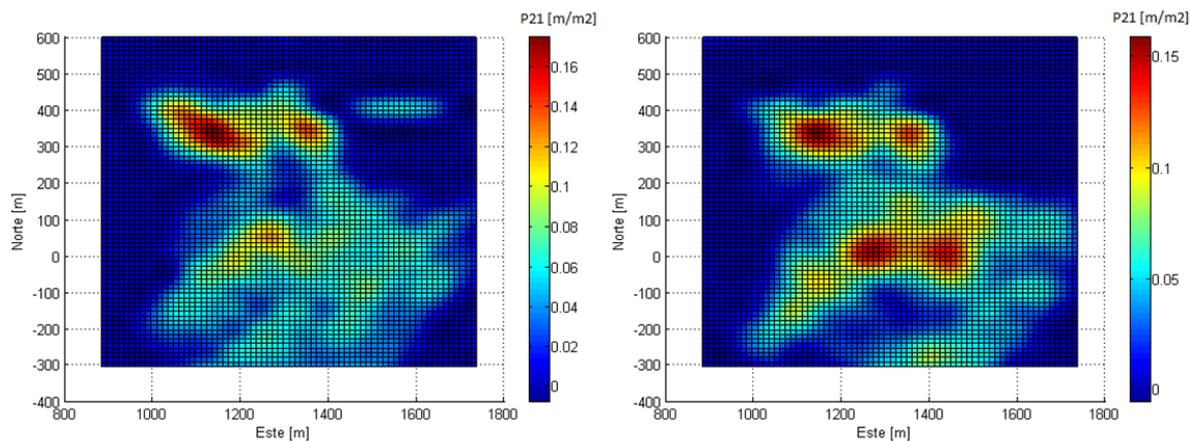


Figura 4.15: Comparación de nivel de hundimiento (derecha) con producción del sector 4 Sur. Las intensidades máximas ocurren en sectores similares, sin embargo los valores son ligeramente distintos.

#### 4.4.7.1. Comparación entre Esmeralda y 4Sur

Al no poder registrar la densidad de mapeo del sector 4sur, no es posible saber que tan confiables son los valores de P21 calculados, pero suponiendo que lo son, es posible realizar comparaciones con Esmeralda. De acuerdo a la Figura 4.16, la franja de alta densidad de estructuras, que solo se observa en el nivel de producción de 4Sur (0,15 m/m<sup>2</sup>), coincide con el sector que contiene las 4 zonas de alta densidad de estructuras de Esmeralda Hundimiento (0,12 m/m<sup>2</sup>), mas sus valores difieren. Además, la zona de alta intensidad que se observa en ambos niveles de 4 sur, coincide con la zona ubicada en el NW de Esmeralda Hundimiento. Los valores que presenta 4sur en la zona meridional coinciden con la intensidad de la gran franja de valores constantes propuesta en 4.4.3

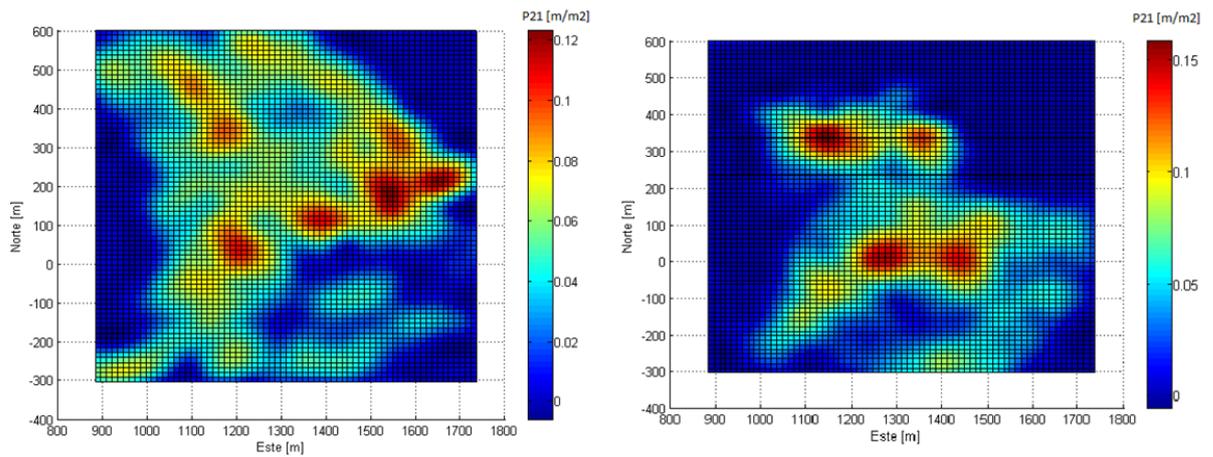


Figura 4.16: Comparación de intensidades de Esmeralda (izquierda) con 4 Sur (derecha). Ambas poseen las mismas coordenadas, pero distinta cota.

#### 4.4.8. Comparación entre ReNo y Esmeralda

Si se comparan los valores de densidad de estructuras de estas dos minas se puede observar que los valores de ReNo casi duplican a los de Esmeralda. De acuerdo a la Figura 4.17, una posible razón de esto se debería a que ReNo presenta una mayor densidad de labores, lo que permite recoger información mejor distribuida en comparación a Esmeralda y por consiguiente tener estructuras con mayor certeza.

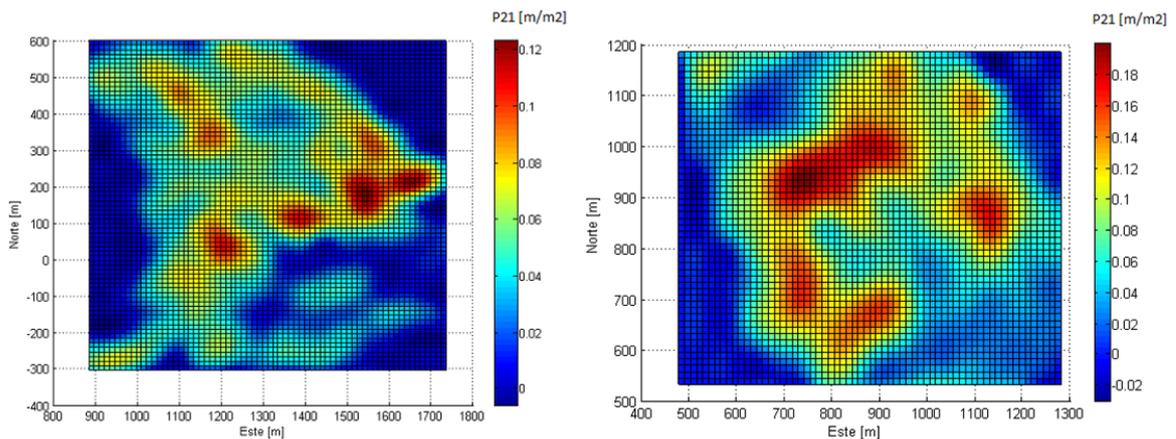


Figura 4.17: Comparación de P21 de Esmeralda (derecha) con ReNo (izquierda). Los valores de densidad de estructuras son mayores, en un 50%, en Reservas Norte.

#### 4.5. Diferencias de densidad de estructuras

La premisa de que la densidad de estructuras debería ser similar entre dos niveles que están separados por menos de 20 metros, se cumple, pero no a cabalidad (Figura

4.18), por lo que es necesario encontrar qué factores cambian o condicionan los valores. Para responder esto lo mejor es separar el problema en partes, viendo qué produce la diferencia entre: dos niveles, dentro de un mismo nivel y entre dos minas en la misma cota.

#### 4.5.1. Diferencias de densidad de estructuras entre dos niveles

En la Figura 4.19 se observa que la consistencia de interpretación entre los niveles de hundimiento y producción de Esmeralda es regular, más del 65% de los datos se desvían de la curva ideal. Las características de estos dos niveles son similares entre sí, por lo que es poco probable que sean variables geológicas las que estén controlando estas diferencias, siendo más factible que éstas atiendan a variables de tipo estadísticas.

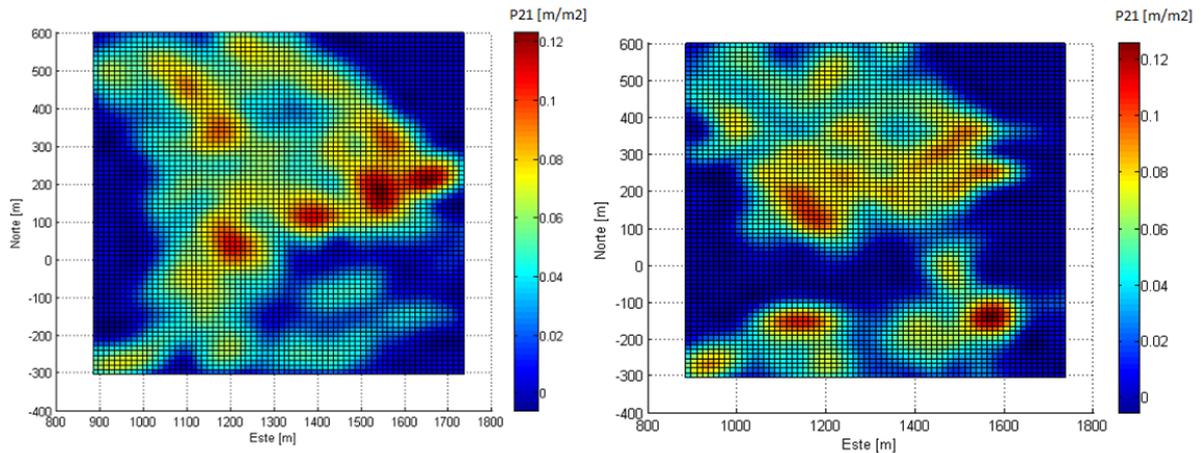


Figura 4.18: Comparación de P21 entre los niveles de hundimiento (derecha) con producción (izquierda) de mina Esmeralda. Los valores son similares, sin embargo las zonas donde aparecen no.

Aplicando el filtro calculado en el apartado 4.3, aceptando solo valores de densidad superior a 0,04 o de una estructura cada 25 metros, se puede observar en la Figura 4.19 que los puntos de tipo extremo (relación de P21 bajos con P21 altos o viceversa) tienden a desaparecer, lo que indicaría que una densidad alta lleva a tener una mayor consistencia estructural entre ambos niveles.

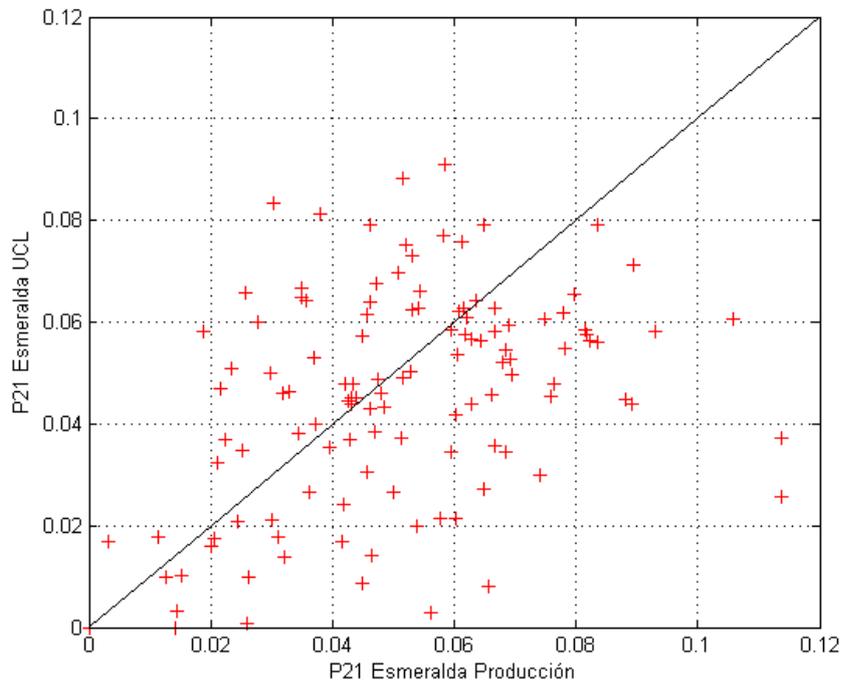


Figura 4.19: Comparación de P21 entre niveles de hundimiento y producción de Esmeralda aplicando un filtro de una estructura cada 5 metros.

A pesar de tener densidades de mapeo parecidas, el hecho de que la densidad de labores entre ambos niveles sea diferente, conlleva a que al comparar estructuras mapeadas éstas no sean cercanas a la curva ideal, lo que se observa en la Figura 4.20. Sin embargo, en aquellos sectores donde las densidades de mapeo son similares (diferencia no mayor al 10%) y el número de estructuras también (diferencia no mayor al 5%) se observa, en la Figura 4.21, que la consistencia de densidad de estructuras entre ambos niveles es idéntica, lo que lleva a concluir que la discrepancia entre niveles de una misma mina se debería a la diferencia o a la distribución de estructuras mapeadas en las labores.

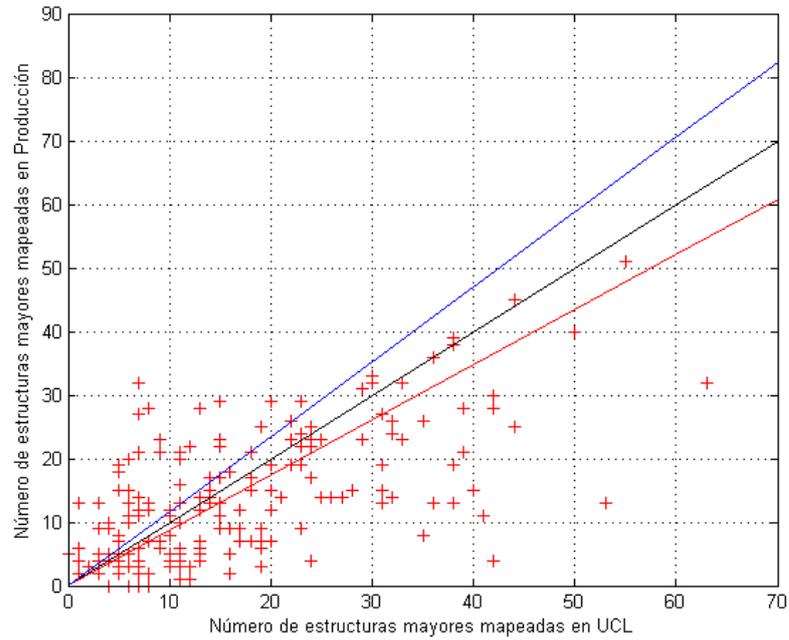


Figura 4.20: Comparación de estructuras mayores mapeadas, entre hundimiento y producción, en radios con mismas coordenadas de centro, pero distinta cota.

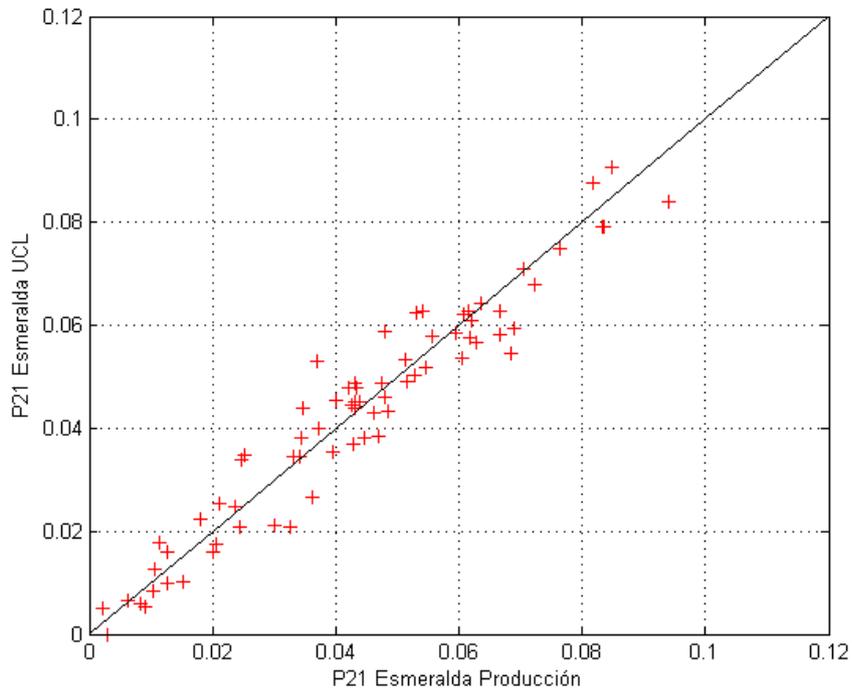


Figura 4.21: Comparación de P21 con densidad de mapeos (<10%) y número de estructuras similares (<5%)

#### 4.5.2. Diferencias de P21 en un mismo nivel

En general, la cantidad de mapeos y labores presentan valores similares al evaluarlos en círculos de radio 50 en distintas coordenadas pero dentro de un mismo nivel, que es lo mismo que afirmar, que las variables estadísticas sean constantes, sin embargo, como podemos ver en las Figuras 4.10, 4.12, 4.13 y 4.14 la densidad de estructuras no lo es, lo que quiere decir que alguna característica geológica genera cambios en el P21. Una de las características geológicas que suele cambiar en una mina en áreas no muy grandes (1000m<sup>2</sup>) es la litología, como se observa en la Figura 4.22

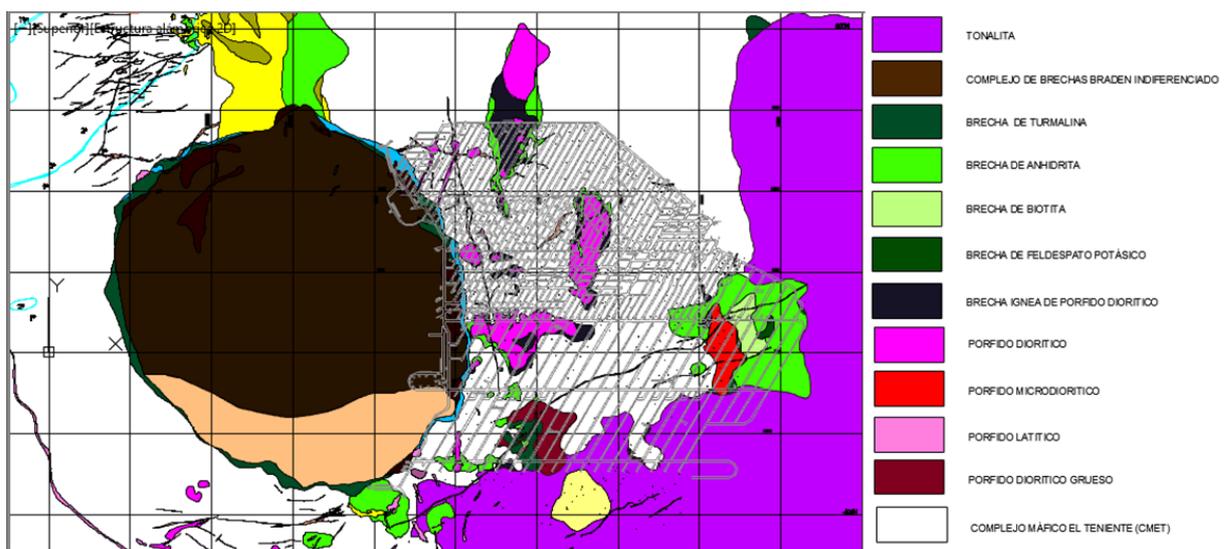


Figura 4.22: Mapa geológico del nivel de Esmeralda Hundimiento. Se observa que dentro de una mina del yacimiento la litología es diversa.

##### 4.5.2.1. P21 vs Litología

Para hacer una comparación entre estas dos variables, una buena aproximación es juntar el mapa litológico con el mapa de intensidad en uno solo. Como la litología es distinta en cada mina lo mejor es tratarlas por separado.

##### 4.5.2.1.1. Esmeralda

En la Figura 4.23 se observa que la densidad de estructuras se encuentra claramente delimitada por la Brecha Braden en el oeste, ya que en las zonas con esa litología los valores decaen a 0. También se observa que la mayoría de las intensidades altas se encuentran en las zonas de CMET (transparentes en el mapa).

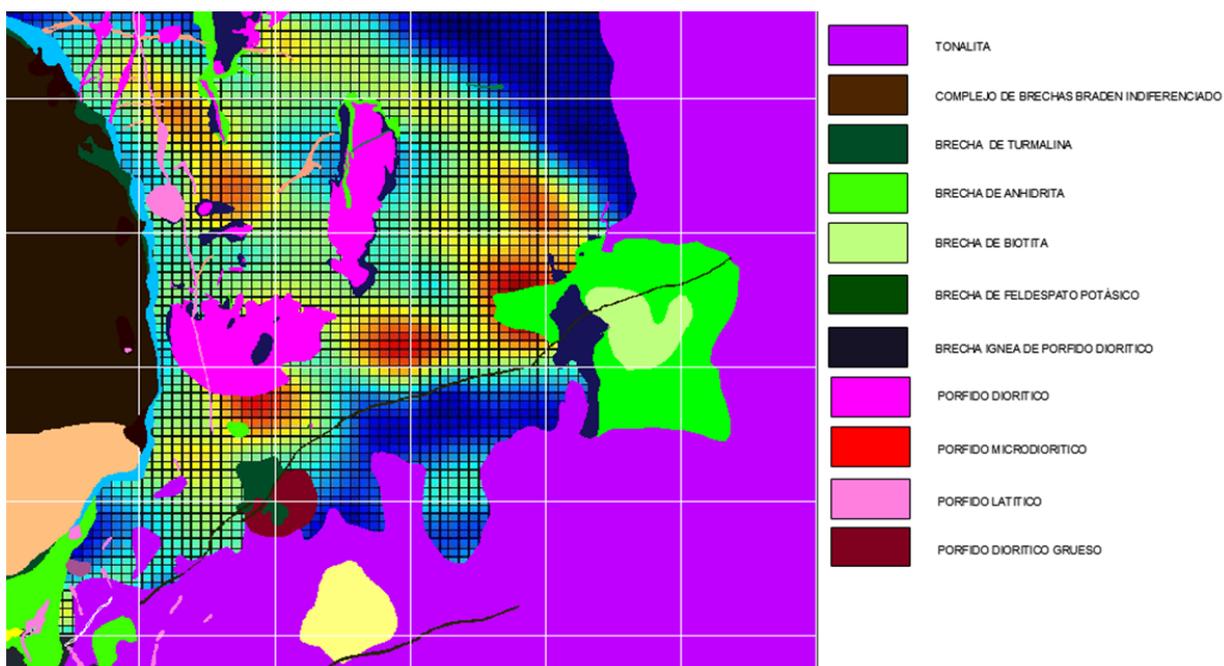


Figura 4.23: Mapa de intensidades unidos con litología en nivel de hundimiento de Esmeralda

La Figura 4.24 (izquierda) muestra una zona de bajo P21 ( $0,03 \text{ est/m}^2$ ) rodeada de P21 altos ( $0,07 \text{ est/m}^2$ ), donde aquella de menor valor coincide con la presencia de pórfido diorítico (color rosa). Mientras que en la Figura 4.24 (derecha) se observa que la gran franja de alta intensidad del nivel de producción ( $0,08 \text{ est/m}^2$  en promedio) coincide en su valor más bajo ( $0,05 \text{ est/m}^2$ ) con la presencia de pórfido diorítico de ese nivel, incluso se observa que el límite oeste de la franja también está acotado por otro cuerpo intrusivo.

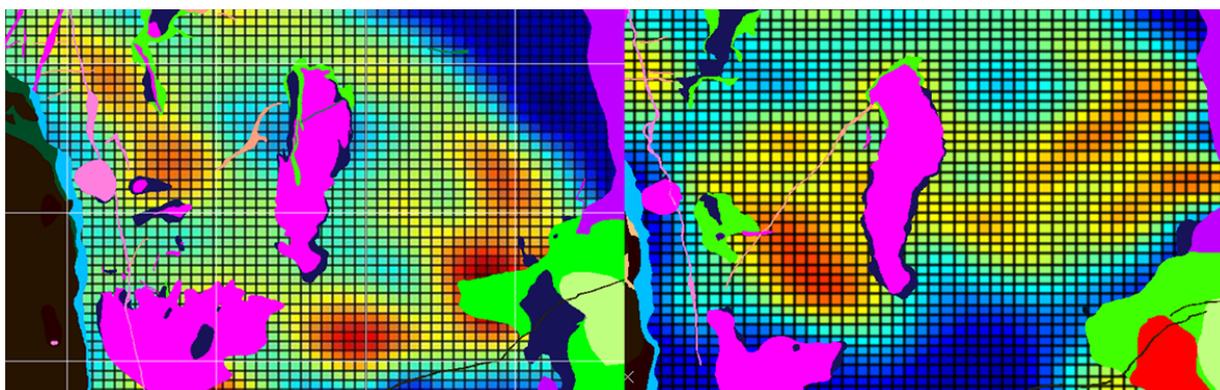


Figura 4.24: Zoom a zona centro de Esmeralda. Izquierda: Nivel de hundimiento. Derecha: Nivel de producción. El color rosa en ambas imágenes corresponde al pórfido diorítico (PDI).

En la Figura 4.25 (izquierda) se observa que la zona de alta densidad de estructuras NW del nivel de hundimiento también está limitada por otros cuerpos distintos al CMET, como brecha de anhidrita, brecha diorítica, y diques con contenido similar al pórfido diorítico.

Uno de los pocos cuerpos distintos al CMET que presenta valores altos de P21 es la brecha de anhidrita, como se observa en la Figura 4.25 (derecha).

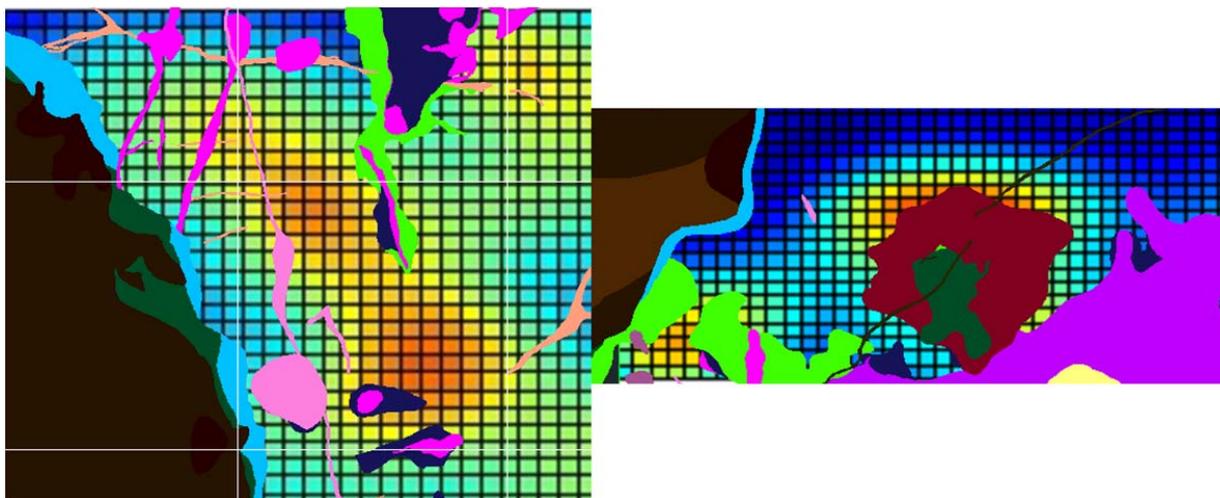


Figura 4.25: Zonas con particularidades de densidad de estructuras y litología. Izquierda: Zona NW del nivel de hundimiento de Esmeralda, altas intensidades delimitado por cuerpos intrusivos (rosas). Derecha: Zona SW del nivel de producción de Esmeralda, altas intensidades en el área de brecha de anhidrita (rojo).

#### 4.5.2.1.2. ReNo

En la Figura 4.26 se observa que por el oeste del mapa la densidad de estructuras se encuentra delimitada por la Dacita (color amarillo), ya que los valores se reducen a aproximadamente 0,01-0,02 est/m<sup>2</sup>, incluso se puede notar que la intensidad sigue el contorno del intrusivo.

La Figura 4.27 (izquierda) muestra como el pórfido diorítico separa dos zonas de alta densidad de estructuras en el nivel de hundimiento, mientras que en la Figura 4.27 (derecha) se puede observar como la zona alargada con P21 altos queda delimitada por el pórfido diorítico y la brecha de anhidrita.

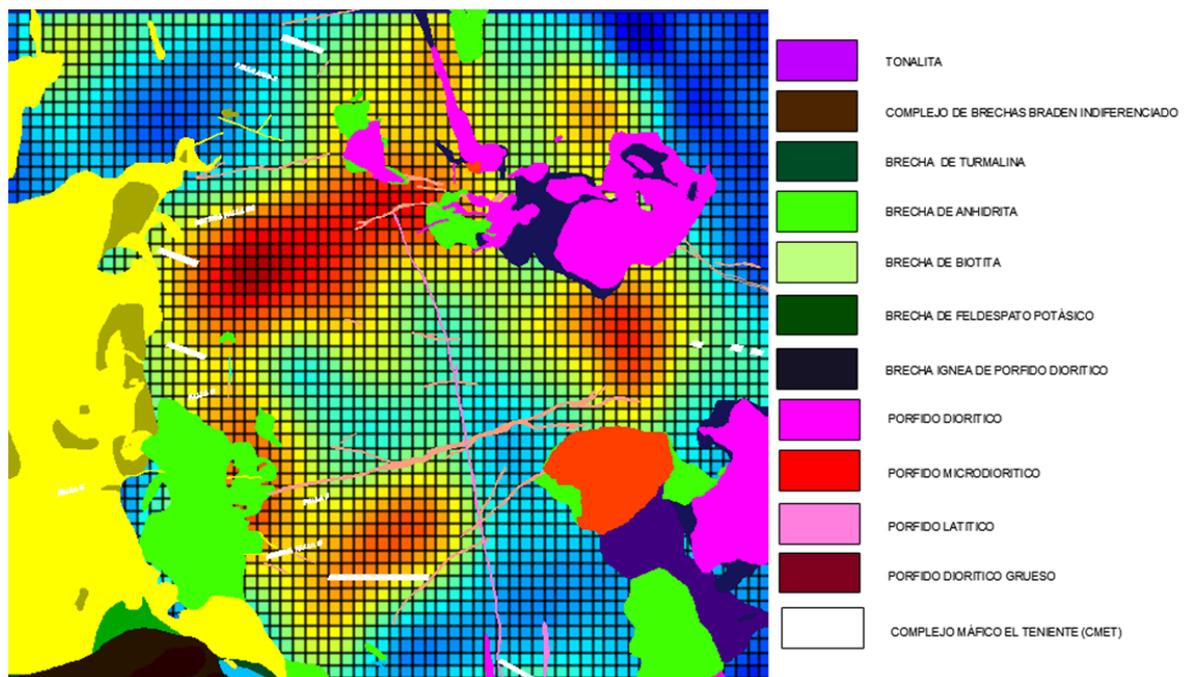


Figura 4.26: Mapa de densidad de estructuras y litología de Reservas Norte Hundimiento.

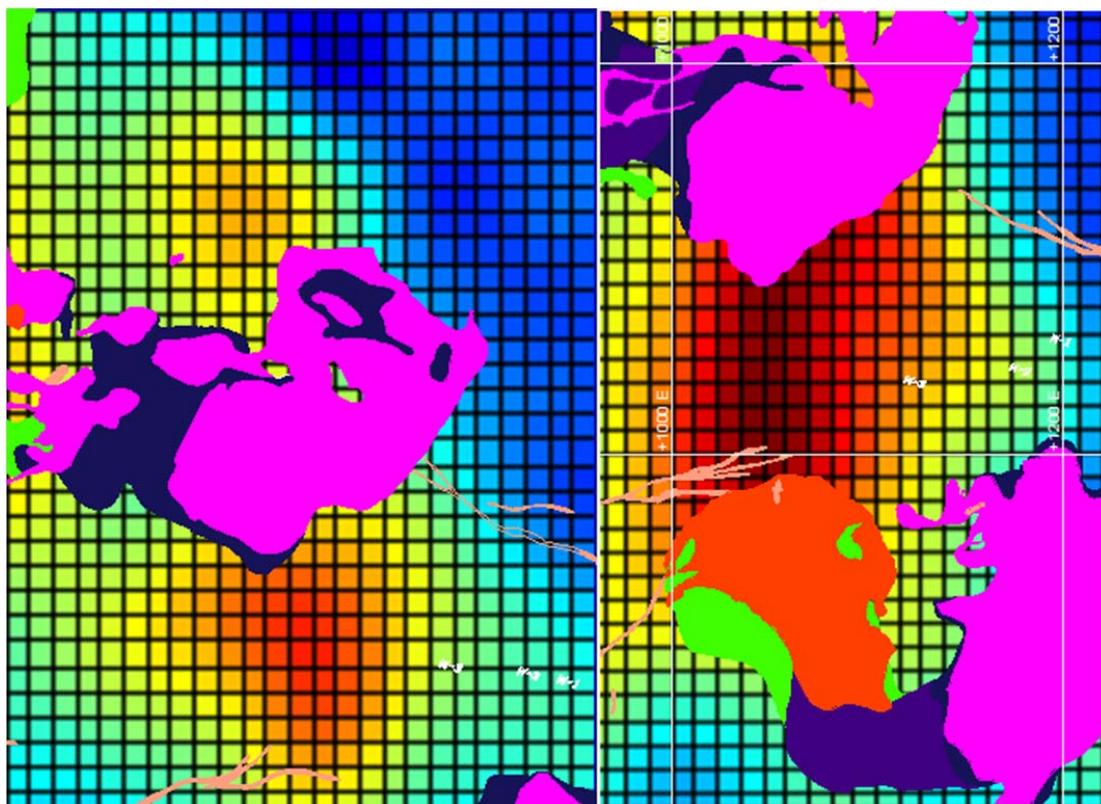


Figura 4.27: Sector NE de Reservas Norte. Izquierda: Nivel de hundimiento, el Pórfido diorítico (rosa) corta dos zonas de alta intensidad. Derecha: Nivel de producción, zona de alta intensidad delimitada por pórfido diorítico (rosa) y complejo de brechas (naranja-verde)

No solo los intrusivos parecen tener un efecto sobre el P21, sino que también los diques o estructuras menos masivas, como se ve en la Figura 4.28.

Nuevamente la única litología que parece mostrar altos valores de intensidad es la brecha de anhidrita, como es posible ver en la Figura 4.29.

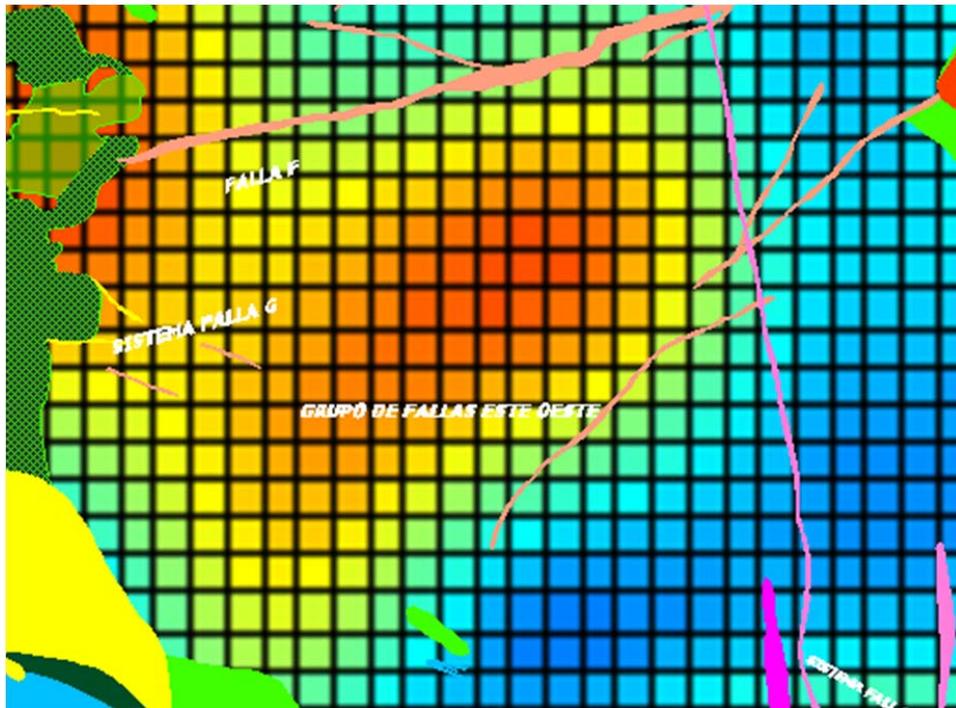


Figura 4.28: Zona de alta densidad de estructuras en Reservas Norte hundimiento. Se encuentra delimitada por grupos de fallas.

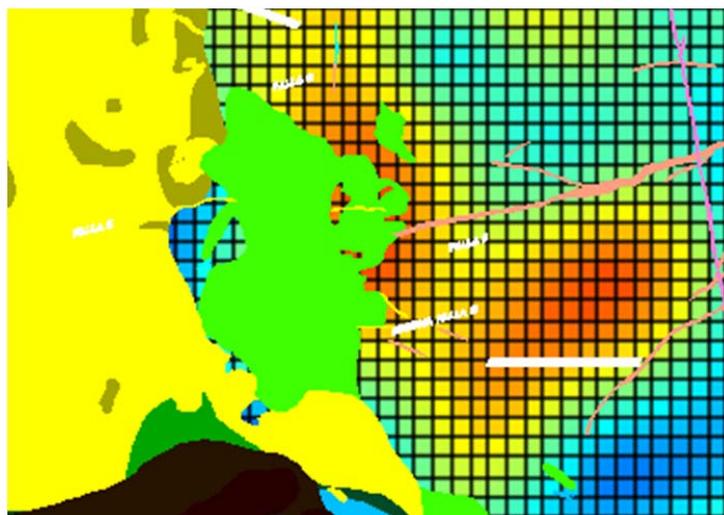


Figura 4.29: Zona de alta densidad de estructuras de Reservas Norte Producción, coincide con la aparición de brecha de anhidrita (verde).

#### 4.5.2.1.3. Intensidades asociadas a cada litología

Tomando en cuenta los resultados anteriores, pareciera que la litología tiene algún control sobre los P21 medidos, reduciendo su valor con respecto a los que muestra el CMET. Sin embargo, hay que tener cuidado con esta conclusión, ya que al ocupar el método de los círculos se involucra toda la información dentro de un radio, por lo que se debería comparar dichos valores con todas las litologías existentes dentro del mismo.

De acuerdo a la Figura 4.30, que contiene las comparaciones con litologías dentro del radio, se puede notar que no es ésta en sí lo que genera los cambios de densidad de estructuras sino mas bien es el contacto entre ellas, siendo particularmente intenso en aquellos contactos que esté involucrado el CMET. Además, la razón probable de por qué las intensidades varían en el orden CMET>Pórfido Diorítico>Brecha de Turmalina sería una respuesta a la resistencia de dichas litologías, que no es otra cosa que una resistencia al fallamiento. Además, el contacto entre dos litologías debería presentar una mayor densidad de estructuras debido a la disminución de sus resistencias.

Un resultado anómalo pareciera ser los altos valores que registra la brecha de anhidrita, ya que en general las brechas de El Teniente poseen resistencias altas (Millán y González, 2011). Una posible respuesta es que esta brecha correspondería a uno de los últimos eventos, por lo que parte de su relleno es más blando y menos consistente, lo que aumentaría la intensidad.

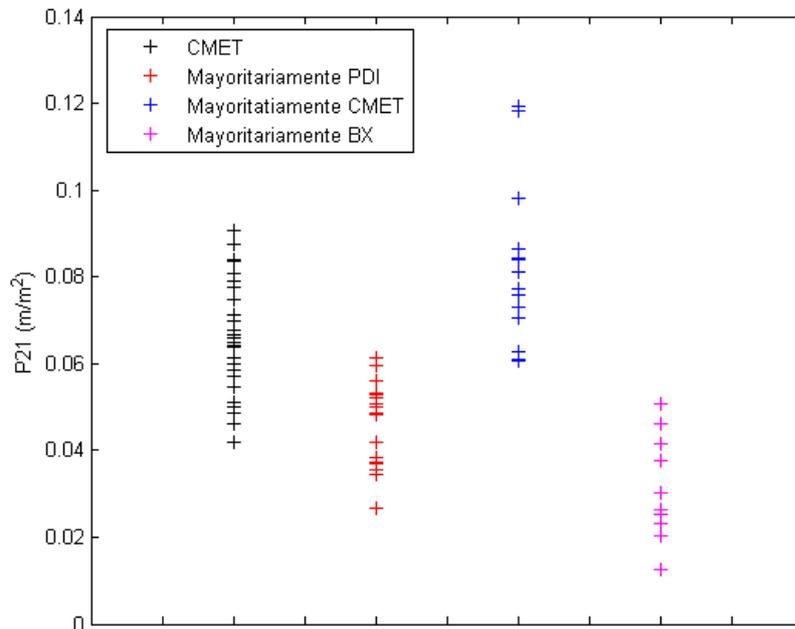


Figura 4.30: Densidad de estructuras en función de las litologías. Contacto indica aquel sector en que se encuentran dos rocas distintas pero predomina cierta litología.

#### 4.5.2.2. P21 vs Sistemas de Fallas

El yacimiento El Teniente presenta distintos sistemas de fallas que se encuentran bien caracterizados (Seguel, 2012). Además, se les suele atribuir la responsabilidad de algunos eventos violentos y el control sobre estructuras menores (SGM-I-033-2012). En la Figura 4.31 se observa que las fallas mayores de ambas minas calzan con las zonas de máxima densidad de estructuras. También en la Figura 4.32 podemos notar que todos los P21 de aquellas zonas que tienen relación con los sistemas presentan P21 altos. Por lo tanto, pareciera que las variaciones de P21 dentro de una misma mina se deberían a la combinación de estos sistemas de fallas más la relación de dureza que presentan los contactos y las litologías.

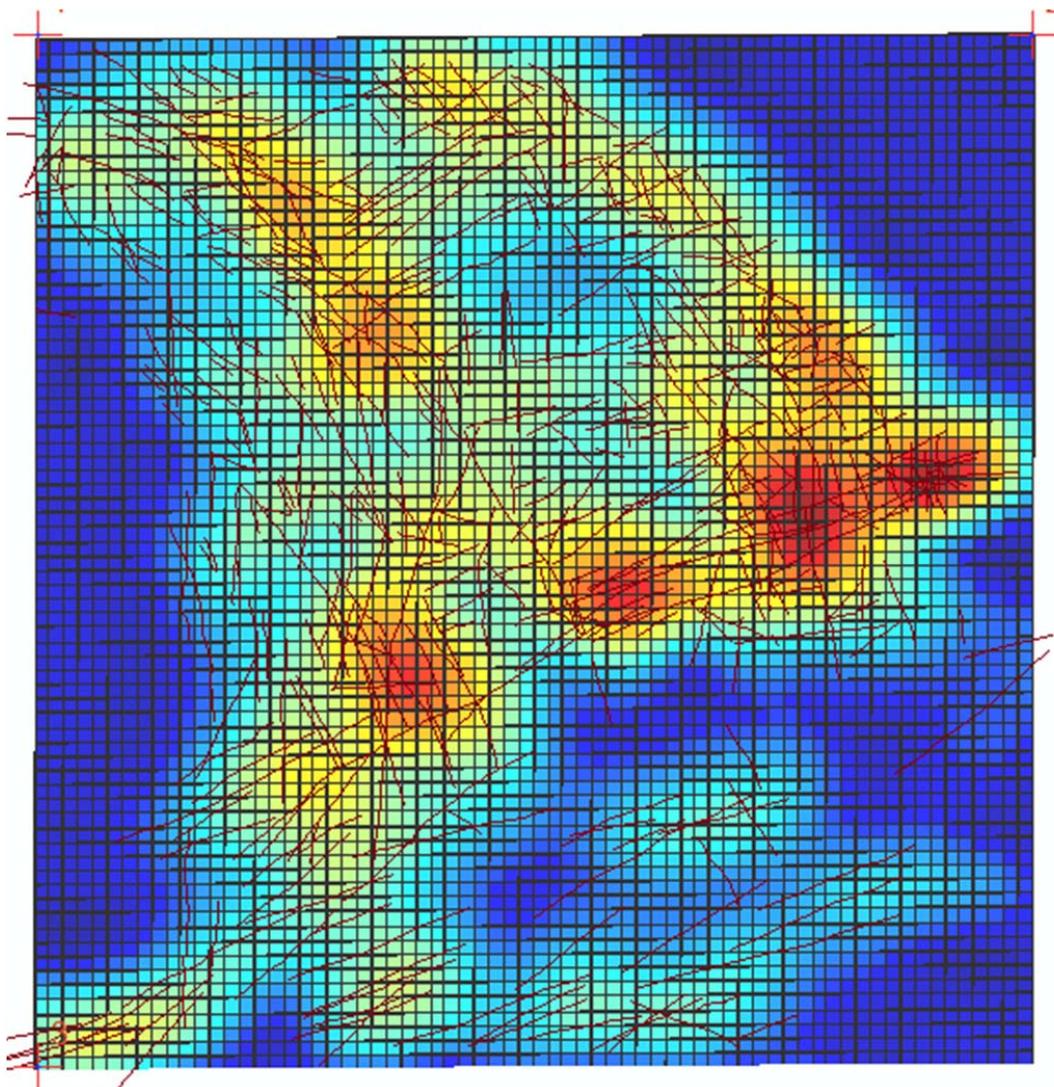


Figura 4.31: Mapa de densidad de estructuras unido con estructuras mayores interpretadas en nivel de Esmeralda Hundimiento.

#### 4.5.3. Diferencias de Intensidad entre ReNo y Esmeralda

Las litologías de ReNo y Esmeralda son muy similares, aunque presentan una diferencia, y es que en el borde oeste de ReNo existe un intrusivo con litología de dacita, sin embargo, esta litología parece más bien disminuir el fallamiento, por lo que se debería esperar que las intensidades de ambas minas fueran similares, no obstante los valores de P21 en ReNo casi duplican los de Esmeralda.

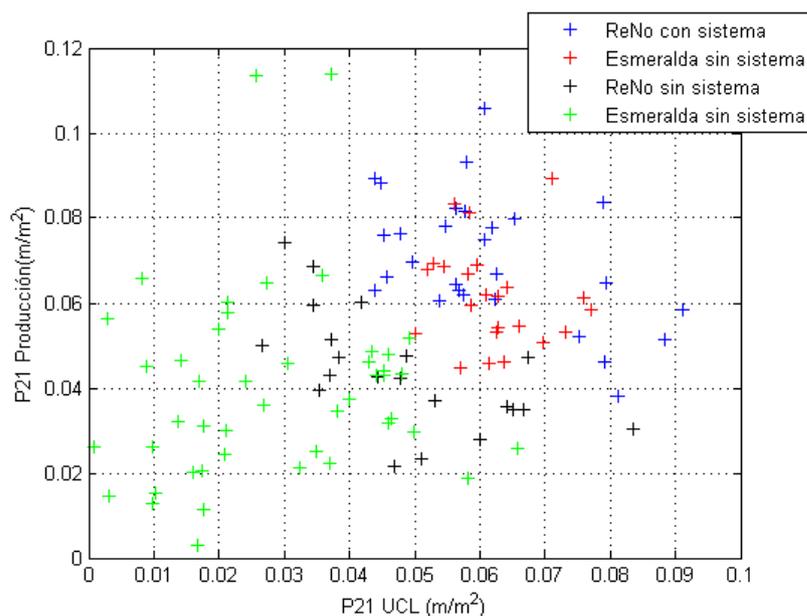


Figura 4.32: Densidad de estructuras en función de sistemas de fallas de Esmeralda y Reservas Norte

#### 4.5.3.1. Diferencia en la densidad de labores

De acuerdo a la Figura 4.33, ReNo posee en promedio una mayor densidad de labores que Esmeralda, por lo que esto podría sugerir que debido a la falta de de información los valores de P21 disminuyan. Sin embargo, la zona norte de Esmeralda tiene la misma densidad de labores que la zona oeste de ReNo y aún así sus P21 máximos son muy distintas (0,12 y 0,20 m/m<sup>2</sup> respectivamente).

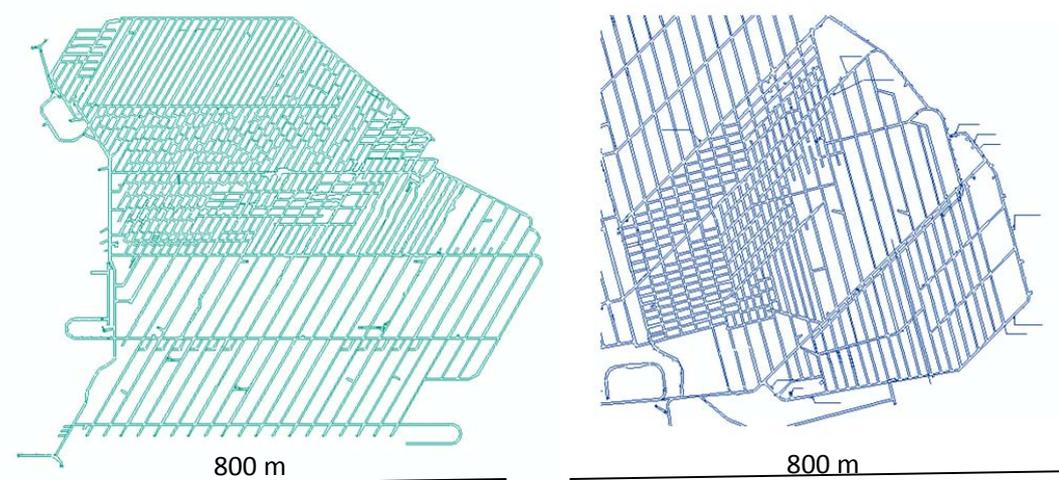


Figura 4.33: Comparación de densidad de labores entre Esmeralda (izquierda) y ReNo (derecha) en sus niveles de hundimiento.

#### 4.5.3.2. Consistencia de estructuras mapeadas con estructuras interpretadas

En los sectores que poseen densidades de estructuras parecidas es esperable que si tenemos números similares de mapeos deberíamos poder interpretar largos similares de estructuras. En la Figura 4.34 se observa que comparativamente Esmeralda tiene más estructuras mapeadas dentro de un círculo de radio 50 m que ReNo, sin embargo, esta última mina tiene más largo de interpretación. Si a lo anterior sumamos que la Figura 4.35 muestra que Esmeralda tiene el doble de densidad de mapeo que ReNo, pareciera que o la interpretación de ReNo esta sobreestimada a o la de Esmeralda se encuentra subestimada.

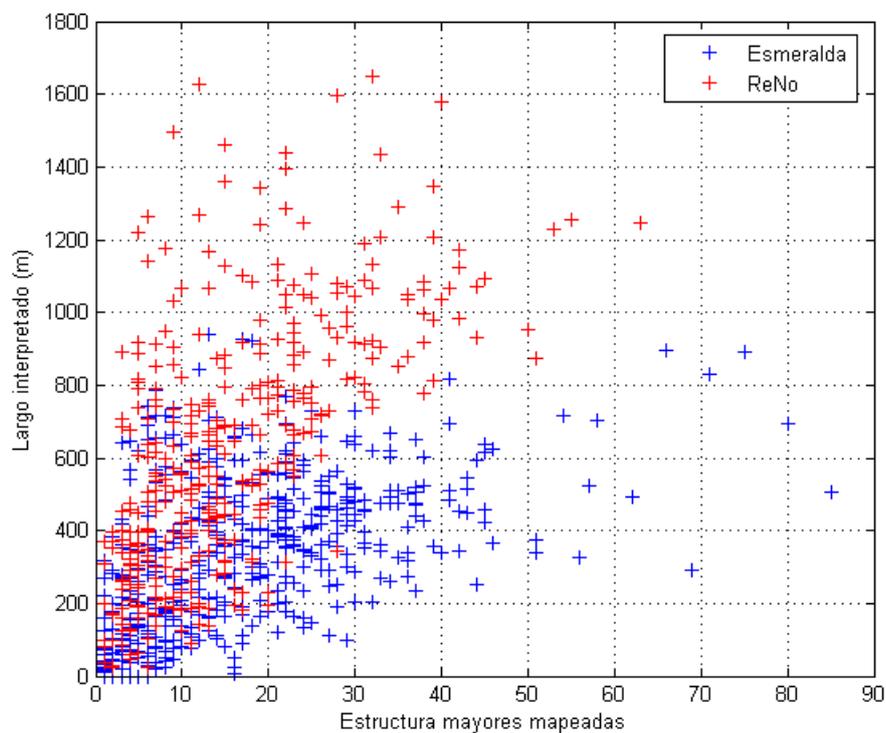


Figura 4.34: Comparación de largo de estructuras interpretadas vs mapeadas en Esmeralda y ReNo

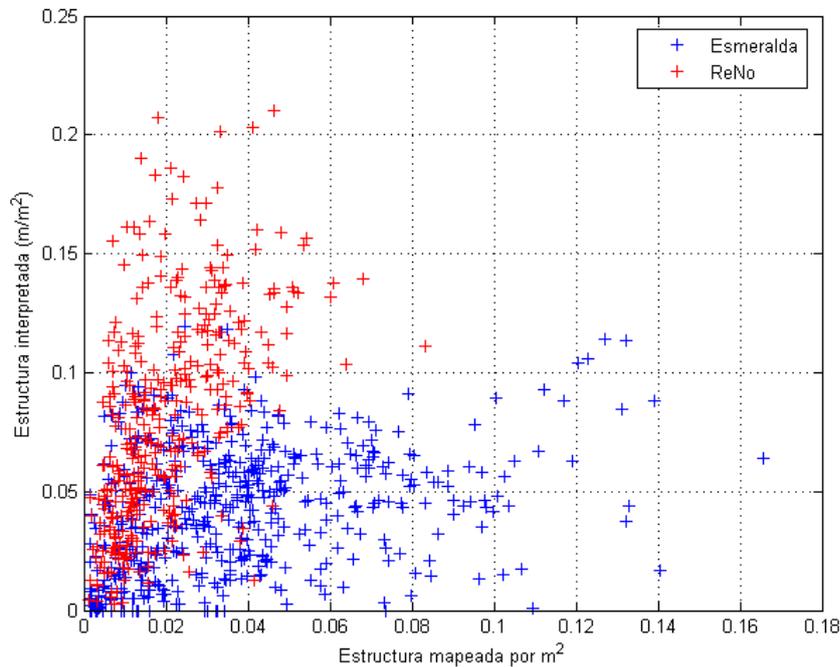


Figura 4.35: Comparación entre ReNo y Esmeralda acerca de estructuras interpretadas en función de densidad de mapeo.

#### 4.5.3.3. Sistemas de Fallas vs P21

Otra diferencia entre ambas minas, son los sistemas de fallas que las afectan (Tabla 5). Particularmente la falla N1, que cruza a ReNo, presenta características de largo, espesor y persistencia mayores que los otros, y de acuerdo a Seguel (2013), dichas particularidades le permiten tener una mayor área de influencia en cuanto al fallamiento, lo que aumenta los valores de P21. Sin embargo, la diferencia de dichos valores con respecto a Esmeralda no es tan grande, aunque sí lo es con respecto a las otras fallas que cruzan ReNo, lo que no se ve reflejado en cambios de P21 en esa zona, pues forman un anillo relativamente homogéneo en cuanto a valores de intensidad. Entonces, lo anterior sugiere que la diferencia de intensidad de ambas minas se debería a una combinación de influencia por sistemas de fallas más una consistencia de interpretaciones distinta.

Tabla 5: Resumen de las características principales de los sistemas de Fallas de las minas ReNo y Esmeralda. Recopiladas desde Seguel (2013)

Sistema	Mina	Largo [m]	Espesor [cm]	Persistencia vertical [m]
N1	ReNo	730	1-50	492
C	ReNo	380	1-20	210
G	ReNo	500	1-15	314
B	Esmeralda	650	1-30	387
P	Esmeralda	700	1-35	472

#### 4.6. Espesor vs Largo

Antes de establecer una relación entre estas dos variables es necesario describir algunas particularidades que están presentes en las diferentes minas y que influyen en que los valores promedios sean distintos entre sí (Tabla 6)

Tabla 6: Resumen de espesores de estructuras mayores en minas Esmeralda y ReNo

Variable	Promedio (cm)	Valor mínimo (cm)	Valor Máximo (cm)
Espesor mínimo Esmeralda	1,049	0,1	50
Espesor máximo Esmeralda	2,44	0,7	50
Espesor típico Esmeralda	1,43	0,7	50
Espesor mínimo Reservas Norte	1,39	0,1	30
Espesor máximo Reservas Norte	3,01	0,7	50
Espesor típico Reservas Norte	1,89	0,7	30

##### 4.6.1. Espesores en Esmeralda

En la Tabla 7 se observa que el 90% de las estructuras mayores posee un espesor típico menor a los 2 cm. Al verificar la ubicación de aquellas estructuras del porcentaje restantes, éstas presentan cierta continuidad, las que corresponden a las trazas de los sistemas de fallas B y P (Figura 4.36)

Tabla 7: Resumen de la distribución de espesores típicos de mina Esmeralda

Rango espesor [cm]	Frecuencia	% Acumulado
<1	594	23.11
1	1174	68.79
1.5	240	78.13
2	327	90.86
3	150	96.69
5	50	98.64
10	25	99.61
50	10	100

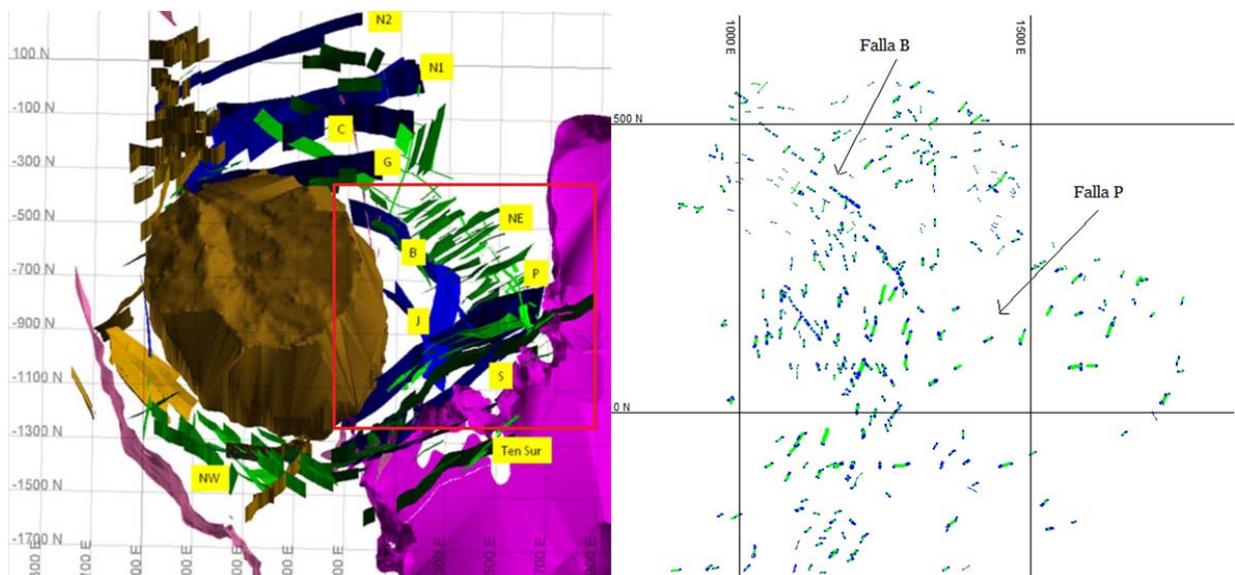


Figura 4.36: Estructuras de Esmeralda hundimiento aplicando un filtro de espesor típico mayor a 2 cm. Se observa que la mayoría de éstas pertenecen a los sistemas de fallas B y P.

De acuerdo a la Tabla 8, se observa que los promedios de aquellos mapeos asociados a estas fallas poseen valores 3 veces más altos que aquellos no asociados a ningún sistema, además estos últimos descienden cerca del 20%, con respecto a los promedios de la mina.

Tabla 8: Resumen de espesores divididos entre los asociados al sistema de falla B, P o sin asociación

Variable	Cantidad de estructuras	Promedio (cm)	Valor mínimo (cm)	Valor máximo (cm)
Espesor típico falla B	190	3.2	1	50
Espesor típico falla P	76	4.4	1	20
Espesor mínimo sin sistema	2306	0.89	0.1	5
Espesor máximo sin sistema	2306	1.79	0.7	5
Espesor típico sin sistema	2306	1.20	0.7	5

#### 4.6.2. Espesores en ReNo

En la Tabla 9 se observa que el 81% de las estructuras mayores posee un espesor típico menor a los 2 cm. Al evaluar aquellas estructuras restantes, mayores a 3 cm, se puede notar en la Figura 4.37, estructuras continuas en la zona centro del mapa, la que corresponde a la traza de la Falla N1.

Tabla 9: Resumen de la distribución de espesores típicos de mina Reservas Norte

Clase	Frecuencia	% Acumulado
<1	264	13,87
1	656	48,34
1.5	231	60,48
2	406	81,82
3	199	92,28
5	82	96,58
10	49	99,16
50	16	100

En la Tabla 10 se observa que el espesor típico promedio del sistema N1 es tres veces más alto que aquellos espesores que no están asociados a algún sistema de fallas. A pesar de que C y G poseen valores promedios que son más altos que aquellos sin sistema, no llegan ni siquiera a duplicarlos.

Tabla 10: Resumen de espesores divididos entre los asociados al sistema de falla N1, C, G o sin asociación

Variable	Cantidad de estructuras	Promedio (cm)	Valor mínimo (cm)	Valor máximo (cm)
Espesor típico Falla N1	315	5.81	1	50
Espesor típico Falla C	240	2.31	1	20
Espesor típico Falla G	80	1.89	1	15
Espesor mínimo sin sistema	1269	1.05	0.1	5
Espesor máximo sin sistema	1269	2.26	0.7	8
Espesor típico sin sistema	1269	1.46	0.7	8

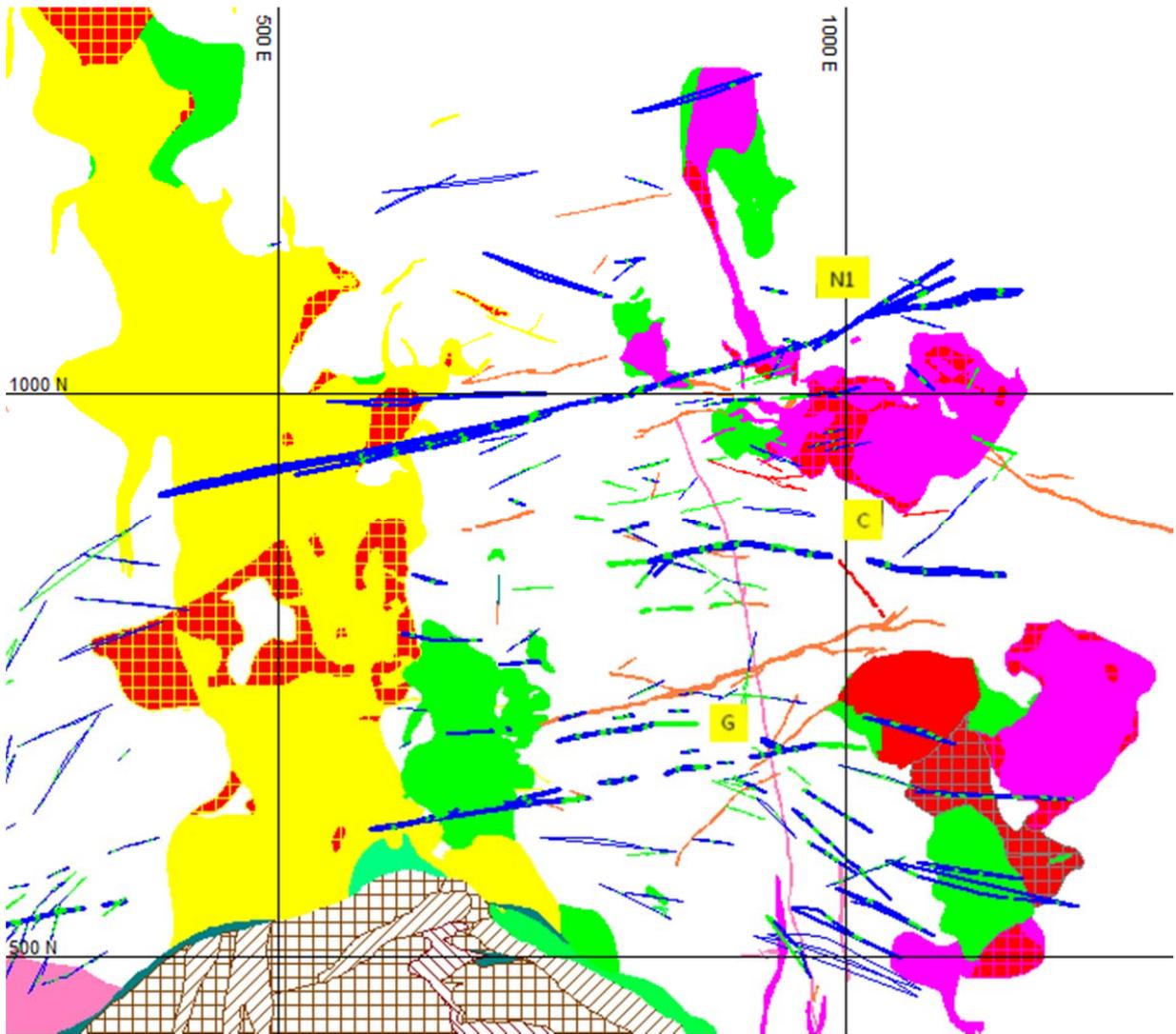


Figura 4.37: Estructuras con espesor típico mayor a 3 centímetros en Reservas Norte. Se reconoce el sistema de Falla N que corta a la mina con orientación E-W

#### 4.6.3. Comparación de espesores típicos en los distintos sistemas de fallas

El espesor típico promedio de ReNo es mayor que el de Esmeralda, esto se debe principalmente al sistema de fallas N1 que posee espesores que en promedio son de 5,81 cm, siendo los máximos de todo el yacimiento (Seguel, 2013). Esmeralda también tiene espesores relativamente altos en comparación al resto de la mina, no obstante el número de mapeos asociados a éstas no son tantos ni sus valores tan altos como los de ReNo. De todos modos, si se comparan los espesores promedios típicos, quitando los asociados a estos sistemas, las estructuras de ReNo siguen siendo más anchas.

#### 4.6.4. Relaciones de espesor con largo

En la Tabla 8 se observa que a mayor espesor de los sistemas de fallas, el largo promedio, entendiéndose como la longitud horizontal, tiende a ir en aumento. Esta relación también podría cumplirse para estructuras que no pertenecen directamente a las fallas mayores de la mina, ya que los largos y espesores de ReNo son valores más altos que los de Esmeralda.

En la Figura 4.38 se muestra la curva teórica de tipo lineal, construida en base tanto a los espesores promedios típicos de estructuras pertenecientes a los sistemas de fallas como aquellas que no, además se ha incorporado el rango de espesores presentes. Fallas que poseen largos de 100 a 200 m presentan espesores menores a 8 cm, las de 300 a 400 m exhiben espesores menores a 20 cm, mientras que las más largas (500 a 750 m) presentan espesores de máximo 50 cm.

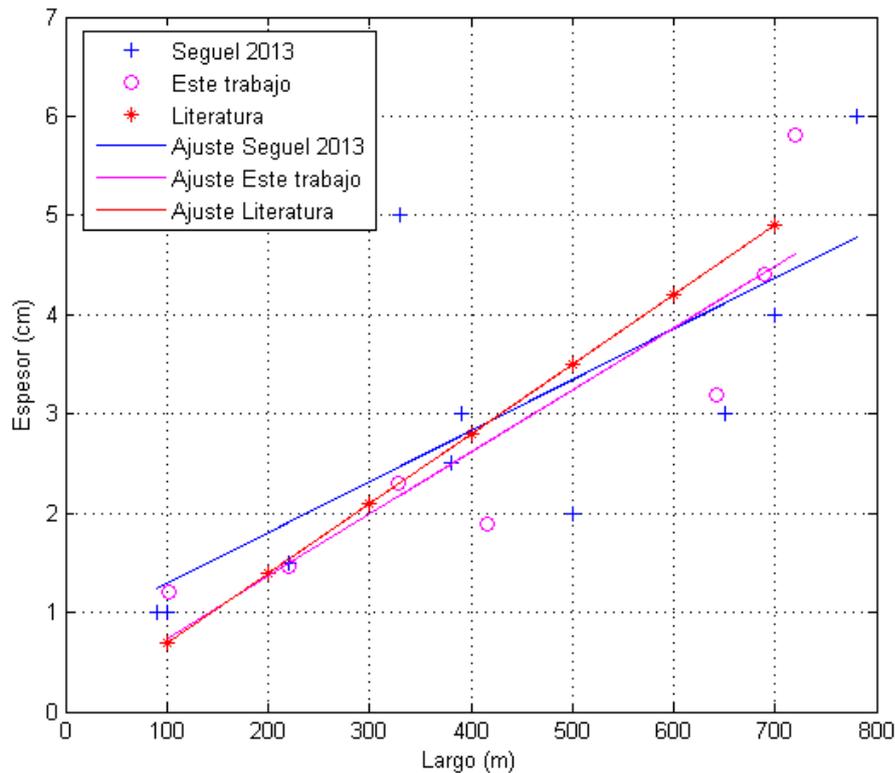


Figura 4.38: Relación de largo de las estructuras con su espesor, creadas a partir de la asociación de las estructuras mapeadas con un sistema de fallas. Además se muestran las curvas creadas por Seguel (2013) y Gudmundsoon (2000).

En la Figura 4.38 se observa que al comparar la curva con aquellas de la literatura académica (Gudmundsson, 2000) ésta coincide en espesores menores a 2 cm, pero para espesores mayores, la curva toma valores diferentes, que sin embargo, se acercan a la curva creada por Seguel (2013) en base a las grandes fallas del yacimiento. Esta nueva curva puede ser interpretada como una actualización a la de Seguel, ya que incorpora valores pertenecientes al yacimiento, pero ajenos a los sistemas de fallas, lo que permite añadir datos de largos y espesores más pequeños.

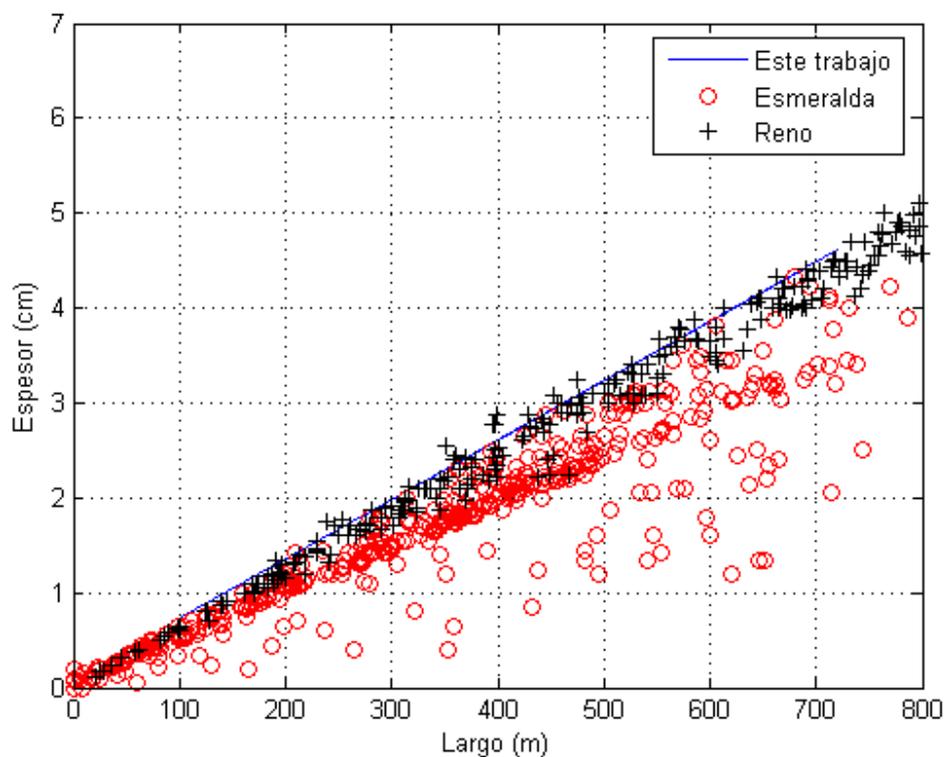


Figura 4.39: Comparación de largos interpretados y espesores medidos, de ambas minas, con la curva propuesta en 4.6.4

En la Figura 4.39 se observa que al cotejar los largos interpretados con los espesores medidos utilizando la curva propuesta, la mina Reservas Norte muestra que sus datos se ajustan a la recta, lo que indica una buena relación espesor/largo y, por consiguiente, una buena interpretación estructural. Por otra parte, los datos de Esmeralda se ubican bajo la curva, es decir poseen un largo interpretado menor (18% menos en promedio) para un espesor dado, lo que indica que el mapeo subestima el

largo de las estructuras, esto corrobora la conclusión obtenida en el punto 4.5.3.2 acerca de que una de las minas presentaba problema de sobrestimar o subestimar los datos.

#### 4.7. Geometría fallas mayores

Para obtener una geometría real, los parámetros mínimos necesarios son: ondulación de fallas, largo horizontal, amplitud y extensión vertical. El último parámetro escapa al alcance y objetivos de esta memoria, mientras que el segundo ha sido tratado en el punto 4.6.4

##### 4.7.1. Ondulación de Fallas

La ondulación se determina en base a la orientación en el plano horizontal y vertical, es decir, es dependiente de la traza y el manteo de la falla (Figura 4.40). Se puede calcular como la variabilidad de rumbos con respecto al rumbo medio de los segmentos que constituyen la traza de una falla o como la de los segmentos en un sistema, siempre que se determinen en el plano horizontal.



Figura 4.40: Esquema de ondulación. Es necesario notar que para simplificar la medición este debe ser hecho sobre un plano horizontal

En la Figura 4.41 se observa que las estructuras pueden ser divididas en tres tramos distintos: aquellas con ondulación alta ( $>50^\circ$ ), media ( $25-50^\circ$ ) y baja ( $<25^\circ$ ). Estos valores pueden interpretarse como se segmentan las trazas de las fallas. En el caso de la falla B, que posee ondulación alta, ésta está conformada de varias ramificaciones de

diversos rumbos. Para aquellas de tipo medio, como la falla N1, C, P, suelen dividirse casi al final de sus trazas. Finalmente, las bajas suelen ser rectas y carecen de divisiones, como la falla G o las estructuras cortas que no pertenecen a ningún sistema.

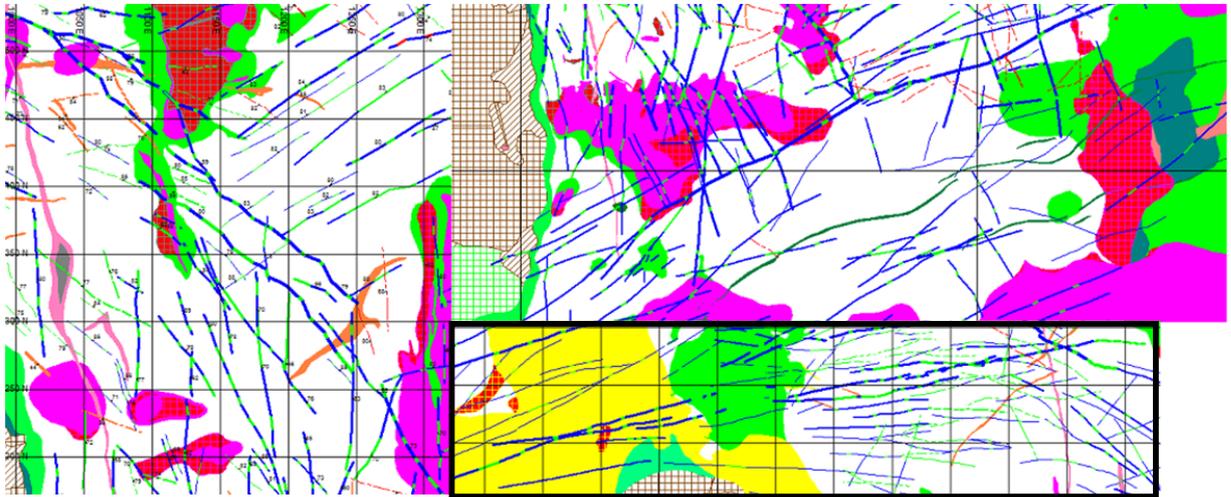


Figura 4.41: Sistemas con distinta ondulación. Izquierda: Alta ondulación, anastomosada, corresponde a Falla B. Derecha arriba: Ondulación media, suelen ser rectas y se bifurcan al final de éstas, corresponde a Falla P. Derecha abajo: Ondulación baja, suelen ser rectas, corresponde a la Falla G.

#### 4.7.2. Amplitud de Fallas

La amplitud es la variabilidad máxima con respecto a la traza media de la falla en el plano horizontal (Figura 4.42). Es similar a la ondulación, con la diferencia que ésta se mide en metros, mientras que la ondulación es en grados.

Las amplitudes de una falla deben ser comparadas con respecto a los largos que éstas presentan, ya que por sí solas no aportan información para categorizarlas. De la Figura 4.44, destacan particularmente la falla C que presenta una ondulación relativamente alta a las otras a pesar de ser la más pequeña de los sistemas.

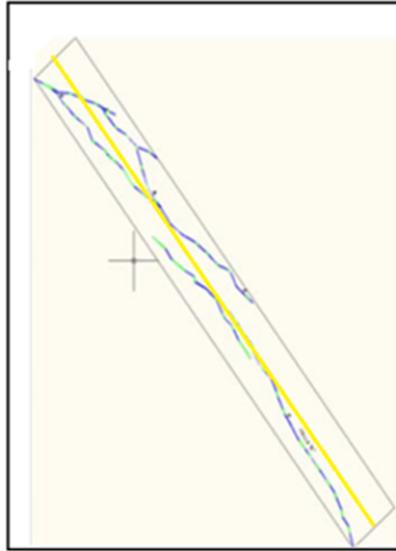


Figura 4.42: Representación grafica de amplitud. Tomad de Seguel (2013)

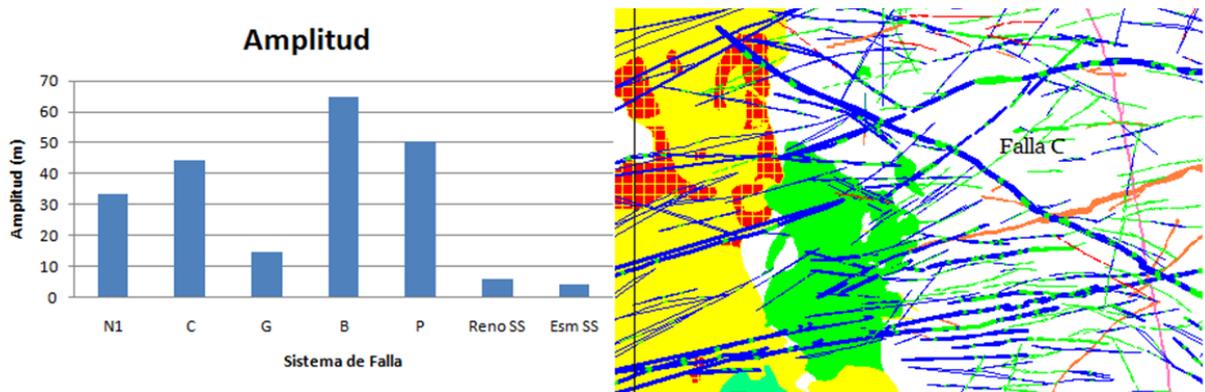


Figura 4.43: Amplitud medida en los sistemas de fallas. Destaca el caso de la falla C, es de valor alto, sin embargo el largo de la falla es la más baja de todas

### 4.7.3. Ondulación vs Amplitud

De acuerdo a la Figura 4.44, existe una relación lineal entre la ondulación y la amplitud, esto es coherente debido que a medida que aumenta la variabilidad de rumbos debería aumentar también la amplitud. Sin embargo, pueden existir excepciones, como en el caso de que la ondulación sea de un ángulo alto pero la traza acabe a los pocos metros, como sucede en las ramificaciones de algunas estructuras mayores de baja longitud. También puede suceder el caso contrario en que sea una

ondulación de bajo ángulo, pero la falla lo suficientemente larga, algo que parcialmente sucede en la Falla P.

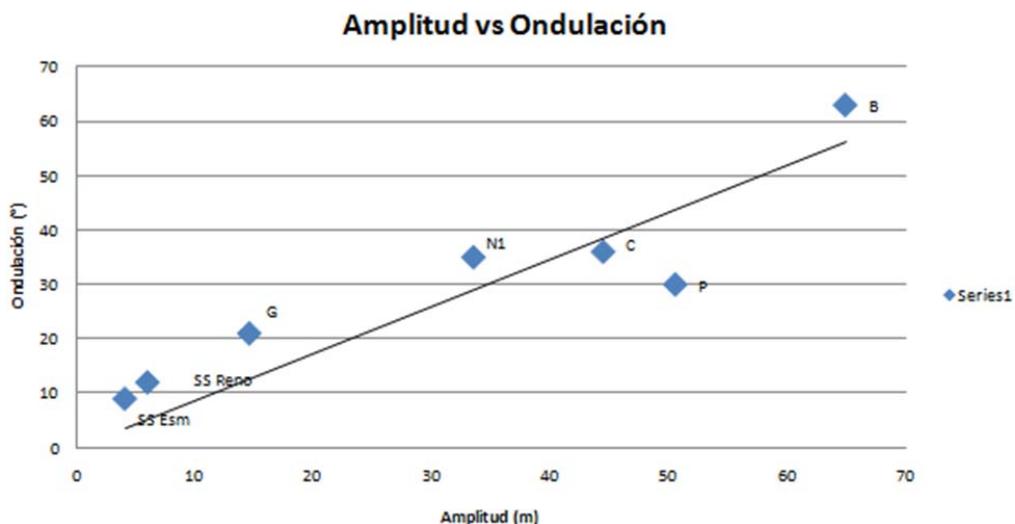


Figura 4.44: Ondulación vs Amplitud de las fallas de mina El Teniente. Presentan cierta tendencia lineal, a excepción de ellas que muestran ramificaciones en el final de sus trazas o que son lo suficientemente largas para enmascarar el efecto de la amplitud.

#### 4.7.4. Amplitud vs Largo

En la Figura 4.45 se puede observar una tendencia lineal en que la amplitud de las fallas aumenta a medida que crece el largo horizontal de ellas. Sin embargo, existe un par de puntos que no cumplen esta relación, debido a sus propias particularidades. Las fallas B y C poseen una amplitud alta debido a que sus segmentos se suelen ramificar. El caso contrario es la falla G, la cual tiende a ser completamente lineal, por lo que sus amplitudes son bajas.

#### 4.7.5. Amplitud vs Espesor

Se observa en la Figura 4.46 que existe una relación lineal entre el espesor y la amplitud, donde una aumenta con respecto a la otra. La única particularidad es el sistema N1, el cuál posee el espesor más alto de la serie y solo una amplitud media. Una posible respuesta a esto se debe a que la falla N1 posee la mayor longitud horizontal de todas y por ende posee un espesor alto, siendo entonces el factor de longitud más predominante que la amplitud con respecto al espesor.

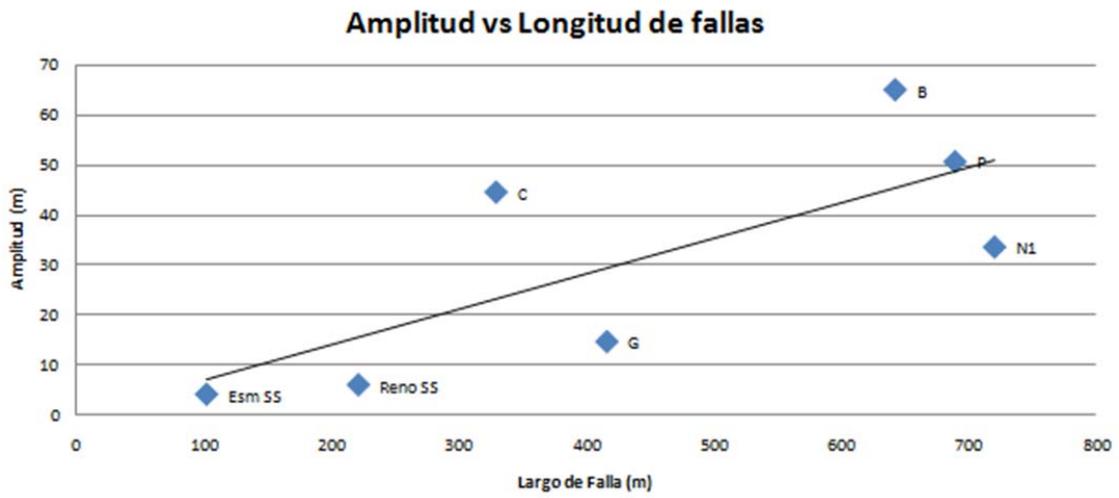


Figura 4.45: Relación de amplitud con Largo de falla. Existe una tendencia lineal salvo en aquellas fallas que poseen ramificaciones (C y G).

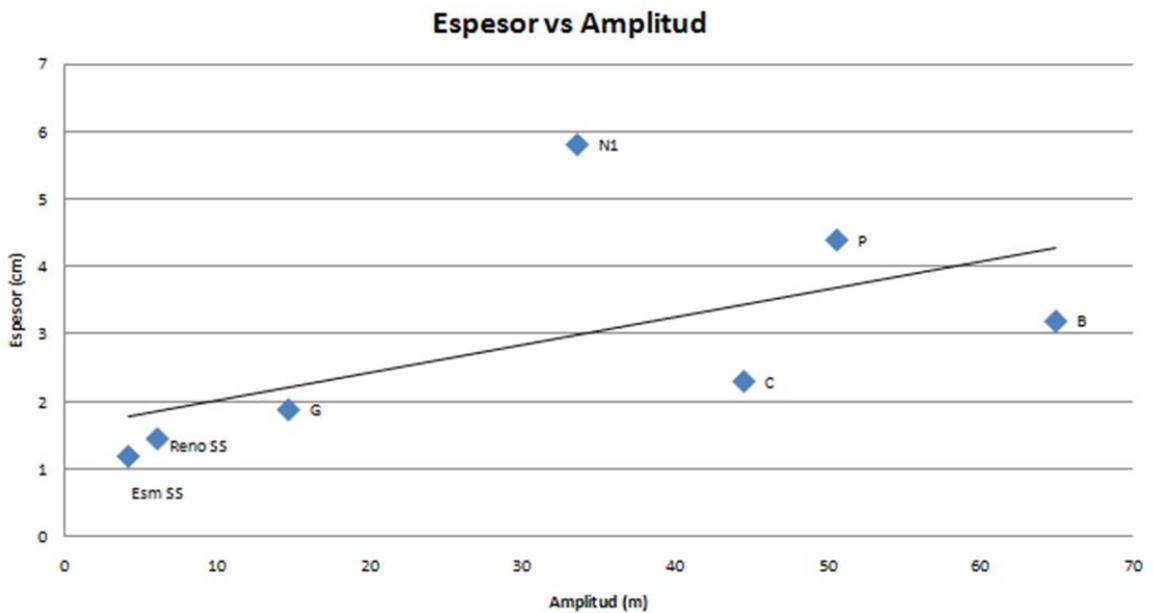


Figura 4.46: Relación de espesor típico medio con amplitud de fallas.

#### 4.8. Recomendaciones de mapeo

Para poder generar modelos geológicos o planos estructurales es necesario levantar información acorde a la escala de trabajo. En el caso de la escala mina esta información parece estar mal distribuida al dejar lugares casi sin mapear y otros con más información de la realmente necesaria.

##### 4.8.1. Mapeo necesario

La Figura 4.47 ha sido construida en base a los mapeos de ambos niveles de Esmeralda, siendo utilizados radios que varían desde 10 a 100 metros, de esta manera el número de mapeos puede aumentar en cuanto a variabilidad. Se observa que la distribución de los puntos tiende a una forma de embudo, en donde su zona angosta se encuentra a valores más altos. Es importante notar que incluso separando los puntos de acuerdo a su densidad de mapeo, éstos tienden a la forma dicha anteriormente. Al parecer sobre los 60 mapeos en un radio entre 10 y 100 metros, éstos tienden a un P21 común, esto se puede interpretar como un “mapeo equivalente”, es decir, el número de mapeos necesarios para que exista una distribución suficiente para que otra variable se estabilice.

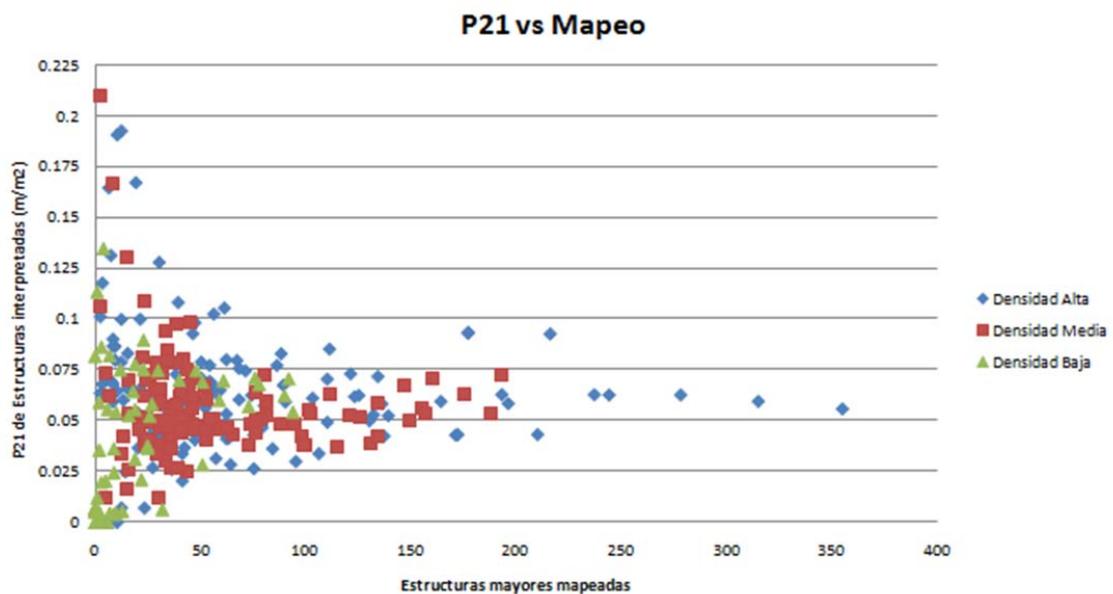


Figura 4.47: Densidad de estructuras en función de estructuras mayores mapeadas en Esmeralda. Se usaron radios desde 10 a 100 metros

#### 4.8.2. Área a cubrir

La Figura 4.48 ha sido construida de igual modo que la del punto 4.8.1. Se observa que la distribución de los puntos tiene forma de embudo con su zona más angosta en valores más altos. Además, aparentemente sobre los 4000 m<sup>2</sup> de labores el valor de intensidad se estabiliza, formando un “área equivalente” similar a la de mapeos expuesta en el punto 4.8.1. Uniendo ambos resultados, pareciera que el óptimo para tener bien caracterizadas zonas de radio menor a 100 metros es al menos tener 60 estructuras o 750 metros de labores mapeados.

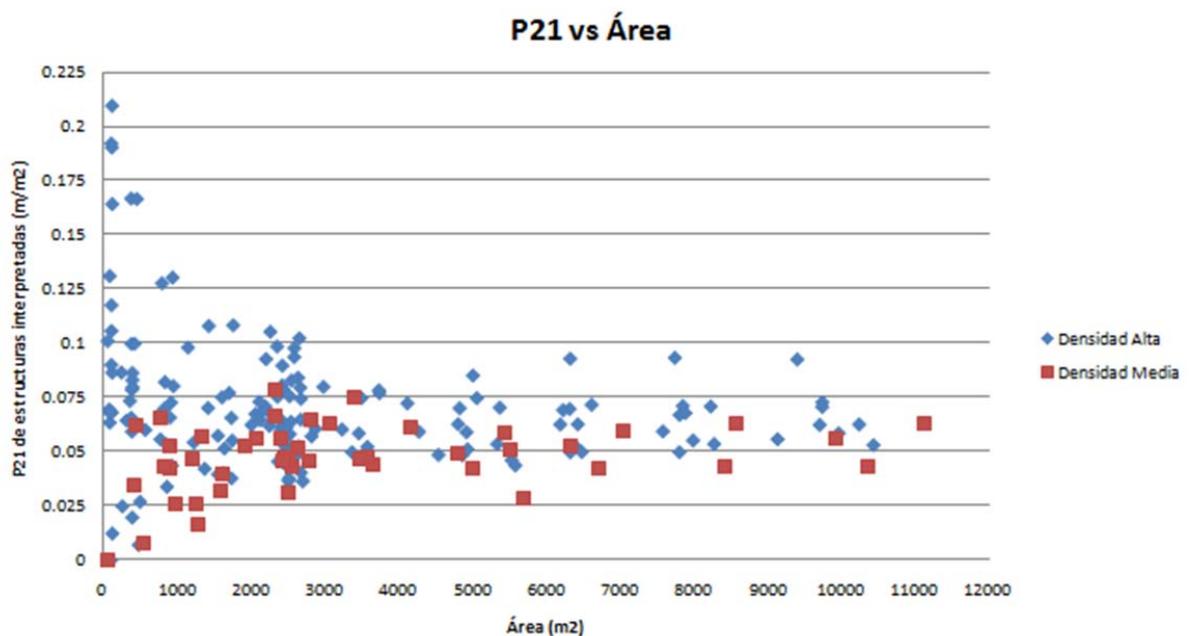


Figura 4.48: Densidad de estructuras en función de área mapeadas en Esmeralda. Se usaron radios desde 10 a 100 metros

## 5. Conclusiones

Las estructuras mapeadas en los sectores de producción y hundimiento de las minas Esmeralda y Reservas Norte presentan, en ambos niveles, similar **orientación** y **espesor**, lo que corrobora que en 17 metros de diferencia de cota las características geológicas no varían considerablemente. Sin embargo, cuando se comparan las estructuras interpretadas, se observa que existe una gran variación de P21 en las mismas coordenadas a diferentes cotas.

Los resultados de este estudio muestran que existen diferencias de densidad de estructuras (P21) cuando se consideran las fallas interpretadas: entre ambos niveles de una mina, dentro de un solo nivel y entre dos minas del mismo yacimiento. Las razones para cada caso son distintas: estadísticas, geológicas o una mezcla de ambas. De acuerdo a esto es posible concluir que:

- 1) Entre dos niveles de una misma mina: Las discrepancias se deben a variables netamente estadísticas, ya que la diferencia en densidad de labores, donde el nivel de producción notoriamente presenta más área posible de visualizar, permite obtener más mapeos y mejores interpretaciones. En casos donde la densidad de mapeo y el número de estructuras son similares (diferencias no mayores al 10% y 5%, respectivamente), los valores de P21 nunca son más de un 8% diferentes entre sí.
- 2) Dentro de un solo nivel: En zonas que presentan densidad de mapeos similares y sobre el estándar mínimo establecido en este estudio (0,04 estructuras/m<sup>2</sup>), la diferencia de densidad de estructuras, aparentemente, se debe a características geológicas, en particular litologías y zona de contactos. Los valores máximos de P21 son alcanzados en la zona de contactos, destacando particularmente aquellos en los que se encuentra involucrado mayoritariamente la roca caja (CMET).
- 3) Entre dos minas del yacimiento: A pesar de presentar litologías similares los P21 obtenidos para las estructuras interpretadas de ReNo y Esmeralda son diferentes. Esmeralda presenta más estructuras mapeadas (reflejado en su densidad de mapeo) y menos largos interpretados (reflejado en el P21) que ReNo.

Por otra parte, utilizando todos los datos existentes en El Teniente para estructuras de espesores mayores 0,7 cm, se obtuvo una relación lineal entre los

espesores típicos y la traza de las estructuras mayores. Esta relación coincide con la planteada por Gudmundsoon (2000) para espesores menores a 2 cm. Además, para espesores sobre los 3 centímetros, la curva obtenida coincide con la creada por Seguel (2013) para las fallas mayores de El Teniente.

Al cotejar los datos se observa que las fallas interpretadas de Reno se ajustan a la curva obtenida, indicando una buena correlación largo/espesor. Sin embargo, las fallas interpretadas de Esmeralda presentan un menor largo para un espesor considerado.

Lo anterior muestra que el mapeo final de Esmeralda, que incluye estructuras interpretadas, subestima el largo de las fallas, por lo que se recomienda hacer trabajos para complementar la interpretación actual.

## 6. Bibliografía

- Álvarez, L. (1990). *Perfil de alteración & mineralización supérgena en el Yacimiento El Teniente, Rancagua, Chile*. Antofagasta: Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería & Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas.
- Arevalo, A., & Floody, R. (1995). *Modelo global de alteración & mineralización. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano & largo plazo*. Rancagua: CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología.
- Arredondo, C. (1994). *Distribución, caracterización & génesis de los cuerpos de brecha en el sector central-este del yacimiento El Teniente*. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Geología,.
- Baros, M. (1995). El Teniente, Los Hombres del Mineral: Santiago. *Grafica Andes* , 500.
- Börguel, R. (1983). Geografía de Chile. *Tomo Geomorfología* , 182.
- Brzovic, A. 1996. Geología y geotecnia sector Quebrada Teniente. Informe de Avance N° 5, 11p
- Brzovic, A. (2014). Formulación Fallas, *in prep*, API 2015. Rancagua.
- Burgos, L. (2002). *Caracterización de las Andesitas de la Mina El Teniente*. Concepción: Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento Ciencias de la Tierra.
- Camus, E. (1975). Geology of the El Teniente ore body with emphasis on wall-rock alteration. *Economic Geology* , 1341-1372.
- Cannel, J. (2005). *El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile*. Tasmania: University of Tasmania.
- Charrier. (1973). Geología Regional de la provincia de O'Higgins & Colchagua. *Publicación INEN*, (págs. 1-69). Santiago.
- Charrier. (1983). *Informe geológico de la Hoja El Teniente, escala 1:250.000*. Santiago: Convenio Departamento de Geología, Universidad de Chile - SERNAGEOMIN.
- Charrier, R. (1981). Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the Central Argentinean-Chilean Andes (32°-35°S) and chronology of their tectonic evolution. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie* , 1, 334-335.
- Charrier, R., & Munizaga, F. (1979). Edades K-Ar de Volcanitas Cenozoicas del Sector Cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34° 15 LS). *Revista Geológica de Chile* , 7, 44-51.
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher, C., Mark, N., Zapatta, F., y otros. (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* , 393-442.

Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher, I., Spichieger, S., & Zapatta, F. (1994). Nuevos antecedentes estratigráficos & estructurales para las formaciones Coya Machalí & Abanico, entre los 33°50' & 35° S, Cordillera Principal Chilena. *En Congreso Geológico Chileno*, (págs. 1316-1319). Concepción.

Cuadra, P. (1986). Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente & áreas adyacentes. *Revista Geológica de Chile*, 3-26.

Enrione, A. (1972). *Estabilidad de los terrenos del área de Alto Colón*. Rancagua: Sociedad Minera El Teniente, Departamento de Geología.

Falcón, M., & Rivera, O. (1998). *Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000*. Santiago: Vicepresidencia de exploraciones & asociaciones mineras.

Faunes, A. (1981). *Caracterización de la mineralogía metálica & de alteración en un sector del stock tonalítico del yacimiento El Teniente*. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Fischer, R. (1953). Dispersion on a sphere. *Proc. Roy. Soc. Londres*.

Floody, R., & Huete, C. (1998). *Potencial Distrito Teniente*. Santiago: Gerencia de Exploraciones, CODELCO-Chile.

Garrido, E. (1995). *Geología estructural del distrito & la mina El Teniente & situación geodinámica regional*. Rancagua: Proyecto Geodinámico Mina El Teniente, Proyecto API-1-1689. Reporte interno, CODELCO-Chile, División El Teniente. Superintendencia de Geología.

Garrido, I. (1992). *Resumen nuevo modelo geológico-estructural & geotécnico yacimiento El Teniente*. Rancagua: CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia.

Godoy, E. (1993). *Geología del Área entre los ríos Claro del Maipo & Cachapoal, Volumen I: Texto & Mapas*. Santiago: Informe Final Proyecto CODELCO & SERNAGEOMIN.

Godoy, E., & Lara, L. (1994). Segmentación estructural andina a los 33º-34º S. Nuevos Datos en la Cordillera Principal. *7º Congreso Geológico chileno*, (págs. 1344-1346).

Golder Associates. (mayo de 2002). Theoretical study of rock mass investigation efficiency.

Gómez, R. (2001). *Geología de las Unidades Volcanogénicas Cenozoicas del Área Industrial de la Mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.

Gudmundsson, A. (2000). Fracture dimensions, displacements and fluid transport. *Journal of Structural Geology*, 1221-1231.

Harrison, D. (2009). *Caracterización estructural bajo el nivel Teniente 8, mediante el análisis de sondajes ortogonales orientados, para el proyecto nuevo nivel mina, Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile*. Concepción: Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra.

Howell, F., & Molloy, J. (1960). Geology of the Braden Orebody, Chile. *Economic Geology*, 863-905.

Kay, S., & Kurtz, A. (1995). *Magmatic and Tectonic Characterization of the El Teniente Region*. Rancagua: DELCO-Chile, División El Teniente.

Kay, S., Mpdozis, C., Ramos, V., & 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). *Andean magmatism and its tectonic setting: Geological Society of America Special Paper*, 113-137.

Klöhn, C. (1960). *Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central*. 95. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.

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°). *Revista Geológica de Chile*, 145-162.

Maksaev, V. (2004). *Pórfidos cupríferos: depósitos de Cu (Mo) de gran tonelaje y baja ley*. Santiago, Chile.

Maksaev, V. (2004). *Pórfidos cupríferos: depósitos de Cu (Mo) de gran tonelaje y baja ley*. Santiago, Chile: U. de Chile.

Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J., y otros. (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*, 15-54.

Millán, J., & González, R. (2011). *Antecedentes geológicos y geotécnicos del área a incorporar el año 2012*. Rancagua: Superintendencia de Geología, División el Teniente, Codelco-Chile.

Munizaga, F., Maksaev, V., Mathur, V., Ruiz, J., McWilliams, M., & Thiele, K. (2002). Understanding molybdenite Re-Os ages from the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. *Denver Annual Meeting*, 152-155.

Ojeda, J., Hernández, E., Ossandón, G., Enrione, A., & Mestre, A. (1980). *El Pórfido Cuprífero El Teniente*. Rancagua: CODELCO-Chile, División El Teniente.

Ossandón, G. (1974). *Petrología & alteración del Pórfido Dacítico, Yacimiento El Teniente*. Santiago: Memoria para optar al Título de Geólogo.

Padilla, R. (2004). Aplicación de Conceptos Geológicos en la estimación de la Resistencia A la Tracción en Vetillas selladas del Stockwork del Yacimiento El Teniente. *Memoria Para Optar al Título de Geólogo*, 150.

Rivera, O., & 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*, (págs. 631-636). Puerto Varas.

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). *IXº Congreso Geológico Chileno*, (págs. 819-823). Puerto Varas.

Riveros, M. (1991). *Geología del Pórfido Latítico del sector sur del yacimiento El Teniente*. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Geología.

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

Seguel, J. (2012). *Caracterización cuantitativa de fallas principales Mina El Teniente: Aspectos Geométricos*. Rancagua: Codelco.

Seguel, J. (2013). *Caracterización cuantitativa de fallas principales Mina El Teniente: Parámetros críticos para un Modelo de Fallas 3D*. Rancagua: CODELCO.

Sillitoe, R., & Perelló, J. (2005). Andean copper province: tectomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume* , 845-890.

Skewes, M. (1999). *Notas petrográficas sobre algunas Brechas de El Teniente*. Rancagua: Departamento de Geología, Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile.

Skewes, M. (2000). *Rocas ígneas del depósito de cobre El Teniente, Chile*. Rancagua: Departamento de Geología, Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile.

Skewes, M., & Arévalo, A. (1997). Andesitas de la Mina, El Teniente. *Congreso Geológico Chileno*, (págs. 1162-1164). Antofagasta.

Skewes, M., & Stern, C. (1995). Genesis of the Giant Late Miocene to Pliocenecopper deposits of Central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution. *nternational Geology review* , 893-909.

Skewes, M., Arévalo, A., Zuñiga, R., & Stern, P. (2002). The Giant El Tenientebreccia deposit: Hypogene Copper distribution and emplacement. *Society of Economic Geologists* , 299-332.

Spröhnle, C. (1990). *Exploración sector sur-este mina El Teniente.Informe GL-402/90*. Rancagua: Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente.

Stern, C., & 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*, (págs. 1724-1728). Antofagasta.

Superintendencia Geomecanica. (2012). *SGM-I-033-2012: Analisis Causal de estallido de rocas 15 de mayo 2012, bloque 1, Mina Esmeralda Sur*. Rancagua: Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División El Teniente.

Thiele, R. (1980). *Carta Geológica de Chile N°39. Hoja Santiago, escala 1:25.000*. Instituto de Investigaciones Geológicas Chile.

Vicente, J., & Davidson, 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*, (págs. 11-55). Buenos Aires.

Villalobos, J. (1975). *Alteración hidrotermal de las andesitas del yacimiento El Teniente, Chile*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas & Matemáticas, Departamento de Geología.

Vry, V., Wilkinson, J., Seguel, J., & Millán, J. (2010). Multistage Intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a Nested Porphyry System. *Society of Economic Geologist*, 119-153.

Zuñiga, P. (1982). *Alteración & mineralización hipógenas en el sector oeste del yacimiento El Teniente*. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Geología.

**Anexo 1**  
**Códigos Matlab**

## Código 1: Creación de círculos y obtención de estructuras

```
function filename = id_xy(a,b,r, XY, id)
% Funcion que entrega el nombre del archivo creado, donde se almacenan los
% datos ID/X/Y que cumplen la condicion
% INPUT
%   a: posicion x del centro de la circunferencia
%   b: posicion y del centro de la circunferencia
%   XY: arreglo de matrices (tipo cell)
%   id: arreglo de strings que contienen las ID (tipo cell)
% OUTPUT
%   filename: nombre del archivo
% Obtengo numero de matrices
l = length(XY);
IDXY = fopen('IDXY.txt','w');
for k=1:l % recorro matrices
    M = XY{k}; % obtengo matriz
    [n,mmm] = size(M); % numero de fila;
    for i=1:n % por fila
        x = M(i,1); % obtengo x
        y = M(i,2); % obtengo y
        % Condiciones
        if r>abs(x-a) && r>abs(y-b) && (x-a)*(x-a)+(y-b)*(y-b)<r*r
            fprintf(IDXY,'%s\t%f\t%f\n',id{k},x,y);
            continue %continuo con la siguiente matriz
        end
    end
end
end
```

```
fclose(IDXY);  
filename = 'IDXY.txt';
```

## Código 2: Creación de mapas a partir de interpolación

```
clear all  
clc  
% cargar datos  
Datos = importdata('Interpolar.txt');  
% Tamaño matriz  
n = 17;  
m = 14;  
x = reshape(Datos.data(:,1),n,m);  
y = reshape(Datos.data(:,2),n,m);  
P21 = reshape(Datos.data(:,3),n,m);  
% Tamaño de la interpolación  
h = 25;  
[X,Y] = meshgrid(min(min(x)):h/2:max(max(x)),min(min(y)):h/2:max(max(y)));  
% Datos interpolados  
ZI = interp2(x,y,P21,X,Y,'spline');  
% Graficar  
surf(X,Y,ZI)  
xlabel('Este [m]')  
ylabel('Norte [m]')  
view(0,90)  
colorbar  
%axis([-3 3 -3 3 -5 20])
```

**Anexo 2**  
**Redes estereográficas Mina Esmeralda**

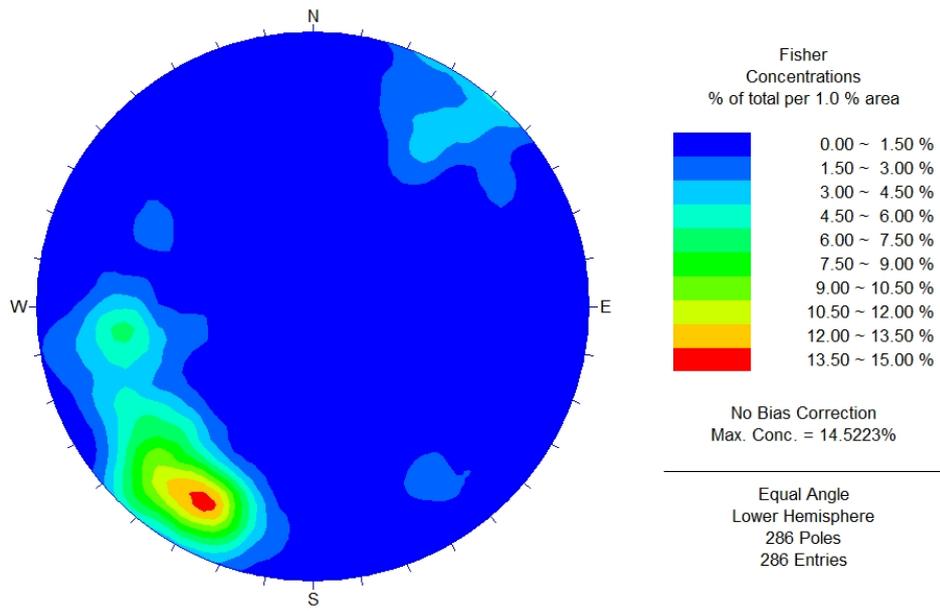


Figura 1: Polos de Esmeralda Hundimiento, sector 1

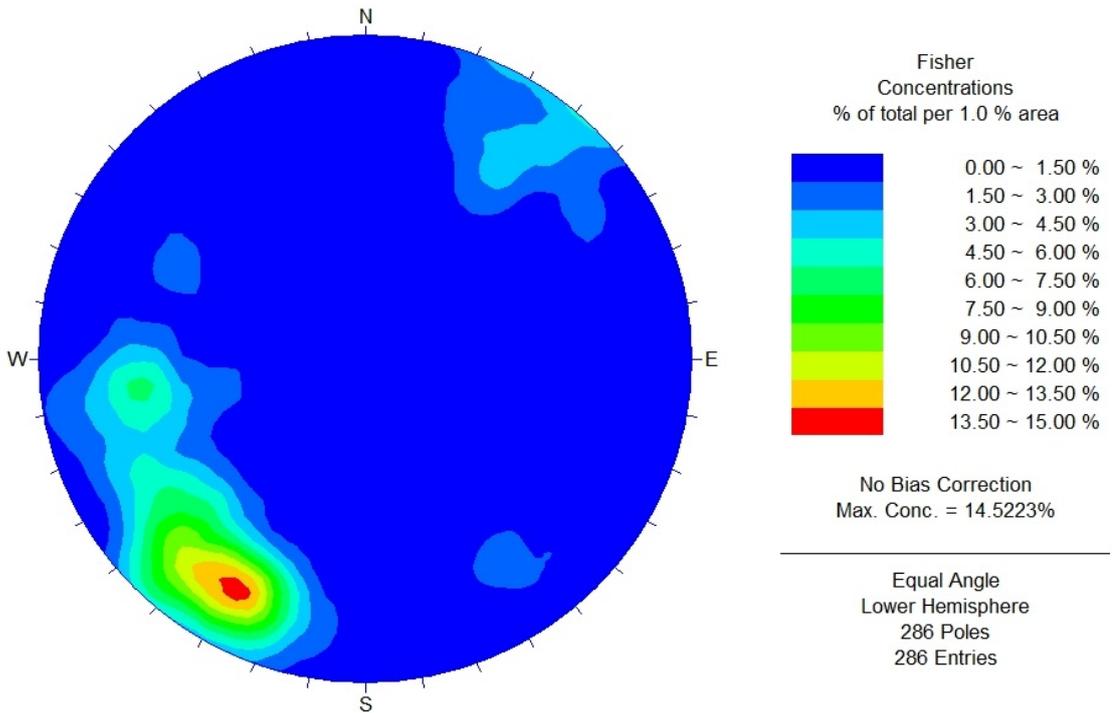


Figura 2: Polos de Esmeralda Producción, sector 1

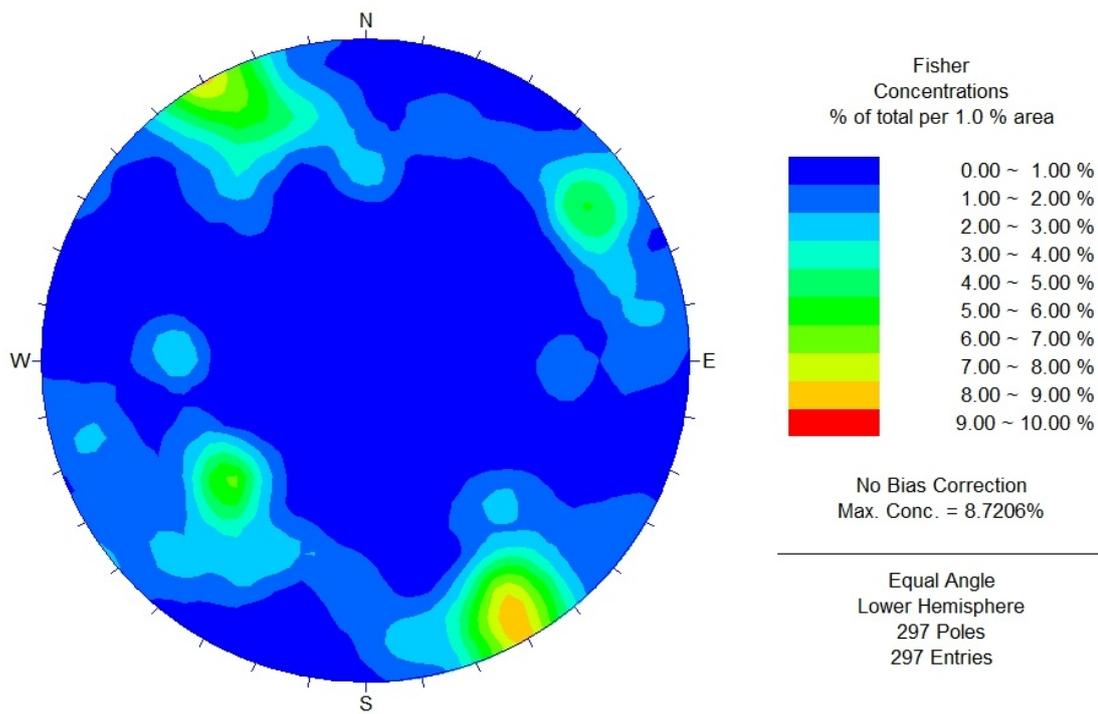


Figura 3: Polos de Esmeralda Producción, sector 2

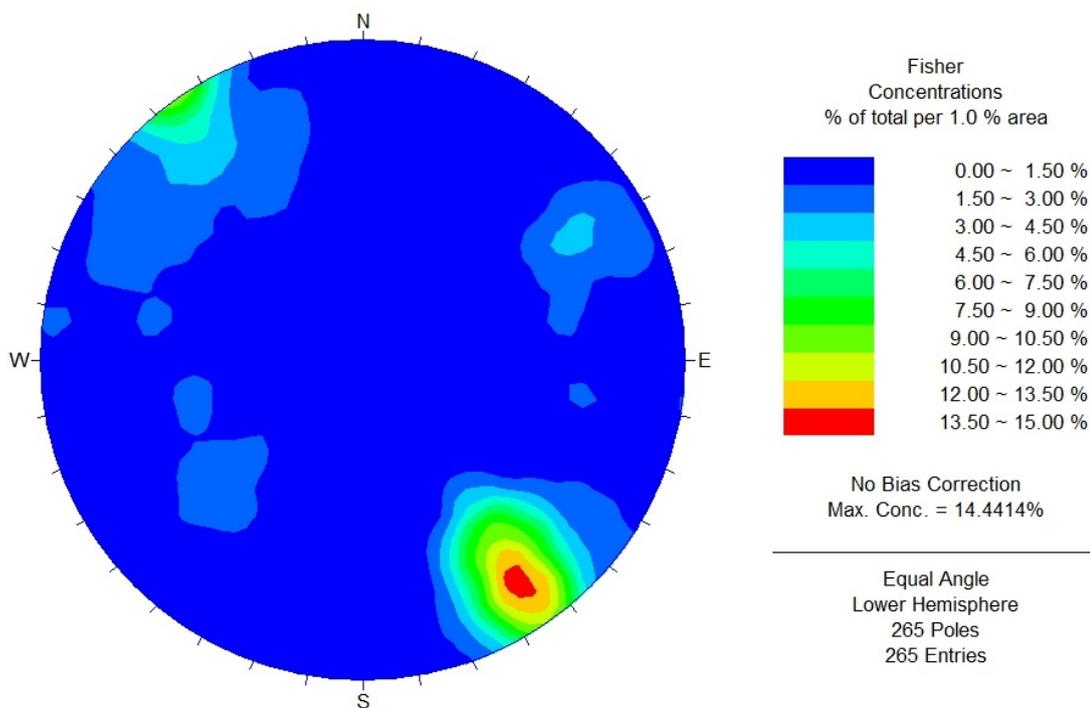


Figura 4: Polos de Esmeralda Producción, sector 2

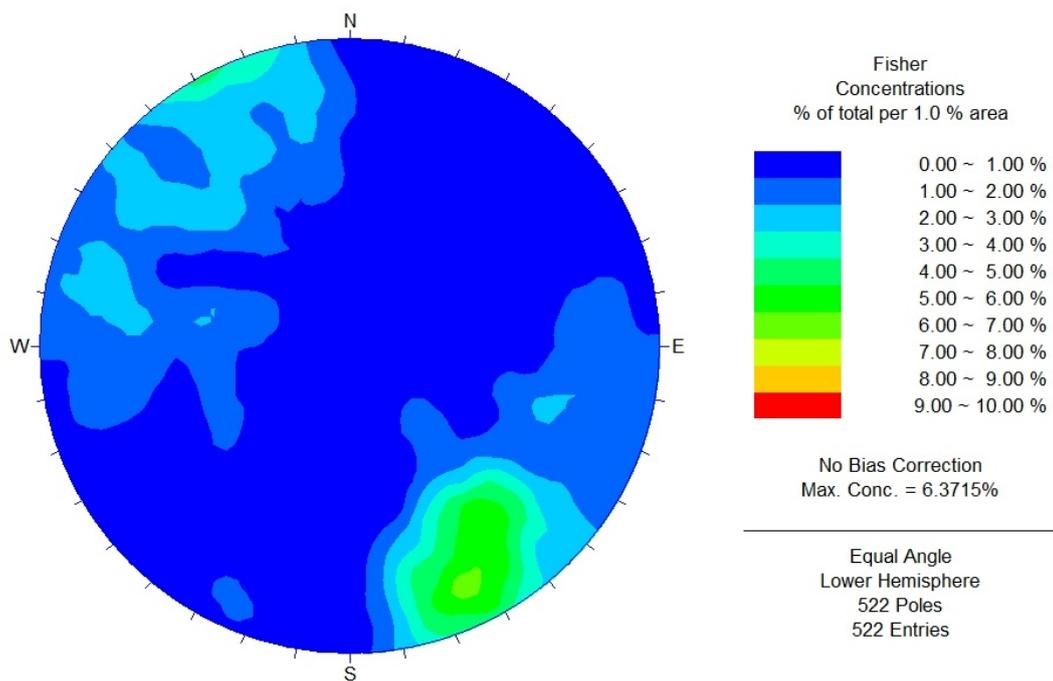


Figura 5: Polos de Esmeralda Producción, sector 3

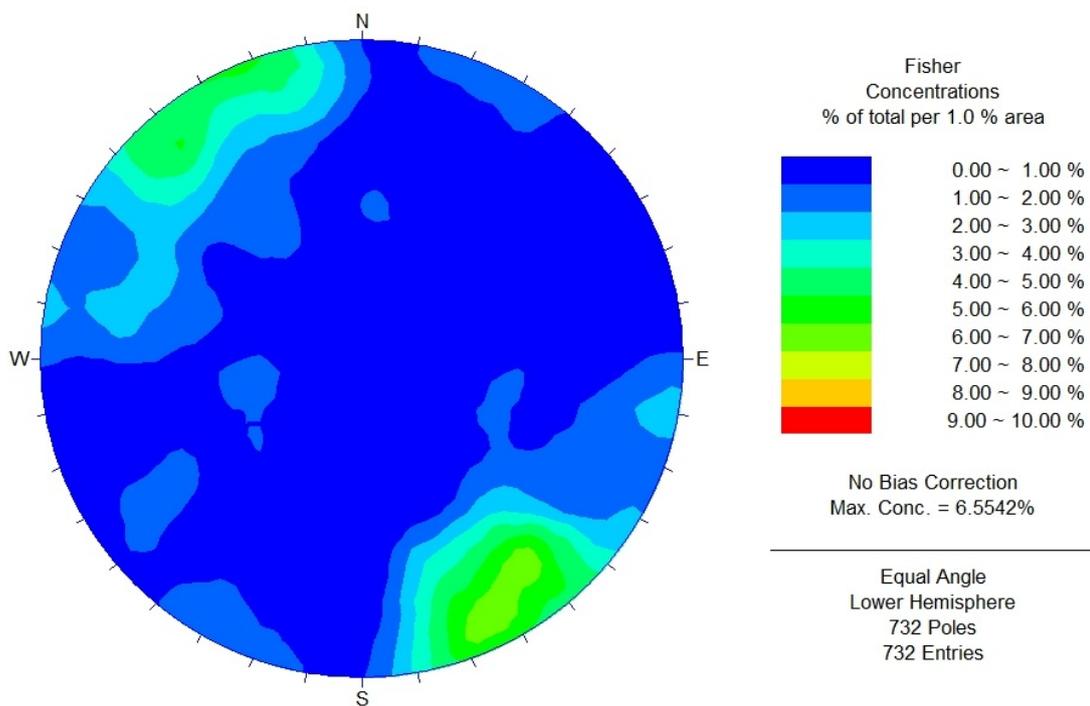


Figura 6: Polos de Esmeralda Producción, sector 3

**Anexo 3**  
**Espesores Mina Esmeralda**

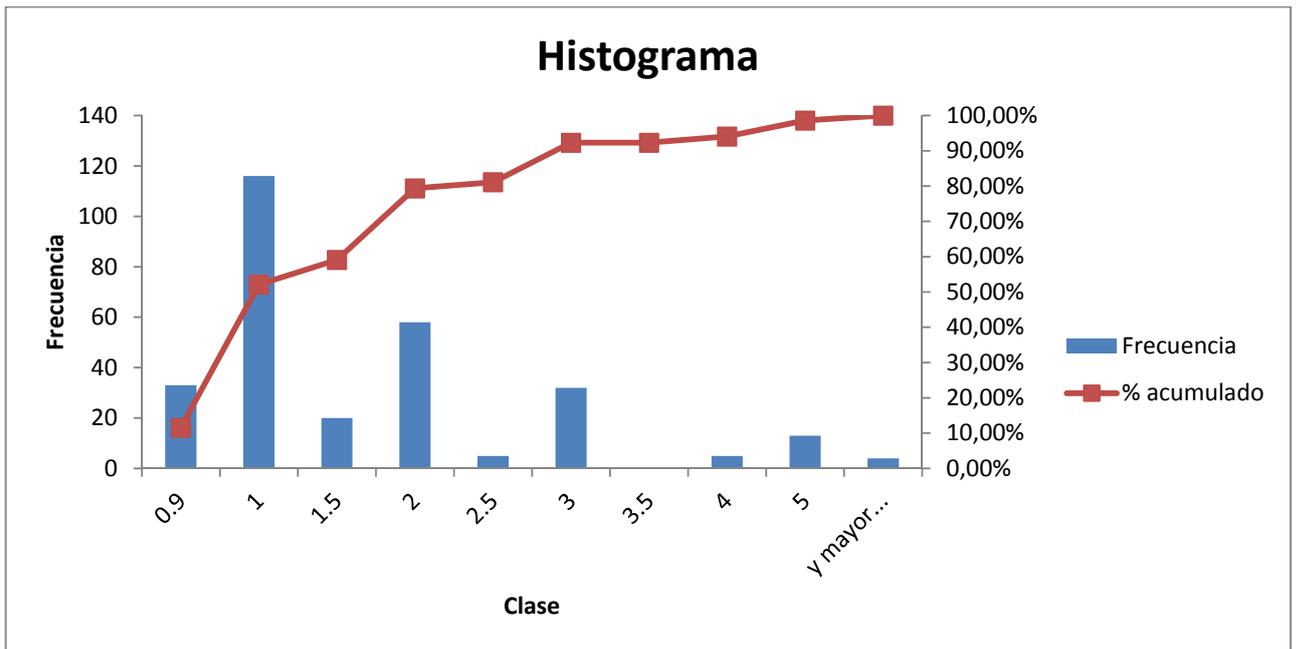


Figura 1: Frecuencia y acumulación de espesores en Esmeralda Producción, sector 1

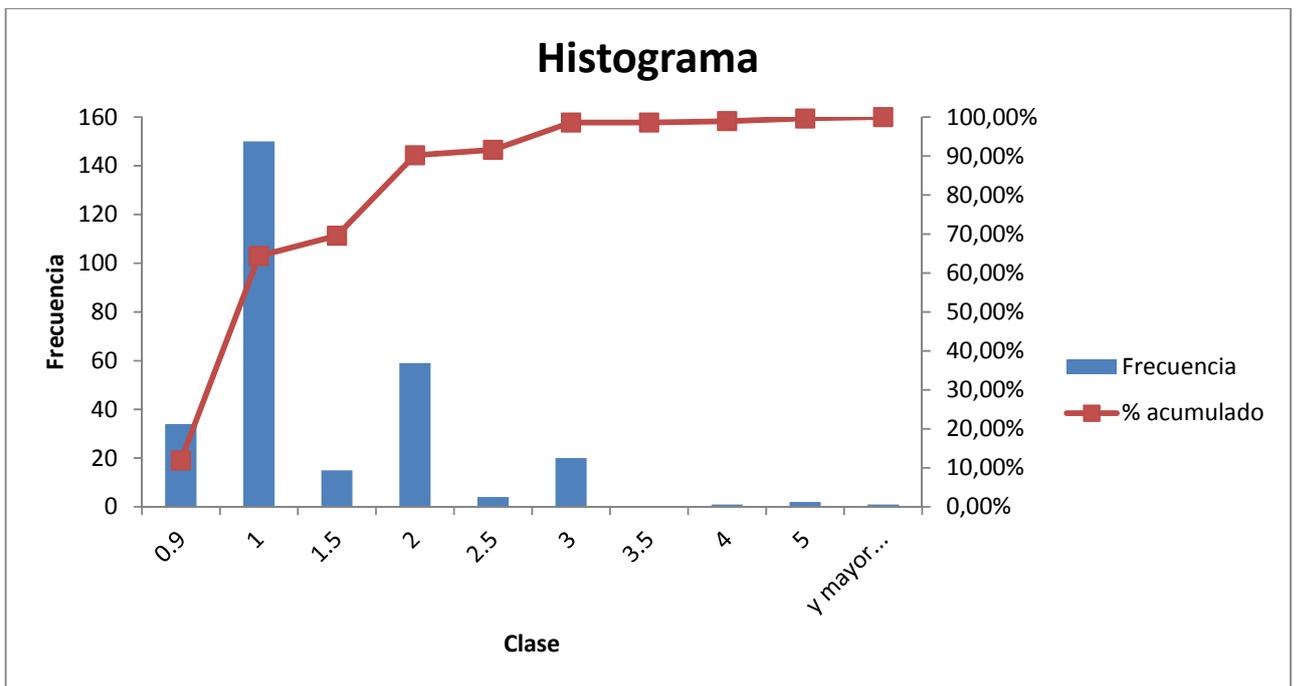


Figura 2: Frecuencia y acumulación de espesores en Esmeralda hundimiento, sector 1

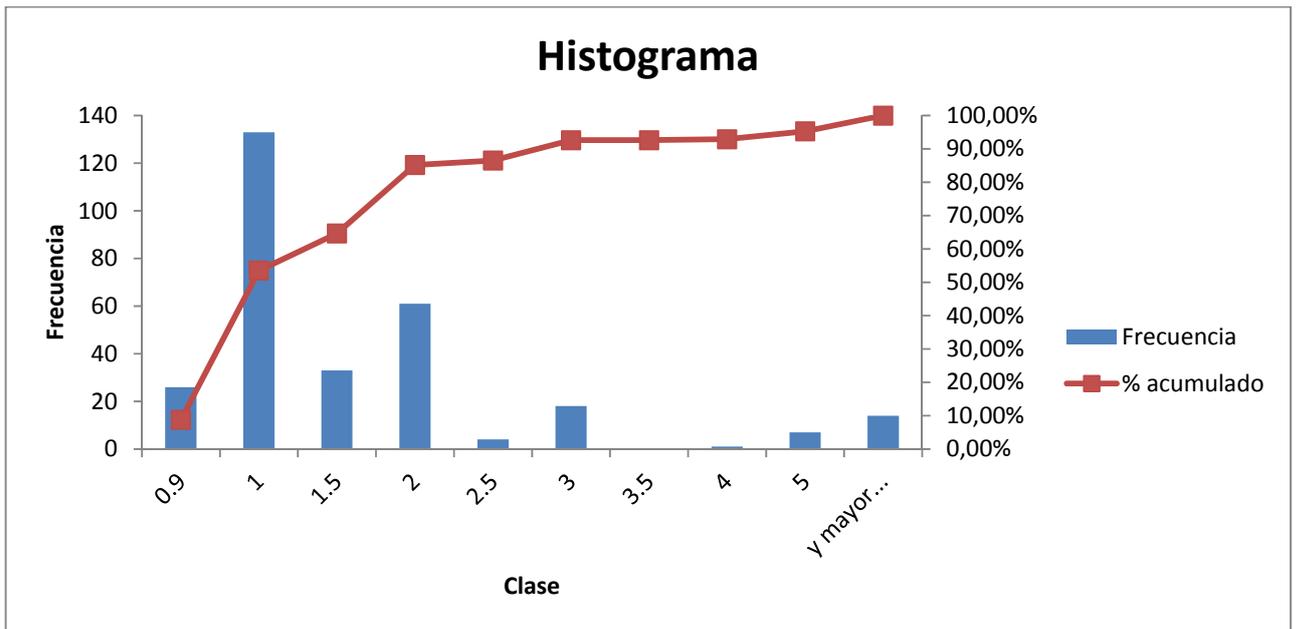


Figura 3: Frecuencia y acumulación de espesores en Esmeralda Hundimiento, sector 2

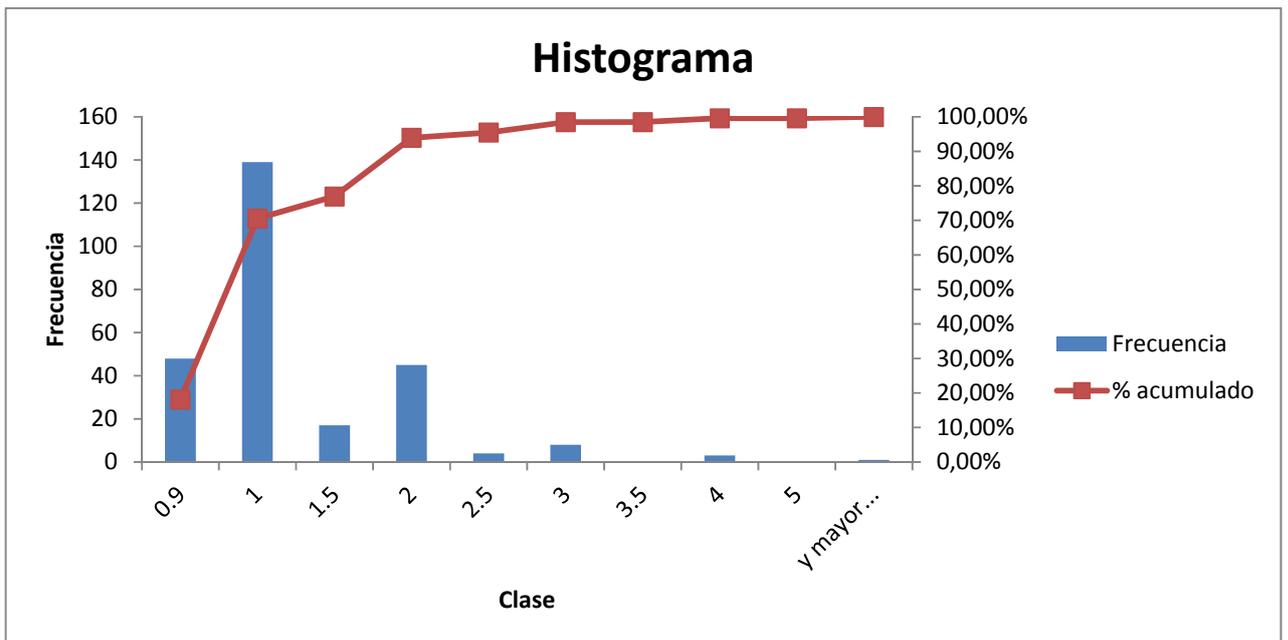


Figura 4: Frecuencia y acumulación de espesores en Esmeralda Producción, sector 2

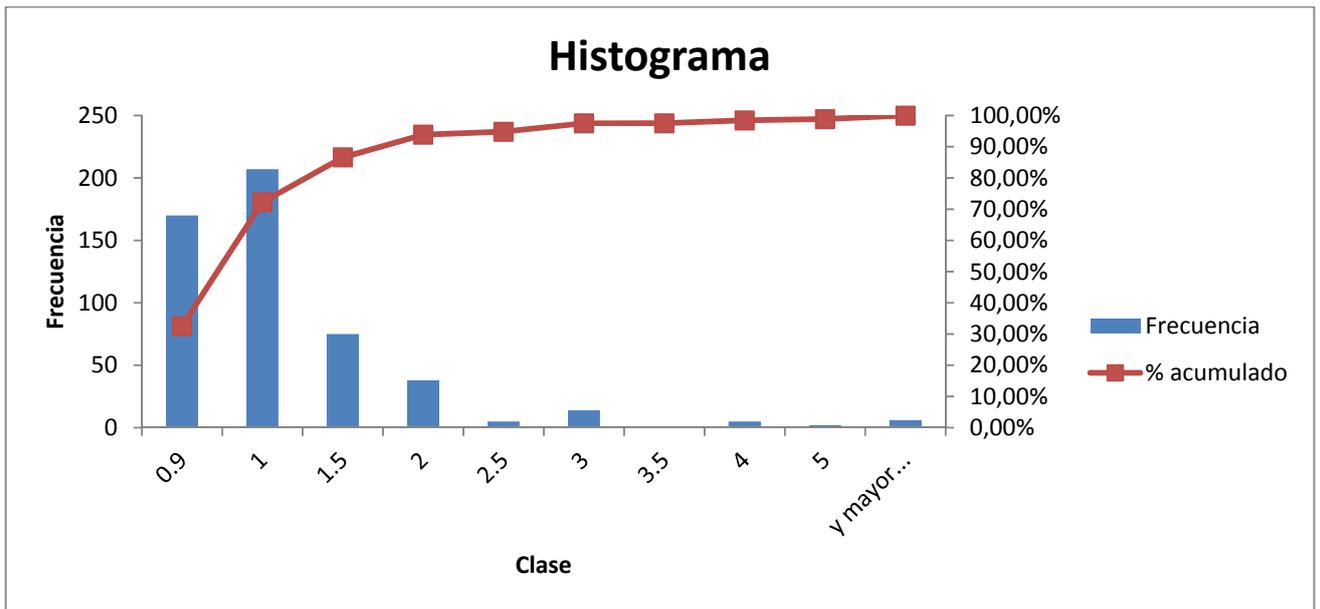


Figura 5: Frecuencia y acumulación de espesores en Esmeralda Hundimiento, sector 3

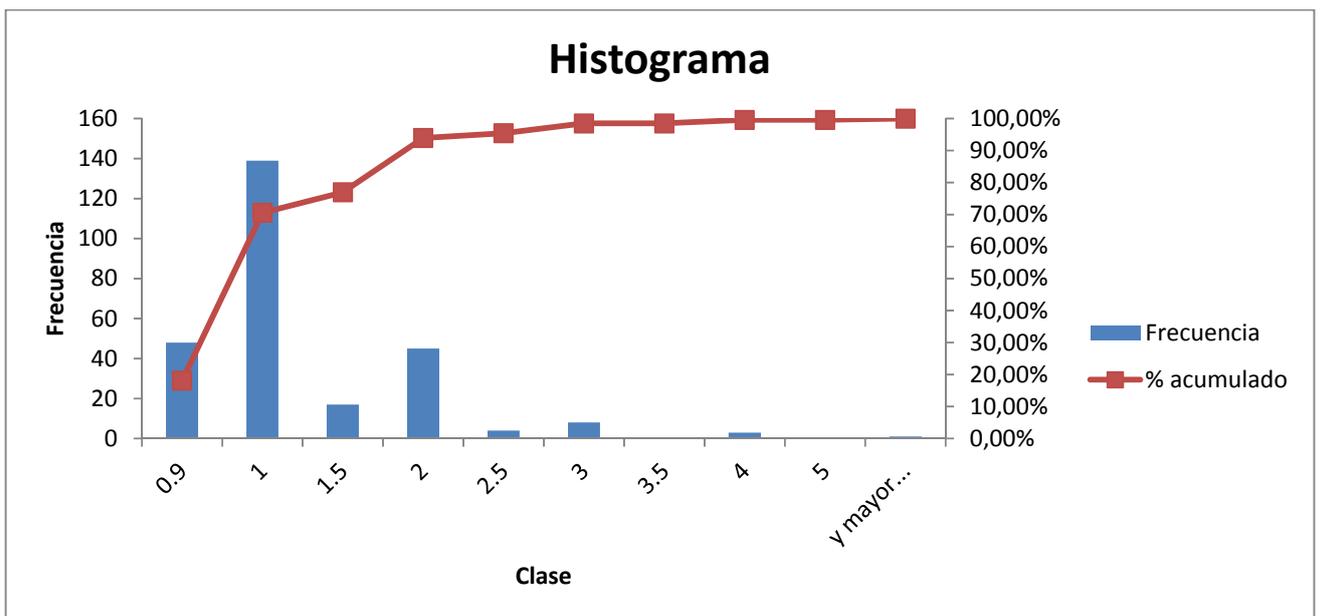


Figura6: Frecuencia y acumulación de espesores en Esmeralda Hundimiento, sector 3

**Anexo 4**  
**Densidades Mina Reservas Norte**

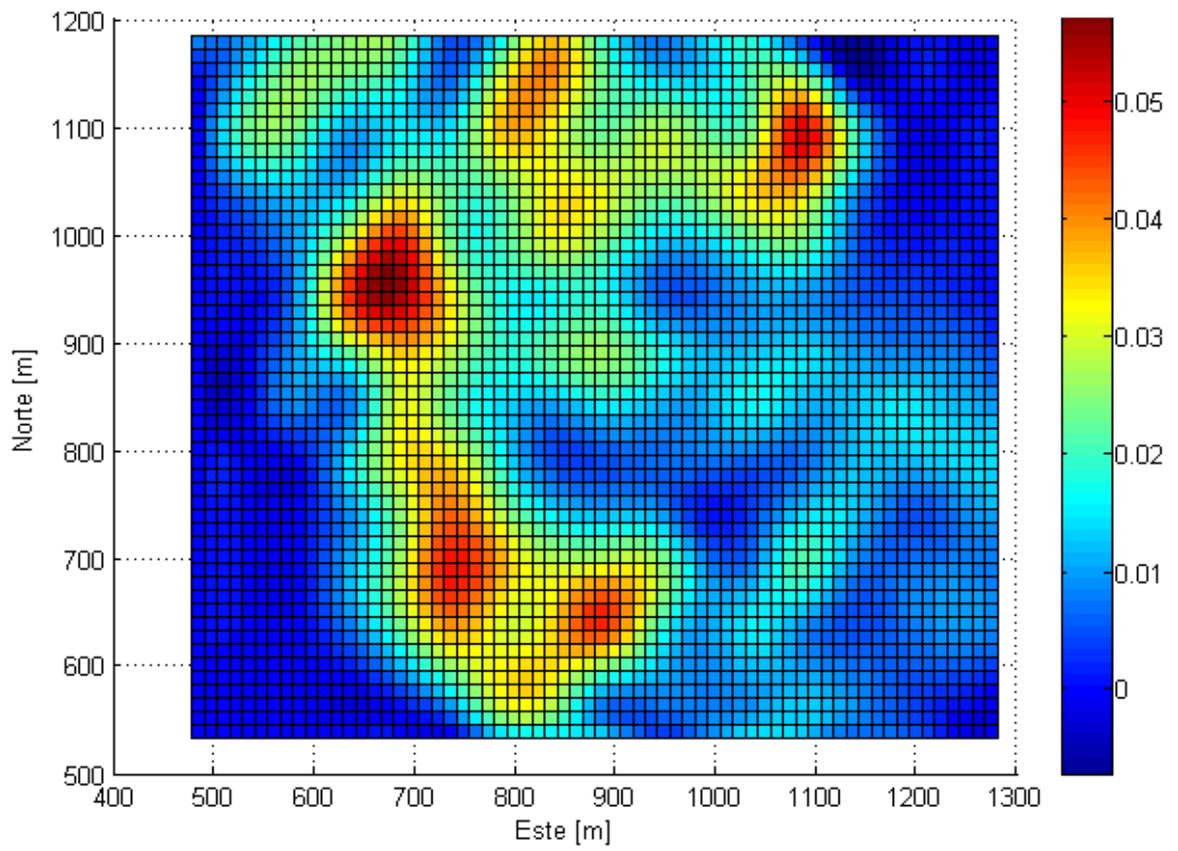


Figura 1: Densidad de Mapeo [est/m<sup>2</sup>] en mina Reservas Norte