



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

**“LEVANTAMIENTO REMOTO DE DATOS ESTRUCTURALES EN RAJOS
ABIERTOS Y SU IMPACTO EN LA DEFINICIÓN DE MODELOS
ESTRUCTURALES: MINA LOS BRONCES, ANGLOAMERICAN SUR”**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO
CARLOS ALBERTO ANDRADE FUENTES**

**PROFESOR GUÍA:
DANIEL CARRIZO SANTIAGO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS**

**SANTIAGO DE CHILE
2015**

LEVANTAMIENTO REMOTO DE DATOS ESTRUCTURALES EN RAJOS ABIERTOS Y SU IMPACTO EN LA DEFINICIÓN DE MODELOS ESTRUCTURALES: MINA LOS BRONCES, ANGLOAMERICAN SUR

La precisión de los modelos geológicos condiciona de manera relevante todos los aspectos del negocio minero, llegando a determinar su viabilidad. En particular, en la generación de un modelo estructural, el levantamiento de información desde caras de bancos presenta un constante reto en la actividad minera debido a condiciones de seguridad insuficientes en la toma de datos, áreas de difícil o nulo acceso a las frentes, y escasa resolución y amplitud del mapeo.

Frente a esta problemática el presente estudio documenta el impacto del levantamiento remoto de datos estructurales mediante la aplicación de fotogrametría en frentes de bancos. A su vez es mostrada la influencia de la adquisición de datos indirectos en la definición de un modelo estructural del rajo abierto de la Mina Los Bronces, como caso en estudio.

El levantamiento estructural realizado logró mejorar tanto el número de datos como su distribución. Este aumento del registro de estructuras triplicó la información levantada en cinco años desde las frentes en un periodo aproximado de seis meses: para el caso de las estructuras menores – estructuras menores a 15 metros de persistencia-, se mapearon 15.560 estructuras, aumentando en un 260% la información proveniente de mapeo de bancos; por otro lado, se reconocieron 144 nuevas estructuras de alto impacto en la operación- estructuras mayores, cuya persistencia va entre 15-150 metros-, identificando de manera completa su traza, obteniendo una medida absoluta de su persistencia, y una orientación coherente con el carácter sinuoso de esta a lo largo de su afloramiento. Finalmente, fue posible levantar coordenadas espaciales de las trazas de las estructuras principales definidas en la mina- fallas de gran persistencia, mayor a 150 m, controladoras de dominios estructurales- , obteniendo información nueva y actual de estas.

El análisis de estos resultados muestran que la información obtenida de la geometría de estructuras, coordenadas espaciales y orientación, posee grados de exactitud y precisión aceptables dentro de parámetros definidos y, dado el considerable aumento en la cantidad de datos de las frentes, fue posible: (I) identificar futuros cambios en el modelo de dominios estructurales como la definición de nuevos límites entre dominios estructurales, interpretación de sub-dominios asociados a litologías y re-caracterización de diagramas de contornos de polos de los dominios, definiendo *sets* principales no modelados actualmente; (II) una modelación tanto a nivel de superficie como en profundidad de las estructuras mayores, generando un modelo vectorial conciliado con lo que se observa en la mina, evitando una exagerada interpolación del largo de la traza y plano de falla de la estructura y (III) una validación de las trazas pertenecientes a las estructuras principales, .

Los antecedentes antes expuestos permiten validar al mapeo indirecto vía fotogrametría como una técnica adecuada y complementaria al mapeo en terreno de bancos y la lectura de fallas en sondajes; mostrando una metodología con capacidades suficientes para un óptimo mapeo y, en consecuencia, su participación como una herramienta significativa en el desarrollo de un modelo estructural.

***"El hombre no habría logrado lo posible,
sino hubiera intentado muchas veces lo imposible".***

Max Weber.

Agradecimientos

Me considero un agradecido de la vida. Siento que he vivido, “con buena o mala suerte”, muchos momentos grandiosos, particulares, y escasos, de esos que dicen: definen una persona. Sin duda, el entrar a un lugar como una universidad, mi Universidad de Chile, representa uno de esos hitos. No fue por estudiar algo o vivir una vida “universitaria”, sino que mi entrada a este lugar significó conocer un mundo ajeno totalmente a mi cotidiana realidad, realidad común a la mayoría de Chile. Este lugar me enseñó que existen diferencias, que molestan, que las aceptas y, finalmente, te das cuenta que esas diferencias son las que configuran tu mundo y te enriquecen desde el interior. Me siento afortunado y triste por dejar un lugar así, sinceramente no quería irme. Pero llegó el momento, y lo aprendido me insta e inspira a no temer al futuro, a querer conocer, tal como ese sentimiento vivido en Marzo del 2007, cuando volé de la sexta a la capital. Lugar que sería ahora, mi segundo hogar.

Mi hogar. Primero que todo, dar gracias a mi rancagüino hogar: madre, padre y hermano, María Angélica Fuentes, Carlos Andrade Gómez y Rodrigo Andrade Fuentes, por su cariño y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por enseñarme el valor de la educación y la superación. Y mi segundo hogar. Gracias a mi hermana, Flora Andrade Uribe y su familia, por permitirme compartir con ellos estos ocho años de alegrías y penas.

Muchísimas gracias a cada persona con la cual he compartido. Gracias a mis amigos de infancia, por esos momentos, esas pichangas y fines de semana de mates. A mis compadres y comadres bachilleres, ¡¡Bachi Bachi!! , porque siempre estuvieron ahí; porque con ellos partí esta aventura, por hacer de toda esta etapa una gran experiencia, llena de alegrías, penas, descubrimientos, frases sin sentido y conversaciones pseudo-intelectuales. A mis futuros colegas geólogos, hiperáridos y demases; por sus consejos y grandes momentos en esas mañanas-tardes-noche de nada, juntas inesperadas y sobretodo: terrenos inolvidables. A mis colegas de difusión, a todos mis ex-alumnos.

Y ahora, que me encuentro finalizando esta labor, muchas gracias a Manuel Díaz, Superintendente de Geología, por su ayuda y confianza, por permitirme realizar tan magno trabajo de memoria en Los Bronces. A mis profesores del departamento, en quienes he admirado su humildad y sabiduría, los que me entregaron esta inquietud constante por la geología, culpables de no tener nunca más un viaje sin estar observando constantemente la cordillera, mar, o cualquier paraje que nosotros tan bien tratamos de entender. Muchísimas gracias a mi profesor guía Daniel Carrizo por su constante crítica, consejo y paciencia; y no menos importante, por brindarme un ameno ambiente de trabajo. También muchas gracias a mis profesores miembros de la comisión Sergio Sepúlveda y Sofía Rebolledo, cuyas observaciones y recomendaciones fueron parte fundamental en el desarrollo de esta memoria.

Además, muchas gracias a todo el equipo de la Superintendencia de geología de Los Bronces: geólogos, topógrafos y técnicos. En especial a Carlos Barros, Iván Mlynarz y mi tutor Cristóbal Gil; por su paciencia, dedicación y empeño en mejorar mis aptitudes como persona, profesional y gustos musicales. A todo el equipo del AMTC: investigadores, profesores, compañeros tesis, técnicos y auxiliares quienes me permitieron aprender y trabajar junto a ellos.

Y finalmente, agradecer a cada persona con quien he intercambiado vivencias, a quien he enseñado y quien me ha enseñado, a quien lamentablemente no he podido mencionar en este lugar, pero que sin duda, cada uno de esos pequeños momentos vividos con ustedes me ha permitido ser lo que soy ahora.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción

| | | |
|--------|---|---|
| 1.1. | Presentación del problema..... | 1 |
| 1.1.1. | Caso en estudio: la mina Los Bronces | 2 |
| 1.2. | Objetivos | 4 |
| 1.2.1. | Objetivo general | 4 |
| 1.2.2. | Objetivos específicos | 4 |
| 1.3. | Metodología de trabajo..... | 5 |
| 1.3.1. | Adquisición indirecta de información estructural..... | 6 |
| 1.3.2. | Determinación de la geometría de las estructuras expuestas en los bancos..... | 6 |
| 1.3.3. | Análisis estructural de la zonación de dominios estructurales | 6 |

Capítulo 2: Marco Geológico

| | | |
|----------|--|----|
| 2.1. | Contexto Regional..... | 7 |
| 2.1.1. | Unidades estratificadas | 7 |
| 2.1.1.1. | Formación Abanico (Aguirre 1960) | 7 |
| 2.1.1.2. | Formación Farellones (Klohn 1960)..... | 8 |
| 2.1.2. | Unidades Intrusivas..... | 8 |
| 2.1.2.1. | Intrusivos miocénicos | 8 |
| 2.1.2.2. | Intrusivos pliocénicos..... | 8 |
| 2.1.3. | Tectónica regional y marco metalogénico | 10 |
| 2.2. | Geología local | 11 |
| 2.2.1. | Rocas estratificadas | 11 |
| 2.2.2. | Batolito San Francisco | 11 |
| 2.2.2.1. | Unidad cuarzomonzonita (QM) | 12 |
| 2.2.2.2. | Unidad cuarzomonzodiorita (QDM)..... | 12 |
| 2.2.3. | Complejo de brechas | 14 |
| 2.2.4. | Chimenea de brecha riolítica..... | 15 |
| 2.2.5. | Marco estructural distrital | 15 |
| 2.2.5.1. | Las Fallas en el distrito | 16 |
| 2.2.5.2. | Marco estructural local: Modelo 3D de la mina Los Bronces..... | 17 |

Capítulo 3: Aspectos metodológicos generales del levantamiento remoto de datos estructurales

| | |
|---|----|
| 3.1. Equipo y toma de fotografías..... | 21 |
| 3.2. Procesamiento de fotografías: reconstrucción y georreferenciación del rajo | 23 |
| 3.3. Levantamiento remoto: mapeo estructural digital | 25 |
| 3.4. Base de datos categorizada | 26 |

Capítulo 4: Análisis de resultados

| | |
|---|----|
| 4.1. Levantamiento y validación de la información estructural..... | 27 |
| 4.1.1. Validación del método de levantamiento remoto | 27 |
| 4.1.1.1. Precisión espacial..... | 27 |
| 4.1.1.2. Validación geométrica | 30 |
| 4.1.2. Mapeo estructural digital | 33 |
| 4.1.2.1. Estructuras menores (Eme)..... | 34 |
| 4.1.2.2. Estructuras mayores (Ema) | 35 |
| 4.1.2.3. Estructuras principales | 36 |
| 4.2. Análisis estructural | 37 |
| 4.2.1. Modelación 3D de estructuras mayores y principales..... | 37 |
| 4.2.2. Densidad de datos estructurales | 39 |
| 4.2.3. Impacto del levantamiento remoto en la caracterización de dominios estructurales | 40 |
| 4.2.4. Dominio 1 | 42 |
| 4.2.5. Dominio 3 | 45 |
| 4.2.6. Dominio 4 | 48 |
| 4.2.7. Dominio 5 | 52 |
| 4.2.8. Dominio 6 | 58 |
| 4.2.9. Dominio 7 | 63 |

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 5: Discusión de resultados..... | 69 |
|---|-----------|

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones..... | 75 |
|--|-----------|

| | |
|--------------------------|-----------|
| Bibliografía..... | 77 |
|--------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| Anexo A: Resumen de las características estructurales para cada dominio estructural definido en el Modelo Estructural de la mina Los Bronces | 80 |
|---|-----------|

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Brechas presentes en la mina Los Bronces..... | 14 |
| Tabla 2: Características generales de las Fallas Principales validadas y definidas en el Modelo Estructural 2013 (Carrizo <i>et al.</i> , 2013) | 17 |
| Tabla 3: Promedio y desviación estándar de pares de puntos topográficos. | 29 |
| Tabla 4: Tabla de orientaciones medidas en terreno (brújula) y de manera remota (SMB)..... | 31 |
| Tabla 5: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 1 | 44 |
| Tabla 6: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 3 | 47 |
| Tabla 7: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 4 | 51 |
| Tabla 8: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 5 | 53 |
| Tabla 9: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 6 | 60 |
| Tabla 10: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 7 | 65 |
| Tabla 11: Tabla resumen de las características del nuevo DCP para el Dominio 1, 2, 3 y 4..... | 73 |
| Tabla 12: Tabla resumen de las características del nuevo DCP para el Dominio 5 y 6 y los definidos para el subdominio 7 occidental y 7 oriental | 74 |
| Tabla 13: Tabla resumen de las características estructurales de los dominios..... | 80 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Ubicación del área de estudio..... | 2 |
| Figura 2: Mapa de densidad de datos estructurales de mapeo de bancos..... | 3 |
| Figura 3: Metodología planteada para el estudio..... | 5 |
| Figura 4: Mapa geológico regional de Chile Central..... | 9 |
| Figura 5: Mapa geológico de la mina Los Bronces..... | 13 |
| Figura 6: Modelo de fallas principales y mayores..... | 18 |
| Figura 7: Dominios estructurales de la Mina Los Bronces..... | 20 |
| Figura 8: Equipo utilizado en la campaña de mapeo..... | 21 |
| Figura 9: Estaciones de toma de un par de fotografías para su uso en fotogrametría..... | 22 |
| Figura 10: Metodología de toma de fotografías del rajo..... | 23 |
| Figura 11: Unión vertical de reconstrucciones en detalle..... | 24 |
| Figura 12: Mapeo estructural digital..... | 25 |
| Figura 13: Formato de base de datos categorizada..... | 26 |
| Figura 14: Perfiles utilizados en la validación espacial..... | 28 |
| Figura 15: Medición, en terreno, de orientación de una estructura..... | 30 |
| Figura 16: Comparación de orientación de estructuras para Dip y DipDir entre el levantamiento remoto y medición por brújula..... | 32 |
| Figura 17: Mapeo de estructuras menores..... | 34 |
| Figura 18: Mapeo de estructuras mayores..... | 35 |
| Figura 19: Mapeo de fallas principales..... | 36 |
| Figura 20: Modelo de estructuras mayores..... | 37 |
| Figura 21: Modelación de estructuras mayores..... | 38 |
| Figura 22: Mapa de densidad de mapeo de bancos..... | 39 |
| Figura 23: Polígonos de corrección planar de Terzaghi de Bancos 2014..... | 41 |
| Figura 24: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 1..... | 42 |
| Figura 25: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 1..... | 43 |
| Figura 26: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 3..... | 45 |
| Figura 27: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 3..... | 46 |
| Figura 28: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 4..... | 48 |
| Figura 29: Mapa de mapeo de bancos 2013-2014 y ubicación de los sondajes 2013..... | 49 |
| Figura 30: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 4..... | 50 |
| Figura 31: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 5..... | 52 |
| Figura 32: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 5..... | 53 |
| Figura 33: Distribución de celdas de exploración sobre el Dominio 5..... | 55 |
| Figura 34: Distribución de celdas de exploración de la zona de interés sur del dominio 5..... | 56 |
| Figura 35: Distribución de celdas de exploración de la zona de interés este del dominio 5..... | 57 |
| Figura 36: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 6..... | 58 |
| Figura 37: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 6..... | 59 |
| Figura 38: Mapeo efectuado en la parte norte del rajo Donoso..... | 61 |
| Figura 39: Relación entre <i>set</i> primario E-W y orientación de sondajes en el Dominio 6..... | 62 |
| Figura 40: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 7..... | 63 |
| Figura 41: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 7..... | 64 |
| Figura 42: Mapa de densidad de mapeo de Bancos 2013 y Sondajes 2013 en el Dominio 7... .. | 66 |
| Figura 43: Distribución de celdas de exploración en el dominio 7 y su relación espacial con las litologías..... | 67 |
| Figura 44: Dominios estructurales propuestos en este estudio..... | 71 |
| Figura 45: Diagrama de contorno de polos y rosetas de cada dominio definido en el Modelo Estructural 2013..... | 83 |

Capítulo 1: Introducción

1.1. Presentación del problema

En la cadena de valor de la minería, la generación permanente de información geológica representa uno de los retos fundamentales para el desarrollo de un negocio minero eficiente. Por consiguiente, el reducir la incertidumbre en la cantidad y calidad de la información geológica se torna una tarea crítica, que en un caso extremo puede controlar la viabilidad de un proyecto o el desarrollo y explotación sustentable de la mina.

En particular, la generación de información estructural y el desarrollo de modelos estructurales comprensivos en un yacimiento constituyen tareas de alto impacto en el desarrollo minero, involucrando tanto la optimización económica de la mina como el factor de seguridad en la misma. Esto es claramente reflejado en las áreas: i) diseño geotécnico de la mina; ii) modelo geológico-metalúrgico del depósito; iii) modelos hidrogeológicos y iv) diseños de desarrollo de corto plazo asociados a la tronadura y sondajes.

El levantamiento sistemático de información estructural dentro de la planificación cotidiana de una mina representa una tarea compleja debido principalmente a: i) la difícil tarea de generar satisfactoriamente la información estructural en relación a la velocidad de avance de la mina, ii) exposición permanente a la caída de rocas, con consecuencias fatales. En consecuencia, establecer métodos de levantamiento de datos estructurales que, permitan cumplir con la calidad y velocidad de levantamiento requerida, junto con los requerimientos de seguridad-reducción del tiempo de exposición en la toma de datos-, representa un reto continuo en la industria minera actual.

La presente memoria se contextualiza en esta problemática y expone los resultados obtenidos de un estudio estructural, que aplica una metodología de levantamiento remoto de datos estructurales en las caras de bancos y el impacto de la información obtenida en la definición del modelo estructural. El rajo de la mina Los Bronces, AngloAmerican Chile, se presenta como caso en estudio.

Este trabajo forma parte de los objetivos críticos de la Superintendencia de Geología (SGLB), Gerencia de desarrollo de AngloAmerican Chile, división Los Bronces; financiando y permitiendo el desarrollo aplicado de la presente memoria de título, en colaboración con el *Advanced Mining Technology Center (AMTC)* y el Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

1.1.1. Caso en estudio: la mina Los Bronces

La mina de Cu-Mo Los Bronces, ubicada a 65 km al NE de Santiago y a una altitud de 3000 m s.n.m (Figura 1), forma parte del depósito de Cu-Mo más relevante del planeta (Irrázaval *et al.*, 2012). Debido a la naturaleza de la distribución de la mineralización en profundidad, su modelo de explotación, de tipo rajo abierto, ha alcanzado grandes dimensiones, presentando una serie de dificultades en la distribución y densidad de la información estructural disponible de sus bancos. Esto es debido principalmente por: i) zonas colgadas sin acceso y sin información estructural; ii) zonas con problemas de seguridad, con alto riesgo de derrumbes iii) zonas sin acceso debido al intenso tránsito relacionado con la producción y extracción; y iv) la imposibilidad del levantamiento continuo de datos en las frentes acorde a la velocidad de desarrollo de la mina, junto con las características climáticas de alta montaña. Estos factores intrínsecos causan una heterogeneidad en la distribución espacial del mapeo de estructuras en los bancos (Figura 2), dando como resultado, un sesgo en la distribución espacial de los datos; lo que condiciona el grado de incertidumbre del modelo estructural y la zonación de dominios estructurales.

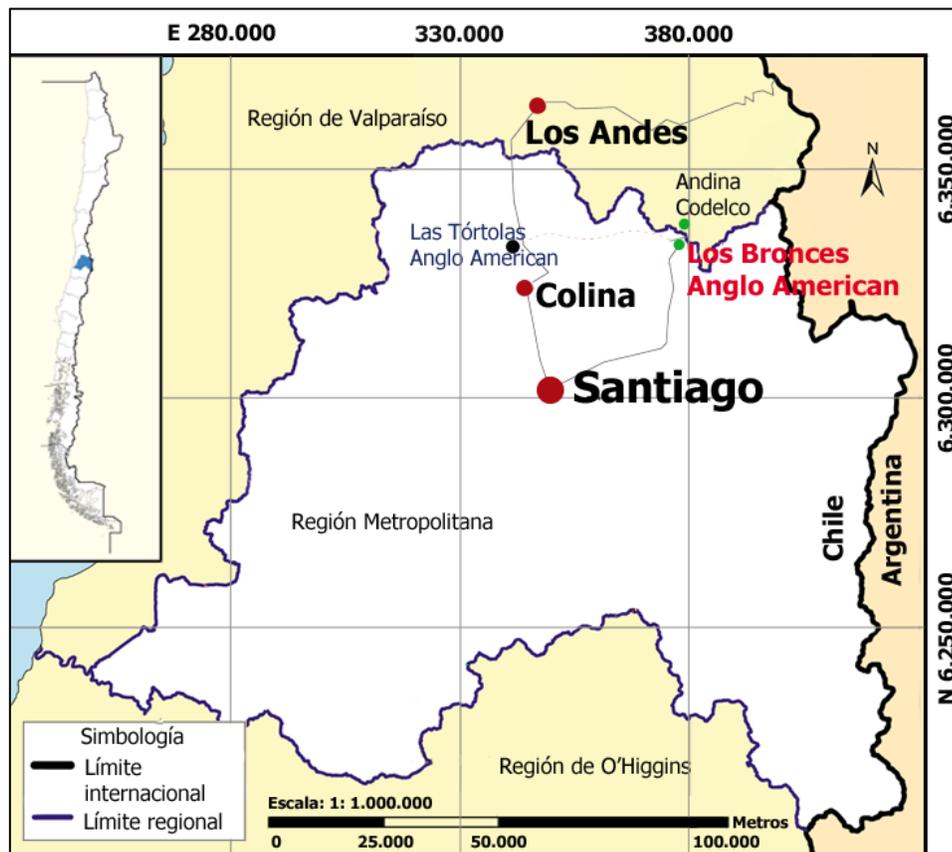


Figura 1: Ubicación del área de estudio. La figura muestra la ubicación de la mina de Cu-Mo Los Bronces, al NE de Santiago, y su planta concentradora: Las Tórtolas. Además se muestra la ubicación de la división Andina de CODELCO, mina contigua a la operación Los Bronces.

Estos antecedentes, sumados a la decisión estratégica de la Superintendencia de Geología de la Mina Los Bronces, de afrontar de manera urgente la problemática que conlleva el mejoramiento del modelo estructural de la Mina Los Bronces, ofrecen un caso de estudio de excepción, para realizar un estudio estructural que permita construir de manera comprensiva una solución metodológica a la problemática antes expuesta.

La presente memoria expone los resultados de un estudio estructural, que en particular evalúa de manera comprensiva el levantamiento remoto de información estructural, como una alternativa metodológica interesante; junto con su impacto en el desarrollo y/o optimización del modelo estructural de la mina Los Bronces.

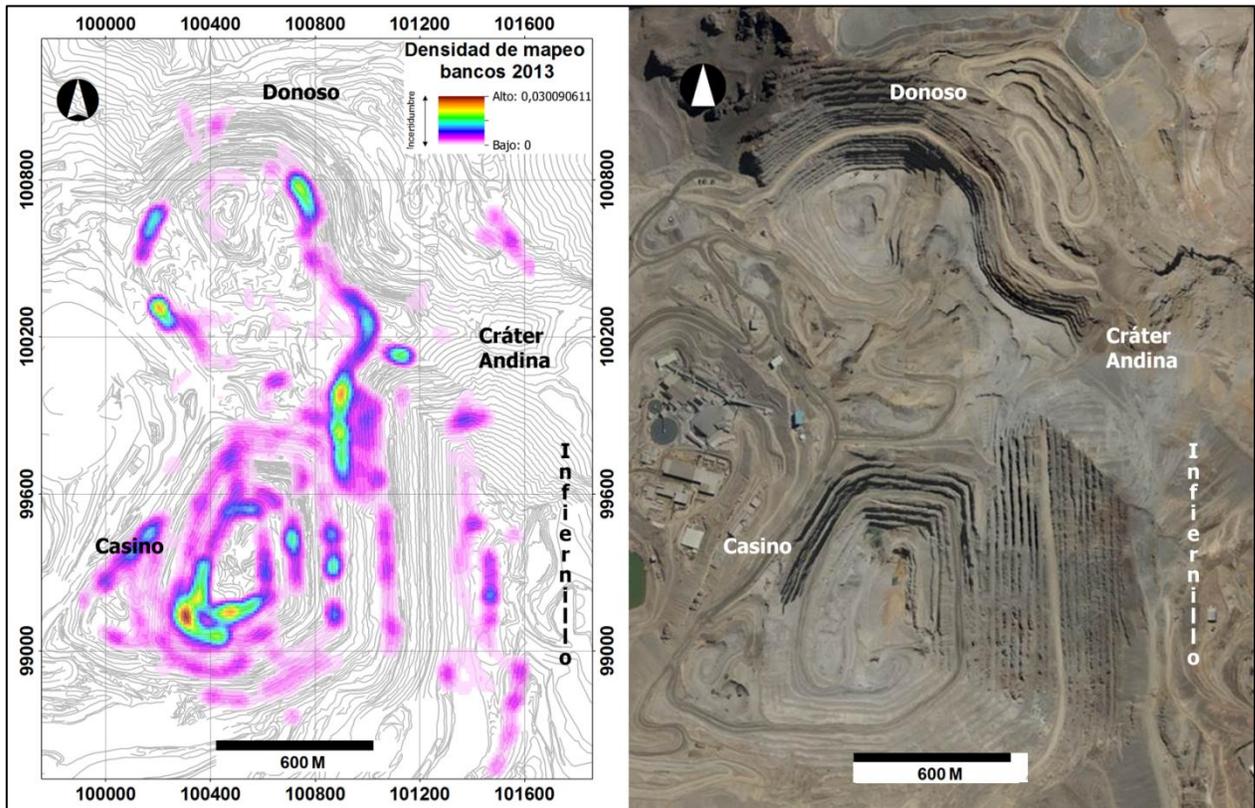


Figura 2: Mapa de densidad de datos estructurales de mapeo de bancos. A la izquierda se observa el predominio de información obtenida en bancos que son o fueron activos (rojo-verde), frente a la baja (morado) o nula (blanco) densidad de datos en bancos colgados, de difícil acceso o restringidos. A la derecha se observa una fotografía en planta de la mina como referencia a la magnitud y distribución del mapeo estructural. Figura tomada de Carrizo *et al.*, (2013).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo de esta memoria es determinar el impacto del levantamiento remoto de datos estructurales en la definición de modelos estructurales de rajos abiertos para el caso de la mina Los Bronces.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la geometría (orientación, traza y persistencia) de las discontinuidades en las paredes de la mina.
- Establecer y/o validar la geometría de fallas principales y mayores en el rajo (persistencia mayor a 30 metros)
- Determinar protocolos de validación para la base de datos indirecta generada en este trabajo.
- Evaluar el impacto del levantamiento sistemático remoto de datos estructurales en la definición de dominios estructurales.

1.3. Metodología de trabajo

La estrategia metodológica del presente trabajo (Figura 3) consta principalmente de tres etapas fundamentales: i) adquisición indirecta de información estructural, incluyendo la validación de las fallas Principales; ii) determinación de la geometría de las estructuras mayores expuestas en los bancos y iii) análisis estructural de la zonación de dominios.

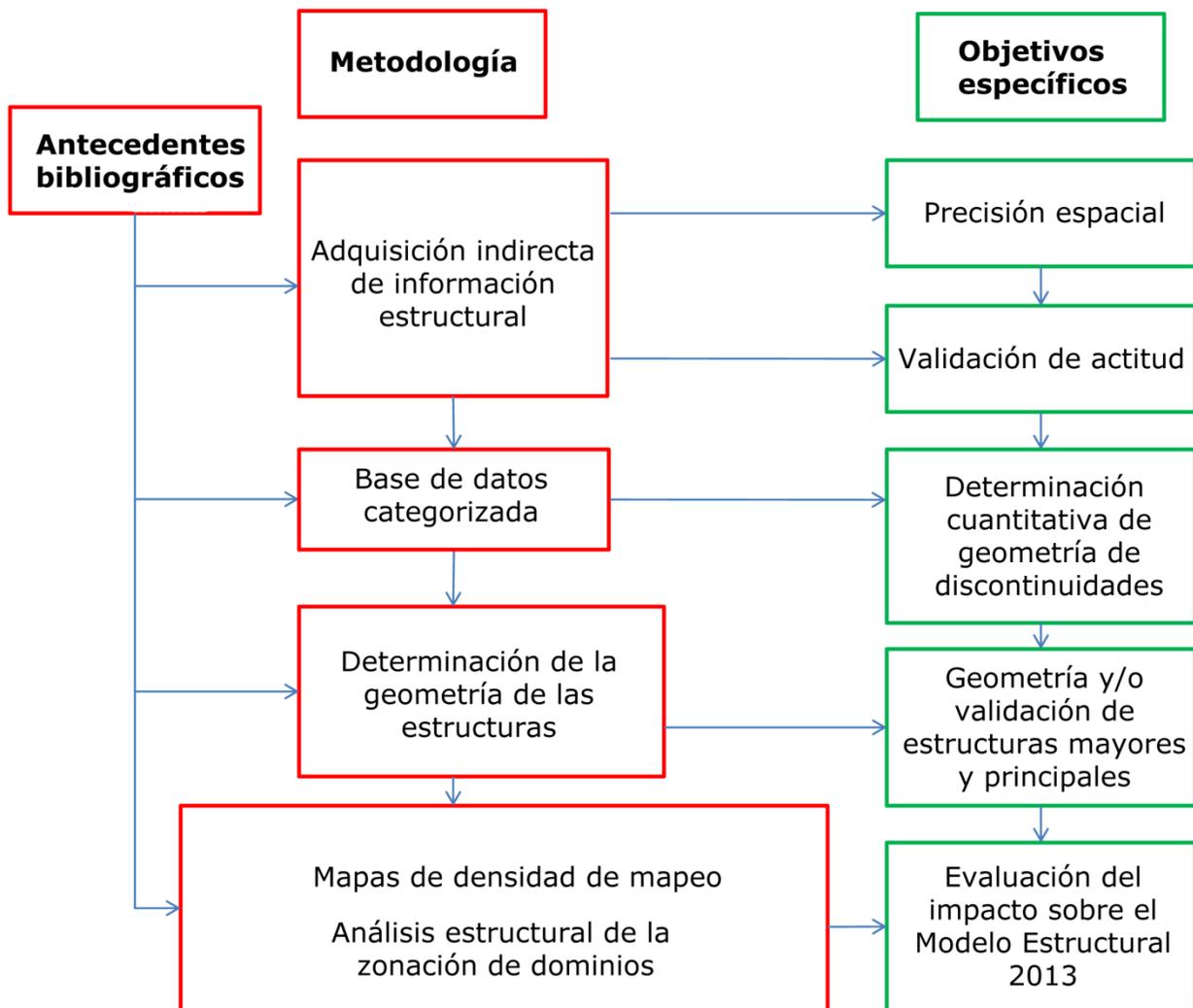


Figura 3: Metodología planteada para el estudio. En el diagrama se observa la relación entre la estrategia metodológica y el cumplimiento de los objetivos específicos planteados en el estudio.

1.3.1. Adquisición indirecta de información estructural

La adquisición de datos de manera indirecta se realizó utilizando el *software* comercial Shape Metrix Beyond y conlleva las diferentes tareas jerarquizadas: en primer lugar se realiza una adquisición de fotografías de las paredes del rajo y su georreferenciación en el espacio mina; luego es realizado un mapeo digital selectivo, generando una base de datos categorizada; y por último se realiza una validación geométrico/espacial en terreno de la base de datos adquirida. Considerando la relevancia de esta metodología y su validación dentro del objetivo de esta memoria, el procedimiento y criterios utilizados son descritos en detalle en el Capítulo 4

1.3.2. Determinación de la geometría de las estructuras expuestas en los bancos

La determinación de la geometría de las estructuras comprende la modelación en 3D de la falla utilizando el *software* comercial *LeapFrog*. En este se establece la arquitectura de la falla utilizando el registro de puntos espaciales pertenecientes a la traza tridimensional, proyectando en profundidad un área de discontinuidad o plano estructural proporcional al largo de la persistencia medida. Esta determinación geométrica fue realizada para todas las estructuras mayores inéditas identificadas en el estudio; y no fue generada para las estructuras principales debido a la ausencia de información suficiente para un modelo correcto, por ejemplo, la ausencia de información de la traza de la estructura a ambos lados del rajo.

1.3.3. Análisis estructural de la zonación de dominios estructurales

El análisis corresponde a una interpretación del aporte de los datos obtenidos en este trabajo en la caracterización de los dominios estructurales del Modelo Estructural 2013 (Carrizo *et al.*, 2013). En primera instancia la base de datos categorizada se agrupa espacialmente acorde a los límites de los dominios estructurales vigentes; luego se realiza una interpretación de los diagramas de contornos de polos de los dominios: se interpreta el comportamiento del dominio considerando solo el uso de la base de datos generada en este trabajo, se identifican los cambios -si es que existen- en el comportamiento del dominio al sumar la nueva información, y finalmente se interpretan los cambios vistos en este ejercicio.

Capítulo 2: Marco geológico

2.1. Contexto Regional

El yacimiento Los Bronces forma parte de la franja metalogénica de pórfidos de Cu-Mo del Mioceno tardío–Plioceno temprano (Toro *et al.*, 2012), y constituye parte del distrito con el mayor contenido de cobre a nivel mundial (Irrarázaval *et al.*, 2010). En términos generales, el depósito se emplaza en una serie de rocas volcánicas y volcanoclásticas neógenas deformadas, pertenecientes a las Formaciones Abanico y Farellones (Toro *et al.*, 2012). El sistema ígneo asociado a la mineralización, expone una larga historia termal, formando diferentes cuerpos intrusivos, subvolcánicos y zonas de alteración hidrotermal (Deckart *et al.*, 2005). A continuación son descritas brevemente las unidades geológicas que forman parte del Distrito Río Blanco – Los Bronces, entidades observables en la Figura 4.

2.1.1. Unidades estratificadas

En el distrito se exponen, como rocas de caja o albergadoras de la mineralización, dos unidades estratificadas que forman parte de una cuenca volcánica de edad Cenozoica desarrollada en el margen occidental de los Andes Centrales (Charrier *et al.*, 2002). La unidad más antigua corresponde a la Formación Abanico, la que es sobreyacida por la Formación Farellones (Charrier *et al.*, 2002). Ambas formaciones están constituidas por rocas volcánicas y volcano-sedimentarias, las que se encuentran deformadas según pliegues de rumbo ortogonal a la fosa (Carrizo *et al.*, 2012), evidenciando un acortamiento coherente con la convergencia de placas. Cabe señalar que a pesar que ambas formaciones presentan una deformación coaxial, el grado e intensidad de ella varía, exponiendo una mayor deformación la Fm. Abanico en relación a la Fm. Farellones (Frikken *et al.*, 2005).

2.1.1.1. Formación Abanico (Aguirre 1960)

Definida por Aguirre (1960) como una secuencia conformada por volcanitas y sedimentitas clásticas terrígenas de colores grises rojizos (Figura 4). La Formación Abanico se extiende aproximadamente entre los 28°S y 39°S a lo largo de la Cordillera Principal presentando un ancho aproximado de 70 Km, una longitud mayor a 1000 km y un espesor estimado de 3000 m (Thiele 1980).

La Fm. Abanico sobreyace a la Formación Colimapu de edad Hauteriviano-Albiano en la zona del río Aconcagua de manera discordante (Aguirre, 1960) y concordante en la zona cordillerana al este de Santiago (Thiele, 1980); además le sobreyace la Formación Farellones de manera concordante como pseudo-concordante (Charrier *et al.*, 2002).

La edad de la Formación Abanico va desde el Eoceno medio-superior al Mioceno temprano y se correlaciona hacia el sur con la Formación Coya-Machalí (Charrier *et al.*, 2002)

2.1.1.2. Formación Farellones (Klohn 1960)

Definida como una potente unidad conformada por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas y rocas piroclásticas (Figura 4), las cuales alternan con sedimentos derivados de la descomposición de estas mismas rocas volcánicas (Klohn 1960). Su definición actual viene dada por Rivano (1990): un miembros inferior tobáceo de composición riolítico-dacítica; y otro superior, compuesto por flujos andesíticos - basálticos intruídos por domos riódacíticos.

La Formación Farellones presenta afloramientos entre los 32°S y 35°S con un espesor aproximado de 2500 m. (Vergara et al., 1979). Esta sobreyace a la Formación Abanico, sin embargo, su contacto es motivo de una fuerte discusión: evidencias actuales señalan la existencia de un contacto transicional y con amplias variaciones tanto norte-sur como este-oeste, reportándose contactos de manera discordante y pseudo-discordante (Charrier *et al.*, 2002).

Dataciones U/Pb en circones muestran un rango de edad entre $16,77 \pm 0,25$ Ma y $17,20 \pm 0,05$ (Deckart *et al.*, 2005) y se correlaciona con la Formación Colorado-La Parva utilizando dataciones radiométricas K/Ar (Beccar *et al.*, 1986).

2.1.2. Unidades Intrusivas

Emplazadas en las rocas de la cuenca volcánica neógena se exponen unidades intrusivas de diferente naturaleza, evidenciando el proceso magmático y subvolcánico neógeno ocurrido en el margen occidental de los Andes Centrales; responsable de la mineralización de la franja cuprífera de Chile Central. Las unidades reconocidas corresponden al Batolito San Francisco (Warnaars *et al.*, 1985), diversos cuerpos subvolcánicos y brechas hidrotermales de edad Oligocena – Pliocena.

2.1.2.1. Intrusivos miocénicos

Asociados al Batolito San Francisco, corresponden a afloramientos de granodioritas, monzonitas cuarcíferas y monzogranitos (Thiele, 1980), altamente peraluminosos y calco-alcalinos (Warnaars *et al.*, 1985), con texturas variables de porfídica a fanerítica y en ocasiones brechosas (Serrano *et al.* 1996).

Dataciones radiométricas de K/Ar muestran una edad de 24 Ma a 10,6 Ma en biotitas (Vergara y Drake, 1979). A su vez, a través del método U/Pb, Deckart *et al.*, (2005) obtiene valores de $11,96 \pm 0,4$ Ma y $8,4 \pm 0,23$ Ma en la granodiorita Cascada y Río Blanco, y 8.16 ± 0.45 Ma en la Diorita. Estas evidencias permiten asignar una edad Miocena.

2.1.2.2. Intrusivos pliocénicos

Denominada Unidad Intrusiva II (Thiele, 1980), corresponden a intrusivos de bastante menor extensión (stocks, lacolitos, filones-manto y diques), compuestos por microdioritas, pórfidos dioríticos, dacíticos y andesíticos, que cortan la Formación Farellones.

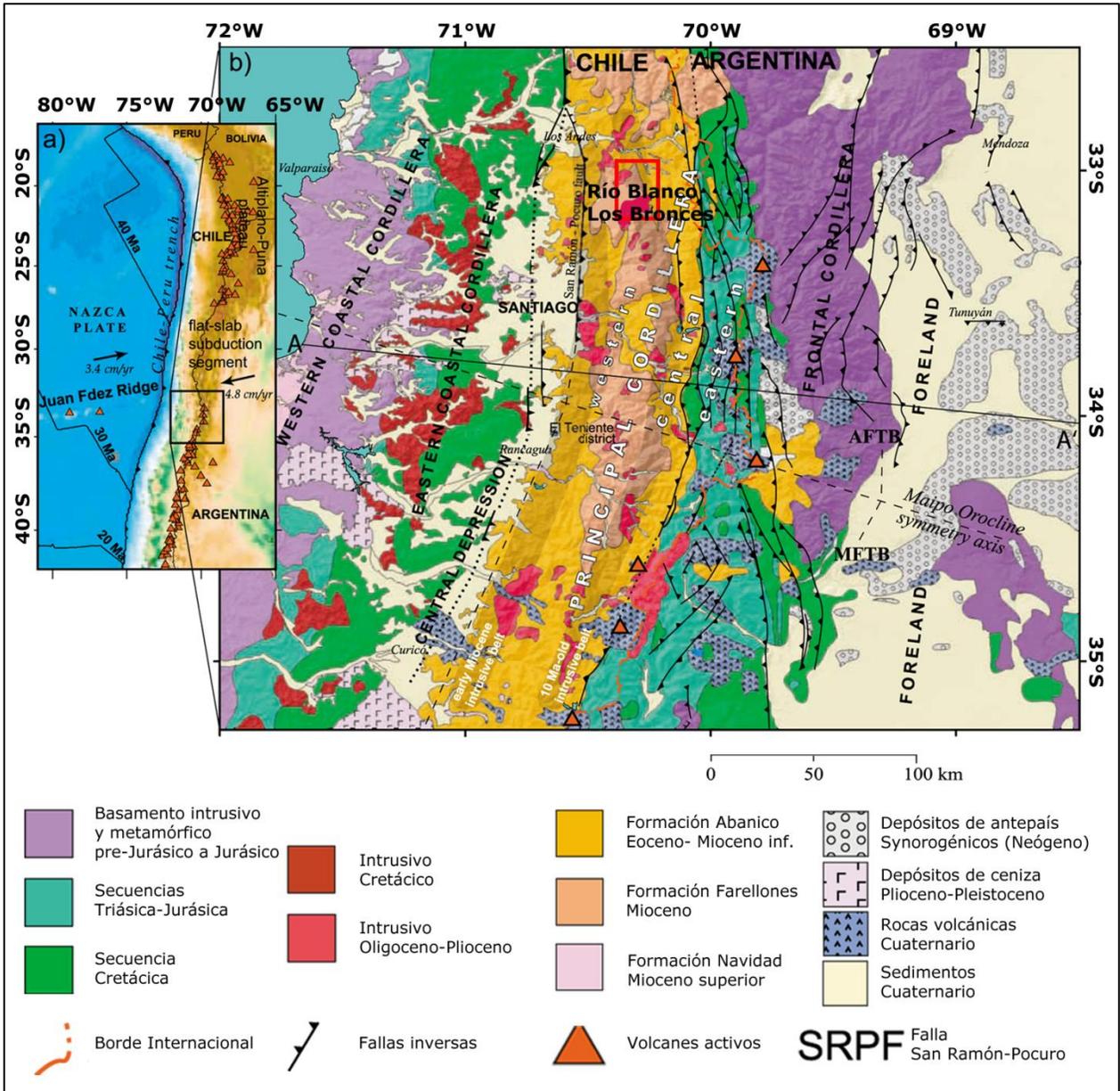


Figura 4: Mapa geológico regional de Chile Central. En la figura se puede observar la: a) localización de la región de estudio a escala nacional. b) Mapa geológico de los Andes de Chile central y Argentina: se presenta la ubicación aproximada de la mina Los Bronces (recuadro rojo) junto a las Formaciones volcánico-sedimentarias Abanico y Farellones, unidades intrusivas y principales fallas activas durante el Neógeno; todas estas elementos de primer orden cercanos y presentes en la geología de la mina. Figura modificada de Farias *et al.*, 2008.

2.1.3. Tectónica regional y marco metalogénico

El Distrito Río Blanco-Los Bronces se emplaza en el margen occidental de los Andes Centrales entre 3000 – 4000 m s.n.m. y su génesis está vinculada a la construcción de los Andes. En este contexto, se reconocen al menos dos procesos de primer orden, responsables de la construcción andina en esta porción del margen, vinculados a la génesis del depósito: i) la construcción de la cuenca Oligoceno – Mioceno de la región Central de Chile, asociada a extensión (Charrier *et al.*, 2002); ii) la depositación sintectónica de unidades pliocenas y acomodación de acortamiento ortogonal a la fosa post-Oligoceno, evidenciada por la inversión de la cuenca Oligocena-miocena y la construcción del relieve: alzamiento y exhumación (Carrizo *et al.*, 2012).

Estos procesos condicionan la arquitectura presente en la zona del Distrito Río Blanco – Los Bronces, donde se aprecia un desarrollo de pliegues por propagación de fallas inversas, estructuras con vergencia hacia el oeste y con compromiso de basamento en profundidad (Armijo *et al.*, 2010; Thiele, 1980).

La génesis del megadepósito es aun motivo de discusión y controversia. Diversos autores exponen diferentes hipótesis que consideran su posición y edad. El distrito se localiza a los 33°S, coincidente con el límite entre una zona de subducción plana (flat slab), carente de volcanismo activo (Stern, 2004), y la Zona Volcánica Sur, la cual se caracteriza por la presencia de volcanismo activo. Por otro lado, la génesis del depósito ha sido asociada a la subducción hacia el sur de la Dorsal de Juan Fernández, hace unos 6 Ma a 3 Ma (Yañez *et al.*, 2002). Sumado a lo anterior, se propone una rápida exhumación de los pórfidos Río Blanco-Los Bronces y El Teniente (Maksaev *et al.*, 2009) y un peak compresional en los Andes Centrales asociado (Farias *et al.*, 2008), periodo durante el cual se produjo la actividad magmático-hidrotermal responsable de la mineralización.

2.2. Geología local

A continuación son descritas en detalle las unidades litológicas que constituyen los macizos rocosos de la Mina Los Bronces y objetos del presente análisis estructural. La geología local del Distrito Río Blanco – Los Bronces se caracteriza por rocas volcánicas de composición predominantemente andesítica pertenecientes a las Formaciones Abanico (solo en profundidad) y Farellones, las que han sido afectadas por la intrusión de unidades magmáticas de composición cuarzomonzonítica y cuarzomonzodiorítica, asociadas al desarrollo del Batolito San Francisco. Considerando esta unidad intrusiva como la más relevante en exposición áreal en el distrito, es posible describir cuatro alteraciones hidrotermales asociadas al largo proceso de mineralización, reconocidas en diferentes trabajos (Warnaars *et al.*, 1985; Contreras, 2003; Toro *et al.*, 2012): alteración propilítica, sericítica, silícica y potásica. Esta mineralización se expone asociada a la intrusión de unidades de brechas hidrotermales, tanto como matriz en las brechas como en forma diseminada en la roca de caja.

A nivel distrital se reconoce un corredor mineralizado de orientación NS, NNW-SSE que se extiende por más de 10 Km en el cual se encuentra inserto Río Blanco-Los Bronces (Toro *et al.*, 2012). Esta franja está contextualizada por una serie de estructuras inversas de orientación NS de alto ángulo, ciegas, que controlan los pliegues de la roca de caja. De manera superficial, se reconocen fallas y vetas-fallas de orientación preferencial NE-SW, con evidencias de desplazamientos transpresivos dextrales discretos (Carrizo *et al.*, 2014).

2.2.1. Rocas estratificadas

Las rocas estratificadas que afloran en el área de estudio corresponden principalmente a rocas volcánico - sedimentarias de la Formación Farellones. Lavas de composición andesítica basáltica, traquiandesítica y dacítica (Cepeda, 1976), con una potencia estimada de 560 m y formando una estructura de “roof pendant” rodeada por la cuarzomonzonita, en la parte superior de la mina. La Fm. Farellones sobreyace a la Formación Abanico, no aflorante en el depósito, y cuyo contacto forma una superficie estructural sintectónica observada en las inmediaciones del distrito. Las evidencias locales de la Fm. Abanico se restringen a clastos contenidos en las brechas hidrotermales definidas en el yacimiento.

2.2.2. Batolito San Francisco

Ubicado en la parte occidental del yacimiento (Figura 5), las rocas aflorantes de este intrusivo en la mina corresponden a cuarzomonzonitas (QM) y cuarzomonzodioritas (QDM), altamente peraluminosas (Warnaars *et al.*, 1985) y calco-alcalinas. Su distribución áreal bordea los 200 km² (Serrano *et al.*, 1996), 20 Km en la N-S y 10 Km en la E-W, e intruye tanto a las rocas de la Fm. Abanico como a las de Fm. Farellones. A continuación, son descritas las principales características de las litologías intrusivas aludidas:

2.2.2.1. Unidad cuarzomonzonita (QM)

Presente en gran parte de Los Bronces (Figura 5), corresponde a granitos, granodioritas y cuarzomonzodioritas (Thiele, 1980) con textura hipidiomórfica inequigranular de grano medio a grueso y color gris.

En cuanto a las alteraciones que afectan la unidad, la presencia de biotita secundaria y anhidrita, junto a cuarzo, biotita y pirita en vetillas tipo A, indicarían una alteración principal potásica. A esta alteración se le sobreimpone una penetrativa alteración propilítica, con presencia de clorita, biotita secundaria y carbonatos. Finalmente, se presenta una alteración fílica y argílica intermedia poco desarrollada (modificado de Contreras, 2003).

Sus equivalentes intrusivos en Río Blanco -sector perteneciente a la Mina Andina, contigua a la Mina Los Bronces- son para la QM gruesa la Granodiorita Río Blanco y para la QM fina la Granodiorita Cascada (Toro *et al.*, 2012). Las edades en el sector Río Blanco para estas rocas son: Granodiorita Río Blanco 11.96 ± 0.40 Ma, Granodiorita Cascada de $8,40 \pm 0,23$ Ma y Diorita de $8,16 \pm 0,45$ Ma (Deckart *et al.*, 2005).

2.2.2.2. Unidad cuarzomonzodiorita (QDM)

Conjunto de litologías de composición diorítica, y tonalítica a granodiorítica, con textura hipidiomórfica inequigranular de grano fino y color gris a gris verdoso. Es afectada por las mismas etapas de alteración de la unidad anterior; sin embargo, se diferencia de estas por la presencia de núcleos de alteración que se sobreimponen entre sí (Contreras, 2003).

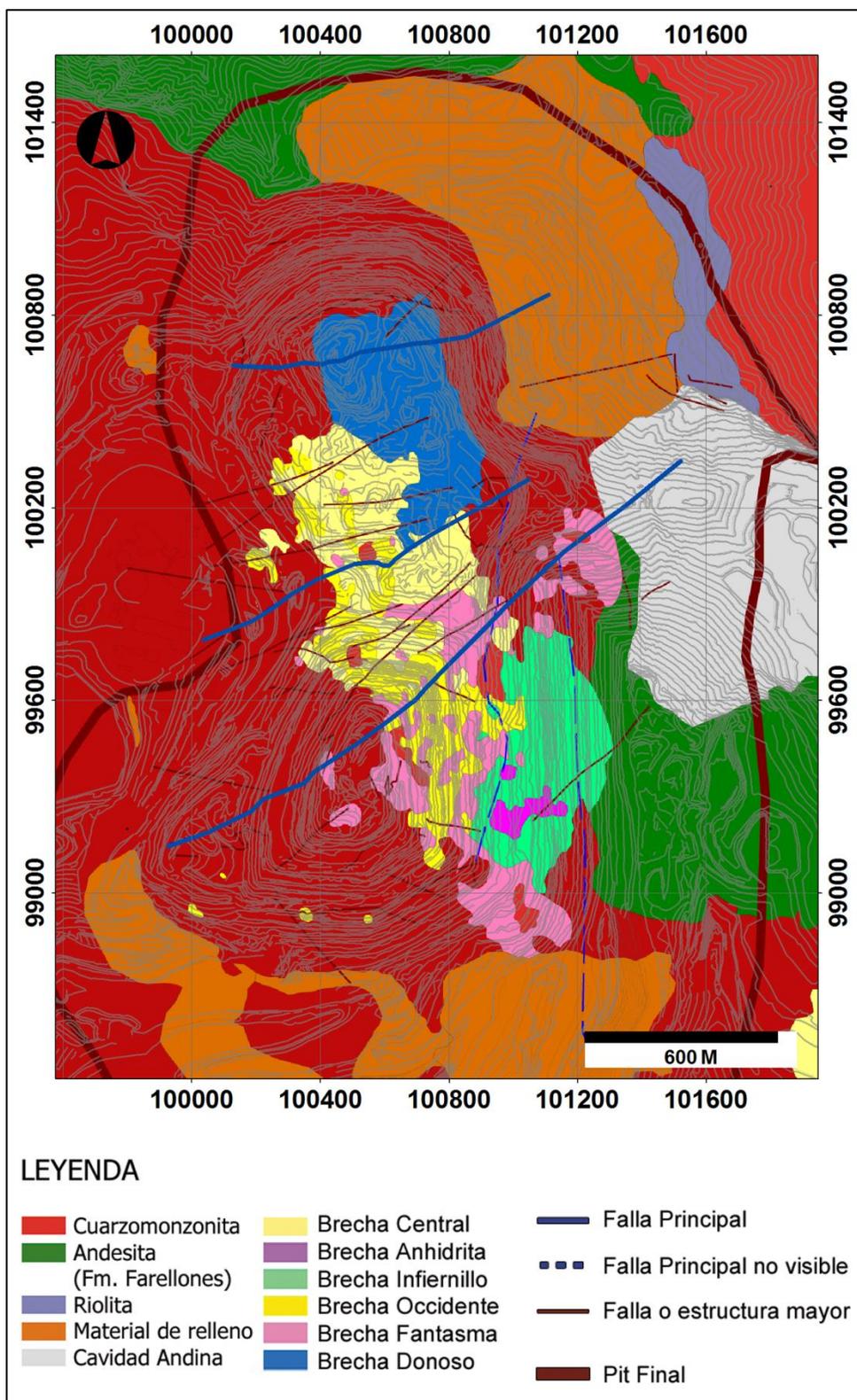


Figura 5: Mapa geológico de la mina Los Bronces. En la figura se observan las principales litologías y estructuras presentes en la mina: el amplio afloramiento de la unidad de cuarzomonzonita (QM), las distintas brechas aflorantes en la actualidad, la presencia de lavas andesíticas (Fm. Farellones) en la parte este y superior de la mina; y las estructuras principales y mayores definidas en el Modelo Estructural 2013. Mapa geológico modificado de Geología Actualizada al 04/07/2013 preparado por Juan Jara, Superintendencia de Geología, Los Bronces, AngloAmerican Chile.

2.2.3. Complejo de brechas

Definidos por Warnaaars *et al.*, (1985), corresponden a siete cuerpos clasificados según el tipo de matriz y/o cemento, naturaleza y forma de los clastos, tipos y grados de alteración. En la Tabla 1 se presentan las siete brechas presentes en Los Bronces ordenadas según su intrusión y algunas de sus características.

Tabla 1: Brechas presentes en la mina Los Bronces. En la tabla se presenta el tipo de brecha y sus características generales.

| Tipo Brecha | Características generales |
|--|--|
| Brecha Fantasma (BXF) | Brecha de clastos (predominante) y matriz bastantes homogéneos con alteración qz-ser (moderada a fuerte). Los clastos corresponden en su mayoría a cuarzomonzonita. Presenta mineralización diseminada de py, cpy, cc y mo. |
| Brecha Central (BXC) | Brecha de clastos principalmente cuarzomonzoníticos y matriz gris oscura de turmalina. Presenta una alteración de qz secundario, qz-ser y argilización. Los sulfuros presentes en esta unidad son: py, cpy, cc, mo y ocasionalmente bn de forma diseminada, la cpy también puede presentarse en vetillas. |
| Brecha Occidente (BXO) | Brecha de color gris verdoso con clastos (predominantes) cuarzomonzoníticos y en menor medida andesíticos, ambos alterados a chl y en menor medida a qz-ser. La matriz está compuesta de polvo de roca, chl, tm, ser, spec y sulfuros (py, cpy, mo, cc y ocasionalmente bn). |
| Brecha Infiernillo (BXI) | Polimíctica de clastos andesíticos y en menor medida de cuarzomonzonita y pórfido cuarzo latita alterados fuertemente a chl, silicificados y más débil a qz-ser. La matriz está compuesta de polvo de roca, chl, tm, ser, spec, py, cpy, mo, cc y bn). La brecha se distingue por su intenso color verde. Esta brecha contiene clastos de BXC, y en profundidad cambia a BXO. |
| Brecha Anhidrita (BXA) | Brecha de matriz compuesta por anh, tm, spec, qz, sulfuros (py, cpy, mo). Los clastos corresponden a fragmentos de BXI y BXC, alterados fuertemente a chl y moderada silicificación. |
| Brecha Gris Fina (BXG) | Brecha de matriz gris compuesta por qz, polvo de roca, ser, chl, spec y sulfuros (py, cpy, cc). Los clastos son de composición pórfido cuarzomonzonítico, cuarzolatítico y andesitas, alterados a qz-ser y silicificación moderada. La mineralización se encuentra diseminada en la matriz y en los clastos como vetillas y de manera diseminada. |
| Brecha Donoso (BXD) | Brecha clastosuportada de matriz compuesta por tm, qz, py, cpy, hierro, y spec. Los clastos son principalmente fragmentos de cuarzomonzonita, cuarzomonzodiorita (contiene clastos de BXF y BXC) y andesita. La alteración reportada es sobre los clastos y es de carácter qz-ser y en menor medida silicificación. El contenido de cobre primario es más alto que en las otras brechas, exceptuando para algunas zonas de la BXI. |
| <p>Abreviaciones: act: actinolita; mt: magnetita; spn: esfeno; plg: plagioclasa; ap: apatito; chl: clorita; anf: anfibola; qz: cuarzo; ru: rutilo; tm: turmalina; ser: sericita; ksp: feldespato potásico; bt: biotita; anh: anhidrita; sul: sulfuro; spec: especularita; bn: bornita; py: pirita; cpy: calcopirita; mo: molibdenita; cc: calcosina</p> | |

2.2.4. Chimenea de brecha riolítica

Este cuerpo constituye el Miembro La Copa del Complejo Subvolcánico Río Blanco y fue definido por Latorre (1981) como una chimenea de brecha subvolcánica de composición riolítica, que en su parte superior está compuesta por flujos de brechas tobáceas soldadas riolíticas y pórfido riolítico. Con respecto a las relaciones de contacto, este miembro se relaciona mediante una discordancia de erosión con la Formación Farellones

2.2.5. Marco estructural distrital

La evolución tectónica distrital de la zona en estudio continúa siendo un problema abierto. En términos generales se exponen observaciones de primer orden que describen la estructura distrital (Carrizo *et al.*, 2012): i) Sistema de fallas inversas imbricadas ciegas, con vergencia oeste, responsables del alzamiento del frente de montaña del margen occidental Andino; y evidenciado por la deformación en inversión de la cuenca Oligocena – Miocena de las Fms. Abanico y Farellones; ii) el emplazamiento de un sistema magmático mineralizador en concomitancia con la deformación en acortamiento orogénico; iii) El desarrollo de una deformación discreta de fallas y vetas fallas superficiales, de orientación NW-SE y E-W asociada a la parte superficial de la cuenca volcánica invertida (Fm. Farellones).

Asociadas a estas observaciones se han desarrollado al menos dos ideas que permiten explicar la evolución de la estructura y el proceso magmático mineralizador. Piquer y Skarmeta (2012) señalan un control estructural de la mineralización asociado a un sistema de fallas oblicuas pre-mineral de orientación NW-NNW y NE que fueron originadas como fallas normales. Estos sistemas fueron reactivados selectivamente durante la posterior compresión en donde el sistema NW-NNW mostrando un movimiento inverso-sinistral; mientras que el sistema NE muestra un movimiento principalmente dextral. Esta reactivación habría ocurrido al mismo tiempo en que la Fm. Farellones era depositada y el Batolito San Francisco, junto a la serie de pórfidos asociados al sistema Río Blanco-Los Bronces, eran emplazados (Piquer y Skarmeta, 2012).

Por otra parte, Carrizo *et al.*, (2012) señala un control estructural de primer orden, asociado a fallas inversas NS, responsables del alzamiento del frente cordillerano Andino. La propagación en profundidad de estas estructuras imbricadas, con vergencia al oeste, habrían configurado la fábrica tectónica de gran escala (10^2 - 10^3 km) en la corteza favoreciendo el emplazamiento magmático sintectónico. La fábrica regional está formada por pliegues kilométricos asociados a fallas ciegas en profundidad, con ejes de orientación ~NS, desarrollados en la cuenca volcanoclástica de Abanico – Farellones, evidenciando la inversión neógena de la cuenca. En este ambiente tectónico se habría intruído el Batolito San Francisco y el complejo intrusivo de Río Blanco – Los Bronces, cuyas direcciones de emplazamiento tridimensional están controladas por la fábrica en acortamiento de la cuenca de Abanico-Farellones deformada. Esto explica la orientación NS – NNW-SSE de los emplazamientos y la mineralización.

Junto con la actividad hidrotermal tardía y la exhumación del distrito, se habrían desarrollado, en la parte superficial del sistema en acortamiento, sistemas de fallas oblicuas (NE-SW y NW-SE) híbridas, acomodando apertura y desplazamientos laterales discretos. Estas últimas estructuras son las observadas con claridad en la Mina Los Bronces, las cuales representarían una deformación discreta en la parte alta de los pliegues regionales.

A pesar que ambos modelos identifican, en términos generales, las mismas estructuras, la interpretación genética en escala es diferente; tan sólo Carrizo *et al.*, (2014) expone un modelo que converge tanto la escala de la deformación, el proceso de mineralización, la variación en naturaleza y escala de la deformación en profundidad y la construcción del relieve Andino.

2.2.5.1. Las Fallas en el distrito

Fallas maestras asociadas a la construcción Andina

Considerando el estilo estructural y la escala de las estructuras es posible determinar tres fallas maestras en el distrito: Falla San Francisco, Río Blanco y Yerba Loca. Estas corresponden a fallas inversas de alto ángulo, de traza sinuosa y de orientación NS, responsables del alzamiento del margen occidental de Los Andes en la región en estudio (Carrizo *et al.*, 2012). Dichas fallas corresponden a fallas ciegas, cuya expresión, a escala distrital, en superficie está evidenciada por pliegues de propagación de falla formados en las rocas neógenas. Los “Tip-lines” de dichas fallas debieren encontrarse, al menos, a unos 5 km de la superficie y sus raíces forman un sistema de fallas imbricadas denominadas Western Andean Thrust (WAT) (Armijo *et al.*, 2010).

Fallas discretas asociadas a bloques internos (escala distrito)

A escala distrital se observan fallas discretas que afloran en la superficie actual de erosión, las que se reconocen tanto en las rocas intrusivas como en la roca de caja volcánica del distrito y la Mina. Ellas representan las estructuras más observadas en el distrito y la Mina Los Bronces. Su expresión en superficie no alcanza en general los 6 - 8 km de longitud. Se caracterizan en general por fallas, vetas-falla y vetas, con rellenos hidrotermales y estriaciones subparalelas al rumbo (Carrizo *et al.*, 2014). Estas fallas internas son divididas en Fallas de orientación NE-SW y NW-SE.

Fallas de orientación NE-SW

Presentan orientación N40°E y en algunos casos conectan de manera asintótica las fallas inversas de borde (Carrizo *et al.*, 2012). Su cinemática es de tipo transtensional dextral (Carrizo *et al.*, 2010; 2011; 2014). Estas fallas son responsables de generar permeabilidad secundaria en la roca mineralizada controlando los conductos de transporte de fluidos durante los múltiples eventos hidrotermales (Carrizo *et al.*, 2012).

Fallas de orientación NW-SE

Estas fallas han sido históricamente documentadas en mapas distritales, representadas como lineamientos cuyas trazas han sido interpretadas sin un respaldo objetivo. Por otra parte, su identificación en terreno ha sido escasa y han sido blancos permanentes de búsqueda debido a su potencial relación metalogénica con la tendencia geométrica de la mineralización. Esto ha sido motivo de diversas hipótesis, sin embargo al parecer la más aceptada corresponde a que la ausencia de estas estructuras en terreno se debe al reemplazo de las estructuras por cuerpos de brechas y pórfidos. Como argumento circular, esto explicaría la orientación NW-SE de los cuerpos de brechas, otorgando a estas estructuras un papel crucial en la evolución tectono-magmático del distrito (Toro *et al.*, 2012; Irarrázaval *et al.*, 2010)

2.2.5.2. Marco estructural local: Modelo 3D de la mina Los Bronces

A continuación se presentan las características generales del Modelo estructural 2013 el cual fue usado como base para esta memoria.

2.2.5.2.1. Clasificación estructural: Fallas principales, mayores y menores

Dependiendo del compromiso del macizo respecto a las estructuras, escala de las evidencias geológicas –presencia de relleno y el grado de contraste visual de este con el macizo, espesor de salbanda-, extensión áreal de los puntos de control (puntos de modelamiento estructural en superficie y sondaje), modelo histórico y la incidencia operacional de estas Carrizo *et al* (2013) clasifica las estructuras en tres grupos: Falla principal cuando esta estructura muestra una persistencia mayor a 10 bancos (150 metros), presenta antecedentes históricos de su presencia y una expresión visual/geológica evidente de su traza; Falla Mayor cuando la falla posee una persistencia de entre dos a diez bancos (mayor a 30 metros pero menor que el largo de una Falla Principal) y evidencias de su traza de carácter moderada y Fallas Menores a toda estructura con un largo de traza menor a dos bancos y cuya expresión visual/ geológica sea discreta.

Bajo esta clasificación se señala la presencia de cinco Fallas Principales, cuyas características se resumen en la Tabla 2, y sesenta y un Fallas Mayores. La ubicación espacial dentro de la Mina Los Bronces de estas estructuras se observa en la Figura 6.

Tabla 2: Características generales de las Fallas Principales validadas y definidas en el Modelo Estructural 2013 (Carrizo *et al.*, 2013). En la tabla se presenta el nombre de la falla, su orientación, el grado de visibilidad en terreno y la categoría vectorial otorgada.

| Nombre Falla | Actitud | Grado de Visibilidad | Categoría Vectorial |
|---------------------|----------------|---|---------------------|
| Falla Norte | W-E/~90° | Reconocible en terreno | Definitivo |
| Falla Central | N60°W/~90° | Reconocible en terreno | Definitivo |
| Falla Sur | N60°-65°W/~90° | Reconocible en terreno como un sistema anastomosado | Definitivo |
| Falla Infiernillo | N-S/~90° | Reconocible en una parte del rajo | Potencial |
| Falla Infiernillo 2 | N-S/~90° | No observada (Falla no aflorante) | Potencial |

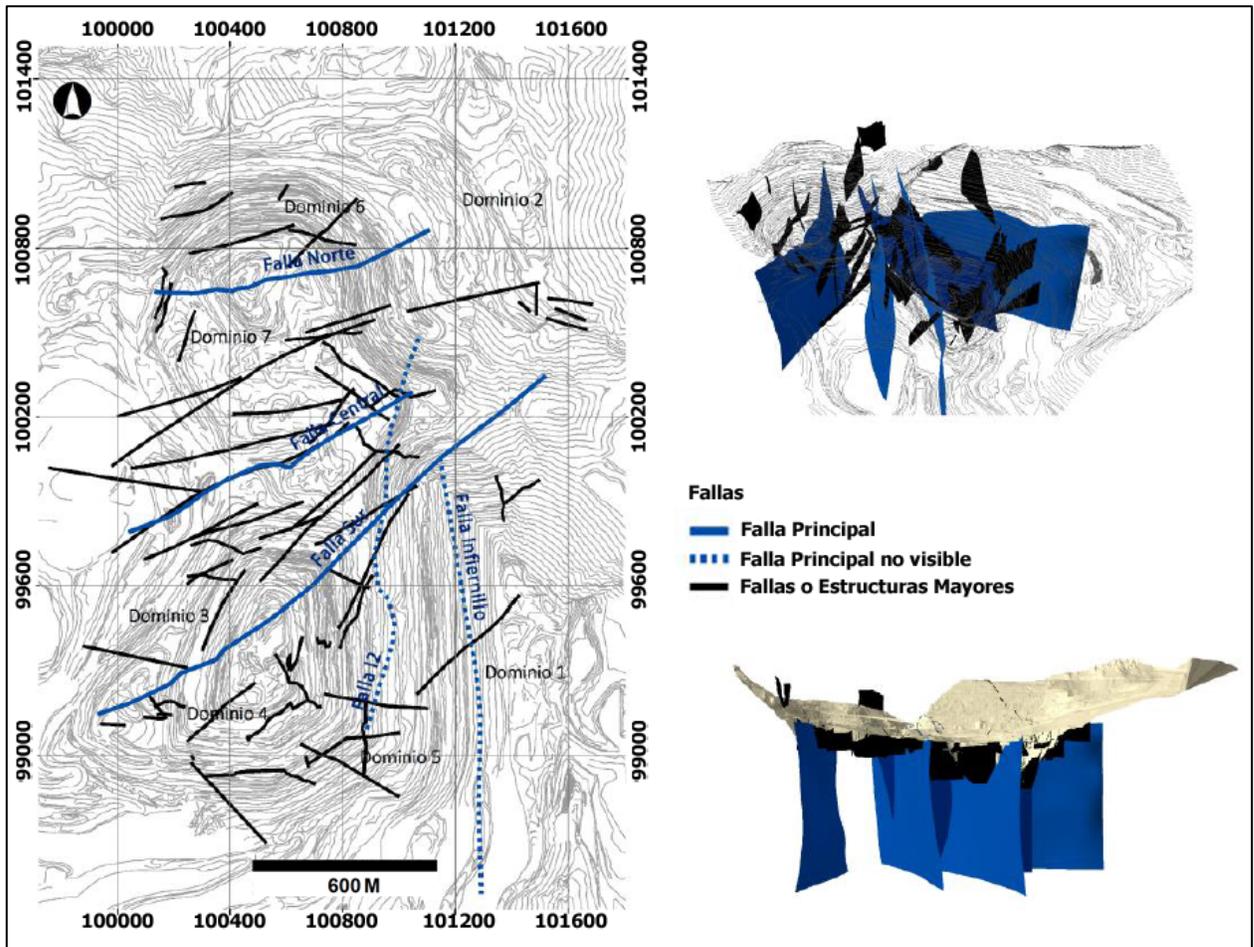


Figura 6: Modelo de fallas principales y mayores. En el mapa se observa una vista en planta de la ubicación espacial de las Fallas Principales (azules) y Mayores (negras) definidas en el Modelo Estructural 2013 de la mina Los Bronces (Carrizo *et al.*, 2013). A su vez, se observan vistas generales de las estructuras, una oblicua hacia el NE y una lateral hacia el Este, en la cual se nota la modelación en profundidad de estas.

2.2.5.2.2. Dominios estructurales

Definidos por Carrizo *et al.* (2013), responden a una actualización generada en base a información preexistente y el mapeo generado en la propia campaña del Modelo Estructural 2013. Corresponden a siete dominios estructurales (Figura 7) controlados primordialmente por las fallas, litología, alteración/mineralización y/o una combinación de estas.

Dominio Sureste (Dominio 1): acotado en su flanco Oeste por la Falla Infiernillo, se caracteriza por presentar fallas de alto ángulo con una orientación ENE-WSW, y otras discretas de rumbo N-S y NW-SE. Este dominio presenta un control litológico en su definición, ya que se encuentra completamente formado por Andesita.

Dominio Noreste (Dominio 2): se encuentra formado por una familia de fallas de alto ángulo con orientación WNW-ESE y fallas de orientación NNE-SSW. Este dominio, al igual que el dominio Sureste, presenta un control litológico en su definición por la Riolita.

Dominio Central (Dominio 3): se caracteriza por la presencia de fallas de alto ángulo con una orientación principal ENE-WSW, con *sets* conjugados; y fallas de bajo ángulo con una disposición NNE-SSW. Se encuentra controlado por fallas que lo limitan tanto por su porción norte como sur, Fallas Central y Sur, respectivamente.

Dominio Suroeste (Dominio 4): se encuentra determinado por fallas de alto ángulo de orientación NE-SW y NW-SE, con sus respectivos *sets* conjugados; y fallas de bajo ángulo con una orientación NNE-SSW. Este dominio es controlado por la presencia de dos fallas principales: Falla Sur y Falla I2, que lo limitan por el norte y este, respectivamente.

Dominio Sur-Central (Dominio 5): caracterizado por fallas de alto ángulo con orientación NNE-SSW y NW-SE, y sus respectivos *sets* conjugados. Este dominio se encuentra controlado por la presencia de la Falla I2 de orientación N-S.

Dominio Norte (Dominio 6): se encuentra formado por fallas sub-verticales de orientación ENE-WSW y otras de menor manteo (~60°) y orientación N-S. Este dominio se encuentra controlado por la presencia de la Falla Norte al sur y en su flanco este por la Riolita.

Dominio Norte-Central (Dominio 7): se caracteriza por presentar fallas de alto ángulo con una orientación E-W y NNW-SSE, además se observan fallas de menor manteo, con orientaciones N-S y NW-SE. Este dominio está controlado por la presencia de dos fallas principales: Falla Norte y Falla Central, limitándolo por el norte y sur, respectivamente

Para un mayor detalle en cuanto a la caracterización estructural de cada dominio revisar el Anexo A.

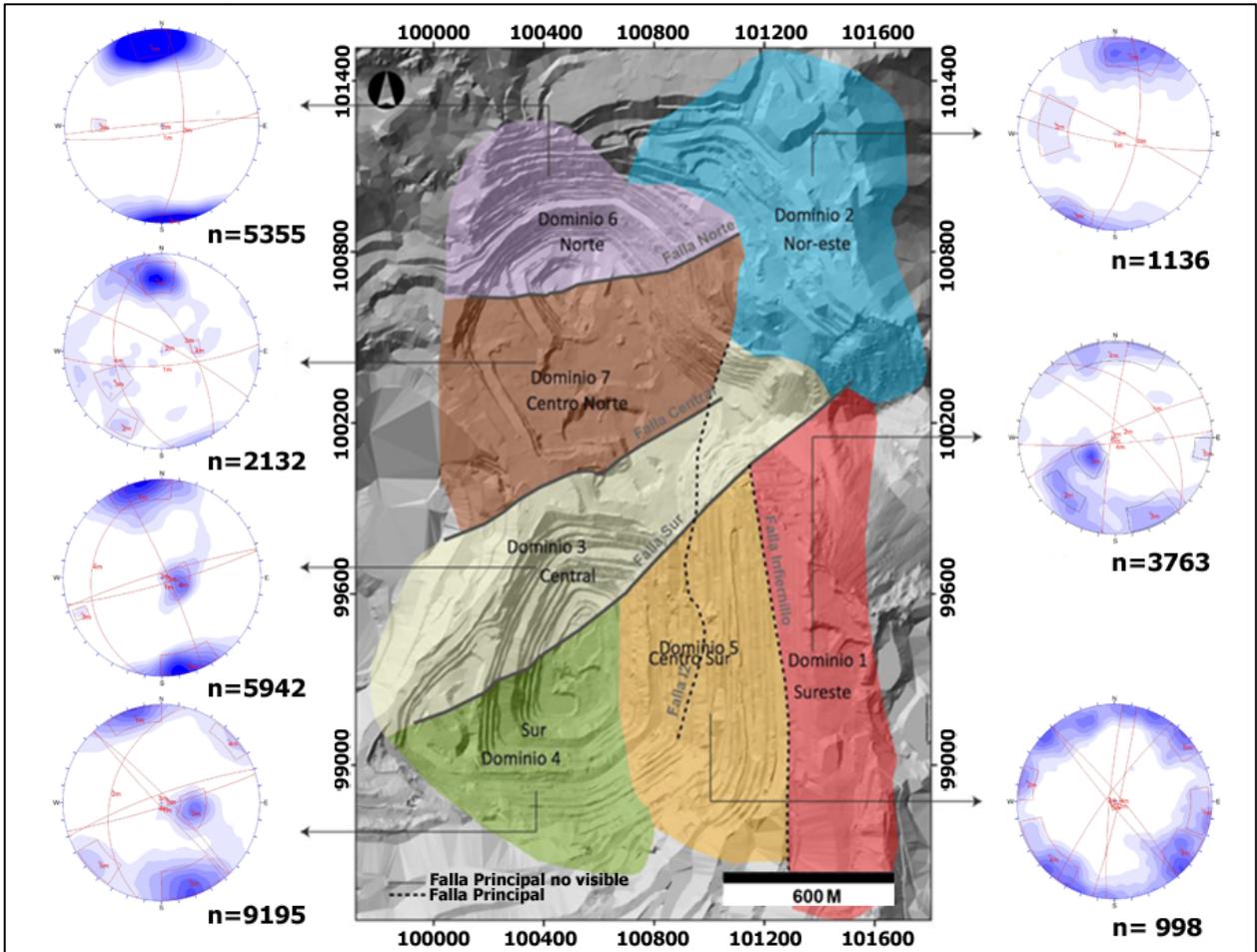


Figura 7: Dominios estructurales de la Mina Los Bronces. En la figura se observan los siete dominios estructurales definidos en el Modelo Estructural 2013 junto al diagrama de contorno de polos respectivo a cada dominio. Además, se aprecian las Fallas Principales, controladoras del límite del Dominio 3, 4, 5, 6 y 7; y la cantidad de datos (n) utilizados en la definición de cada uno de estos. Figura modificada de Carrizo *et al.*, (2013).

Capítulo 3: Aspectos metodológicos generales del levantamiento remoto de datos estructurales

En el presente capítulo es abordada de manera general las características metodológicas del levantamiento de datos estructurales de manera remota utilizada en esta memoria.

El principio básico del levantamiento remoto realizado es la generación de una imagen 3D mediante la técnica de *shape from stereo* o estereo-fotogrametría. Se han desarrollado diferentes *software* especializados siguiendo este principio, como SIROVISION, JointMetriX3D o ShapeMetrix3D (Gaich *et al.*, 2006; Pötsch y Gamboa, 2009; J. S. Coggan *et al.*, 2007; Cerda, 2006), los cuales ofrecen una rápida y fácil adquisición de datos, documentación permanente de las caras y mapeo de bancos, obtener información de caras a una o varias centenas de metros respecto a la posición del geólogo (eliminando posibles problemas de acceso a la frente) y un ahorro sustancial de tiempo de mapeo y adquisición de datos en terreno (Pötsch y Gamboa, 2009).

3.1. Equipo y toma de fotografías

En este caso se utilizó Shape Metrix Beyond, *software* especializado desarrollado por la empresa austriaca 3G Software & Measurement. Su principio se basa en la obtención de dos fotografías de la misma parte de una superficie tomadas de distinta localizaciones utilizando una cámara convencional calibrada (Figura 8), en este caso de 1/5 a 1/8 de la distancia hacia el frente (Figura 9), para luego mediante técnicas de visión por computadora-representación y fotogrametría digital- estimar y recrear una superficie normal al punto de visión.



Figura 8: Equipo utilizado en la campaña de mapeo: Se observa el software SMB, la licencia de este, la cámara calibrada y tres lentes de aumento (Canon EOS-5D Mark III y lentes de 24-70mm, 70-200mm y 300mm).

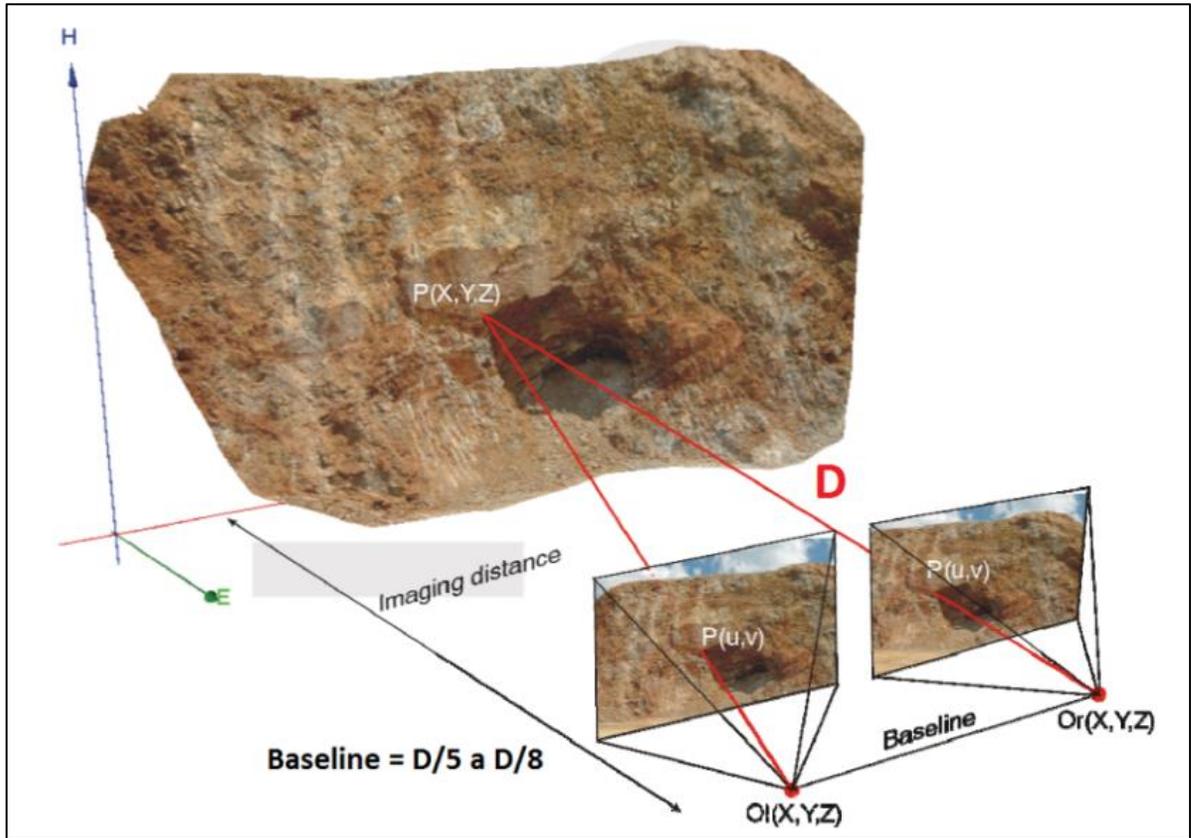


Figura 9: Estaciones de toma de un par de fotografías para su uso en fotogrametría. En el diagrama se observan las condiciones que se deben cumplir, de ubicación del fotógrafo, para una correcta toma de la imagen, en específico, para su uso en el *software* Shape Metrix Beyond. En esta, el observador debe situarse respecto al frente a una distancia D , y debe existir una relación de distancia lateral (*baseline*) entre el par de estaciones de toma de fotografías de entre $1/8$ a $1/5$ de la distancia D dada. (Gaich y Pötsch, 2012).

Con el fin de abarcar la totalidad del área de interés, en este estudio se subdividió la mina en seis sectores: Donoso Norte, Donoso Este, F5SW Norte, F5SW Sur, Infiernillo Este e Infiernillo Norte (Figura 10a). Debido a esta subdivisión, y con el fin de asegurar una calidad óptima de las fotografías, los puntos de toma de imágenes fueron condicionados por la cara de banco a obtener, variando parámetros como: distancias hacia el frente, momento del día debido a la propia operación mina y lugares de toma de fotografía (Figura 10b): desde nivel mina, sobre camellones gracias a la utilización de arnés (Figura 10c) y observatorios propios de la mina; definiendo así siete puntos de toma de fotografía para los seis sectores de la mina.

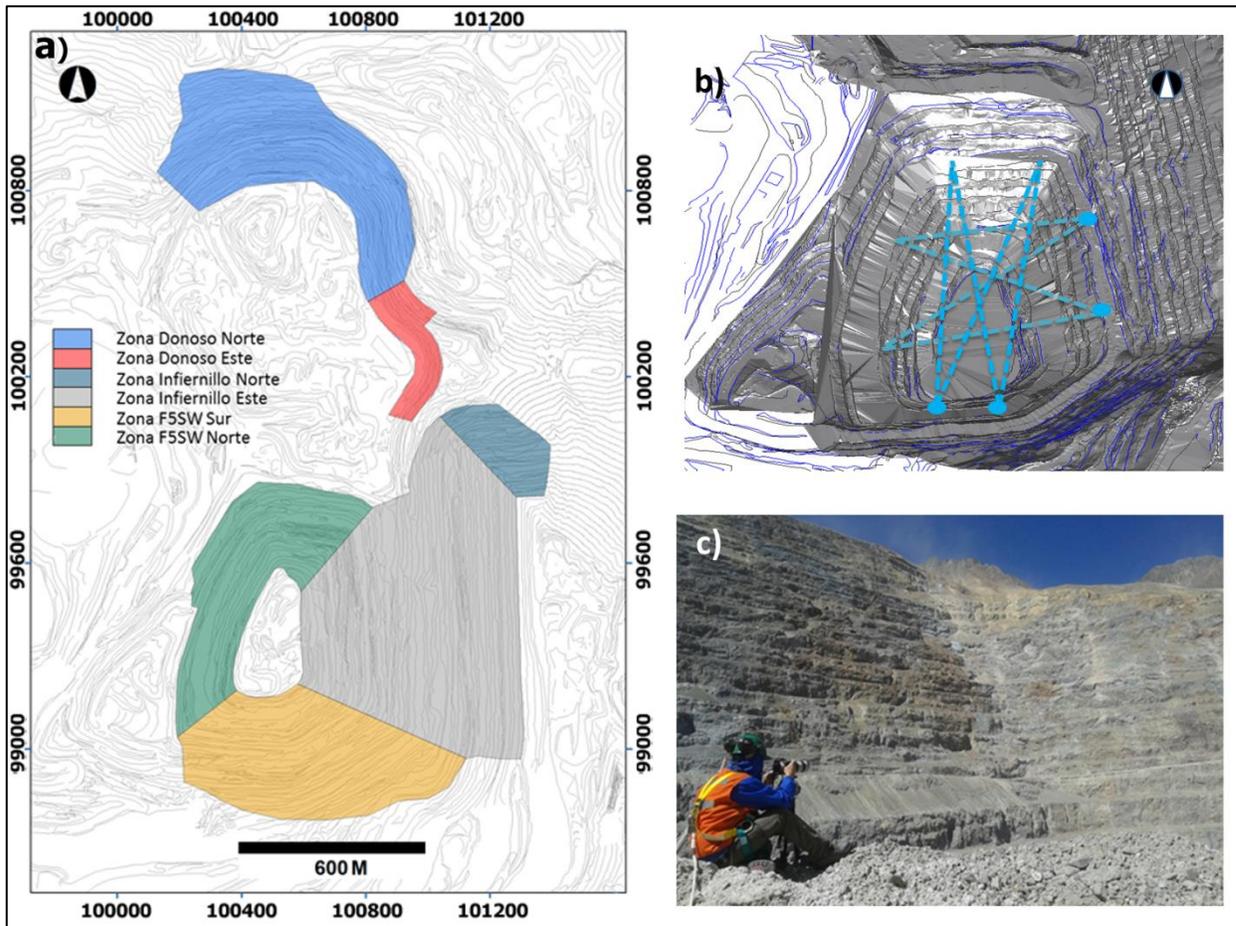


Figura 10: Metodología de toma de fotografías del rajo. En el esquema se observa: a) un mapa de vista en planta de la mina en donde se aprecia la división en sectores, utilizados en la etapa de toma de fotografías; b) ejemplo de estaciones de toma de fotografías, en este caso, para el rajo infiernillo; c) toma de fotografía de F5SW sobre un camellón utilizando arnés de seguridad, vista hacia el sur de rajo.

3.2. Procesamiento de fotografías: reconstrucción y georreferenciación del rajo

Se generaron dos tipos de reconstrucciones dependiendo del tipo de fotografía tomada en terreno: reconstrucción de frente de mina, en donde se obtuvieron 26 pares de fotografías con el lente de 24-70 mm y reconstrucción en detalle utilizando 360 pares de fotografías tomadas con el lente de 200-300 mm.

La reconstrucción de frente de mina recrea cada sector mina, su objetivo principal fue ser usado como referencia espacial para las fotografías en detalle utilizando la herramienta *ModelMerger-Slave* de SMB, pero además, debido a que generan una visión del rajo a escala mayor, se emplearon para una interpretación estructural inicial de las caras de la mina y como medio de observación de estructuras mayores y principales mapeadas en las fotos de detalle. Cada reconstrucción fue generada a través de la unión de fotografías hasta abarcar el sector mina requerido, y luego fueron georreferenciadas gracias a puntos espaciales medidos en terreno con el apoyo de topografía mina.

Por el contrario, las reconstrucciones de detalle o de bancos se utilizaron como base para el mapeo estructural, y con el fin de generar un mapeo estructural en donde la traza o la mayor parte de esta sea parametrizada en una sola reconstrucción, es que se generó una unión vertical de las reconstrucciones de detalle (Figura 11). Esta metodología permite una mejor observación y seguimiento de la falla, obtener las características de la traza mediante solo un ejercicio (sin medir varios segmentos y posteriormente unirlos), y así evitar errores en la caracterización de orientación y/o persistencia.

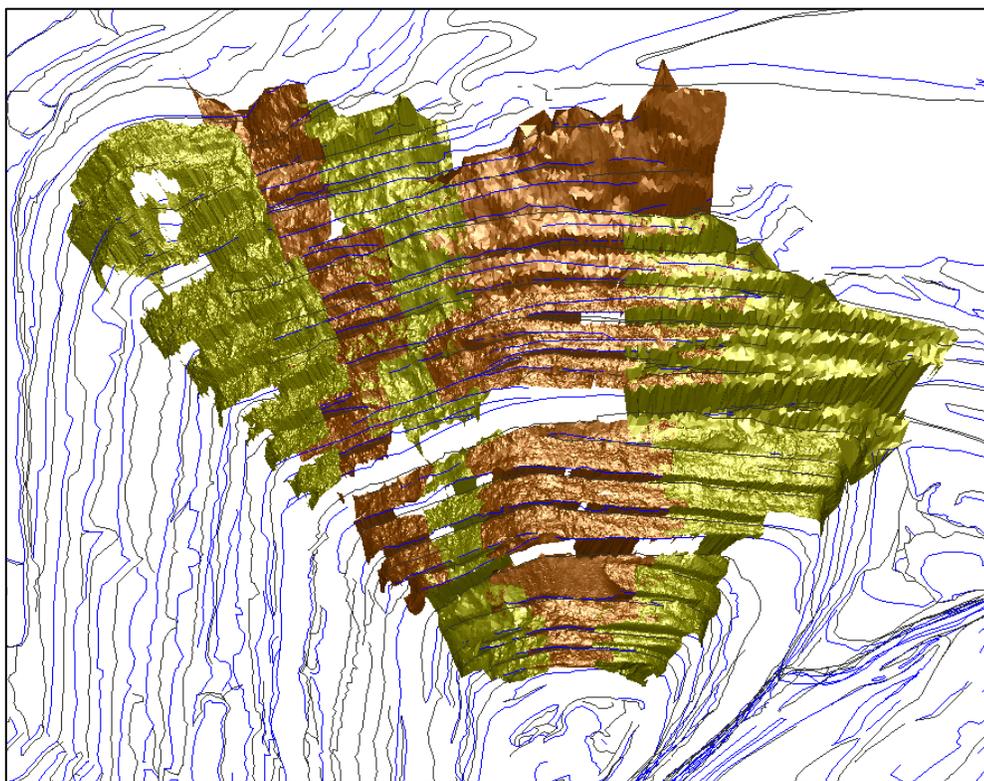


Figura 11: Unión vertical de reconstrucciones en detalle. En la imagen se observa una vista oblicua de la reconstrucción digital perteneciente a F5SW Sur, cabe destacar el carácter vertical de la reconstrucción permitiendo el mapeo de estructuras a lo largo de la traza observado

Finalmente, la georreferenciación de las reconstrucciones permite relacionar estas a un sistema de coordenadas, escalándolas y ubicándolas espacialmente. Gracias a este cambio es que el mapeo estructural entrega información verídica respecto a puntos de traza y orientación. Esta georreferenciación fue concebida mediante puntos espaciales de la estación topográfica para las reconstrucciones de frente de mina y el uso de la herramienta *ModelMerger-Slave* para la georreferenciación de reconstrucciones de detalle.

3.3. Levantamiento remoto: mapeo estructural digital

El levantamiento remoto estructural generado en este estudio consistió en la interpretación de estructuras sobre las reconstrucciones digitales georreferenciadas en detalle y el posterior reconocimiento de la traza o plano a través de una delineación a lo largo de su afloramiento, abarcando toda la persistencia observable.

Cada estructura mapeada en este trabajo fue caracterizada individualmente y la metodología empleada fue común a todos los tipos de fallas (fallas principales, fallas mayores y estructuras menores). Como se observa en la Figura 12, se identificó la traza o plano de falla, y gracias a que la reconstrucción posee una georreferenciación anteriormente practicada, se obtuvieron los puntos espaciales que definen la traza de la estructura, el largo de la persistencia, y los valores de rumbo y manteo- dip y dipdir- estimados del plano tridimensional más adecuado a la totalidad de los puntos levantados.

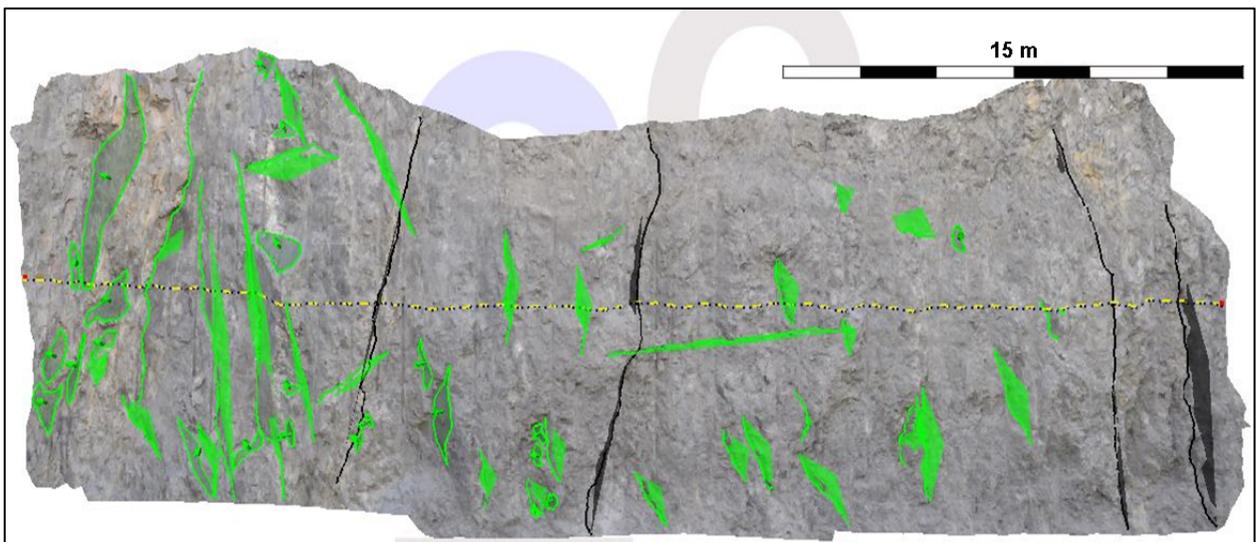


Figura 12: Mapeo estructural digital. En la figura se observa un ejemplo de mapeo digital de estructuras, en este se nota la caracterización de la traza o plano de falla (verde para estructuras menores y negro para fallas mayores). Pared perteneciente a las ventanas v1 y v3 del sector de Donoso.

3.4. Base de datos categorizada

Tras un exhaustivo mapeo de los frentes de bancos y como entrega oficial de resultados de este, se generó una base de datos categorizada de estructuras mayores y menores. Para las estructuras menores se entregó un solo tipo de archivo (Figura 13a) en donde se registró el sector mina correspondiente, el Dip y DipDir modelado y las coordenadas del punto espacial medio de la traza de la estructura. Para fallas mayores se entregaron dos archivos con diferentes atributos: (i) un documento con las coordenadas de los puntos espaciales de la traza (Figura 13b) y el sector mina correspondiente, y (ii) un archivo de puntos de control de orientación con las coordenadas del punto, el Dip y DipDir medido y la falla mayor pertinente (Figura 13c).

| a) | Sector | Dipdir | Dip | Este | Norte | Cota |
|----|-------------------|--------|-------|----------|----------|----------|
| | Infiernillo norte | 341,87 | 87,12 | 101365,8 | 99923,77 | 3830,137 |
| | Infiernillo norte | 329,7 | 33,31 | 101356,4 | 99919,95 | 3828,907 |
| | Infiernillo norte | 281,6 | 15,63 | 101359,4 | 99920,94 | 3827,358 |
| | Infiernillo norte | 322,33 | 42,75 | 101352,3 | 99919,25 | 3824,566 |
| | Infiernillo norte | 119,41 | 20,75 | 101349,4 | 99913,81 | 3838,816 |
| | Infiernillo norte | 34,53 | 60,74 | 101352,5 | 99917,9 | 3827,732 |
| | Infiernillo norte | 34,5 | 80,46 | 101362,9 | 99922,6 | 3830,813 |

| b) | Este | Norte | Cota | Ema | Sector |
|----|----------|----------|----------|------|--------|
| | 99685,96 | 100666,3 | 3357,383 | ema1 | f5sw_n |
| | 99686,56 | 100666,8 | 3358,591 | ema1 | f5sw_n |
| | 99686,74 | 100666,9 | 3359,067 | ema1 | f5sw_n |
| | 99687,02 | 100667,1 | 3359,747 | ema1 | f5sw_n |
| | 99687,16 | 100666,8 | 3360,516 | ema1 | f5sw_n |
| | 99687,46 | 100666,9 | 3361,699 | ema1 | f5sw_n |
| | 99687,69 | 100667,1 | 3362,265 | ema1 | f5sw_n |

| c) | Este | Norte | Cota | Dip | DipDir | Ema |
|----|----------|----------|----------|-------|--------|-------|
| | 99689,32 | 100669,3 | 3365,97 | 75,04 | 170,03 | ema1a |
| | 99707,44 | 100695,2 | 3383,596 | 67,61 | 180,92 | ema1b |
| | 99671,71 | 100591,6 | 3332,22 | 72,57 | 176,44 | ema1c |
| | 99674,49 | 100633 | 3348,529 | 75 | 170 | ema1d |
| | 99664,03 | 100622,6 | 3328,286 | 56,79 | 161,54 | ema2 |
| | 99770,03 | 100653,6 | 3410,47 | 54,36 | 168,71 | ema3 |
| | 99585,3 | 100428,7 | 3333,902 | 65,29 | 190,08 | ema6 |

Figura 13: Formato de base de datos categorizada. En el esquema se observa la: a) base de datos de estructuras menores con las coordenadas del punto espacial medio de la traza de la estructura, el Dip y DipDir modelado y el sector mina correspondiente; b) base de datos de puntos espaciales de fallas mayores con las coordenadas de la traza y el sector mina correspondiente y c) base de datos de puntos de control de orientación de fallas o estructuras mayores con las coordenadas del punto y el Dip y DipDir medido.

Capítulo 4: Análisis de resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en este estudio junto con sus respectivos análisis. Incluye 2 etapas fundamentales: i) El levantamiento y validación de la información estructural que incluye tanto la validación del método de levantamiento, como el Mapeo estructural digital y la base de datos estructural; ii) Análisis estructural que integra la modelación 3D de estructuras mayores y principales, y el análisis del impacto de la base de datos en el Modelo Estructural 2013 (densidad, distribución, incertidumbre de los dominios, resolución).

4.1. Levantamiento y validación de la información estructural

4.1.1. Validación del método de levantamiento remoto

Dado que la técnica de levantamiento remoto de estructuras, a la escala generada en esta memoria, es una metodología nueva en la mina, se planteó la necesidad de generar una validación del método, considerando dos partes: i) diseñar dos metodologías que permitan inferir la fidelidad de puntos espaciales y orientaciones obtenidas en el levantamiento remoto, dando como resultado una validación de la calidad de la información y ii) definir una clasificación para la información obtenida, dando como resultado una validación entre la base de datos indirecta generada en este trabajo y la base de datos estructural vigente. Estas dos campañas son explicadas a continuación:

4.1.1.1. Precisión espacial

Con el fin de inferir el grado de exactitud y precisión de los puntos espaciales medidos, y por consiguiente la ubicación y largo de las estructuras, se realizó una comparación entre perfiles topográficos provenientes de la reconstrucción digital hecha en este estudio y desde la topografía mina, tomada como estándar. Estos se pueden observar en la Figura 14c: uno en la parte norte de la mina cruzando el sector Donoso (Figura 14a), y otro abarcando la zona oriental del rajo, específicamente la pared de Infiernillo (Figura 14b).

Conviene poner énfasis en que la metodología usada no corresponde a alguna técnica presente en la literatura oficial. Este experimento se desarrolló debido a la dificultad que representa el levantamiento masivo de puntos georreferenciados y a gran distancia a causa de la operación mina. Aun así, permitió estimar de manera indirecta los parámetros deseados, teniendo como hipótesis que la no concordancia de ambas topografías tiene como única causa un sesgo entre los puntos espaciales medidos frente a sus puntos reales respectivos.

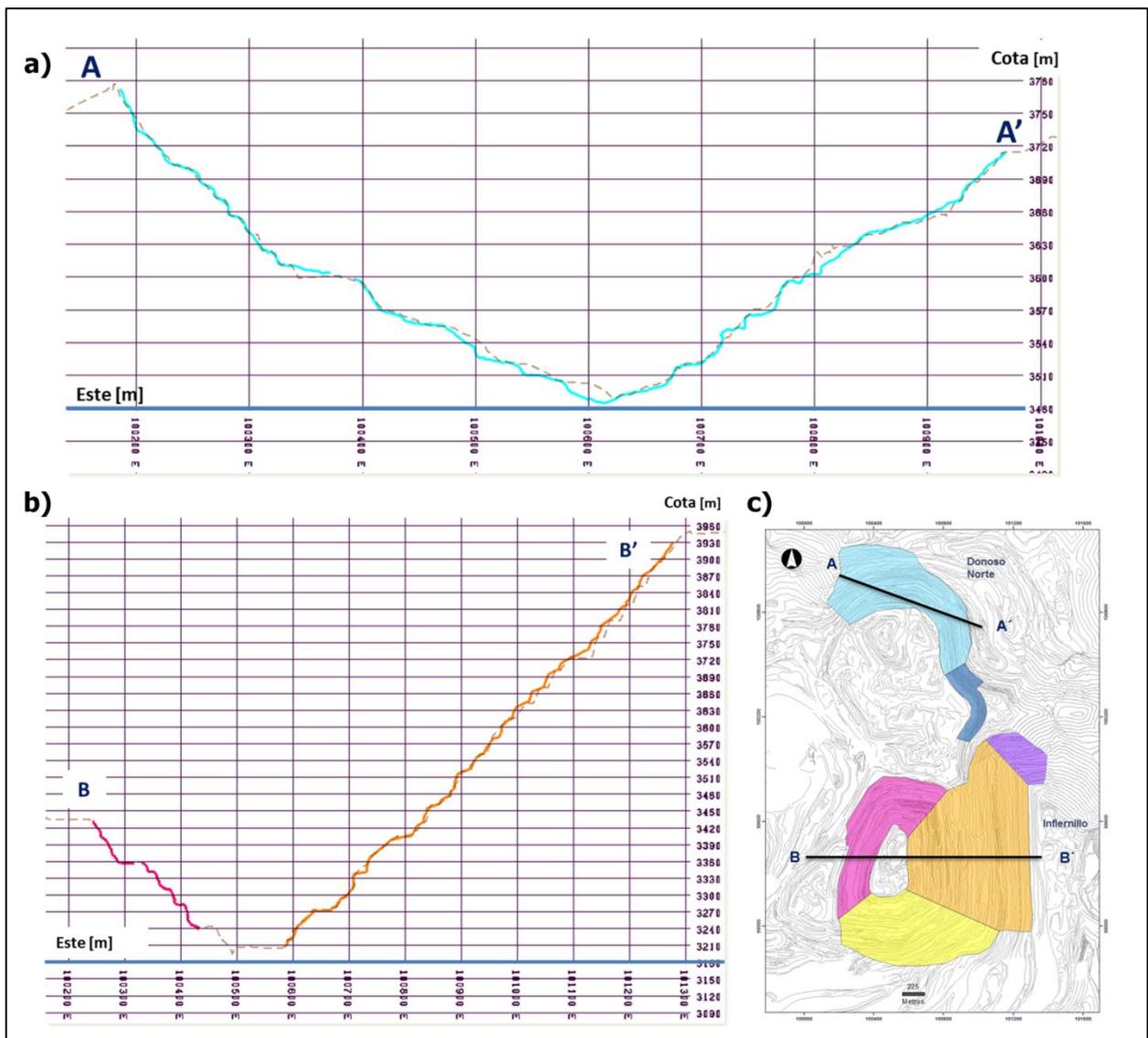


Figura 14: Perfiles utilizados en la validación espacial. En el esquema se muestra: a) Perfil zona Donoso; b) Perfil zona Infiernillo; c) Trazas de los perfiles de Donoso e Infiernillo. Los perfiles presentan dos líneas obtenidas de topografías de distinta fuente: una línea punteada, que corresponde al perfil de topografía mina, y una línea en colores, que pertenece al perfil de la topografía de la reconstrucción digital del rajo hecha en este estudio. En ambos casos se observan diferencias espaciales entre los perfiles.

Esta suposición ignora probables explicaciones a la falta de afinidad de los perfiles topográficos como: (I) la topografía mina no es coetánea al momento de la toma de fotografías. Existen diferencias temporales que van desde algunos días o semanas (sector norte de Donoso) a décadas (parte superior de Infiernillo); las cuales no permitieron la inclusión en el análisis del efecto de la colmatación de bancos o acomodos operacionales diarios en las partes bajas de la mina; (II) sesgo vertical debido al efecto de oclusión fotográfica (Sturzenegger *et al.*, 2009a) (II) errores en la georreferenciación de las reconstrucciones utilizadas; (IV) no parametrización de algunos bancos en la topografía mina y (V) factores ambientales que no permitieron una fotografía neta y/o limpia del banco, como inadecuada iluminación, tránsito de vehículos o altas concentraciones de material particulado.

El análisis posterior consideró parámetros establecidos por Sturzenegger (2009a), en donde la exactitud y precisión son interpretadas, respectivamente, del cálculo del valor promedio y desviación estándar de diferencias espaciales encontradas sobre los ejes **x,y** y **z**, comparando el punto remoto contra su análogo tomado con una estación total. En consonancia, Sturzenegger (2009b) señala diferencias máximas aceptables de inexactitud de -3.7, 4.2 y 0.6m en las coordenadas (x, y, z), respectivamente, y un valor de imprecisión de 5.0, 6.5 y 1.5m en las coordenadas respectivas.

Volviendo al primer punto, en ambos perfiles se midió la distancia total entre los pares correspondientes a lo largo de la traza; asociando estos valores a diferencias sobre los ejes x,y y z. La estadística de este levantamiento se puede observar en la Tabla 3 en la cual se ocuparon los parámetros establecidos por Sturzenegger (2009b) pero re-interpretados vectorialmente como distancia absoluta.

Tabla 3: Promedio y desviación estándar de pares de puntos topográficos.

| Zona | Diferencia promedio (m) | Desviación estándar (m) |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Donoso | 2,9 | 2,5 |
| Infiernillo oriental | 3,8 | 2,4 |
| Infiernillo occidental | 2,5 | 0,71 |
| Sturzenegger <i>et al.</i> , 2009b | 5,6 | 8,3 |

Los valores encontrados para la exactitud (diferencia promedio) y precisión (desviación estándar) se encuentran por debajo de los valores vistos por Sturzenegger (2009b), experimento hecho en una mina a rajo abierto con dimensiones similares a Los Bronces – Palabora, Sudáfrica- y fotogrametría a gran distancia (<1 Km).

Finalmente, cabe resaltar la existencia de diferencias sobre los 14 metros vistas en la parte superior oriental de infiernillo, entre las cotas 3750-3870 metros, las cuales escapan del intervalo aceptado. Sin embargo, es necesario recalcar que estas anomalías probablemente son consecuencia de una topografía desactualizada, y corresponden a un 6% de la información obtenida.

4.1.1.2. Validación geométrica

Con el fin de evaluar la calidad de las orientaciones medidas, se diseñó una metodología para inferir la fidelidad del valor medido de las orientaciones. En esta se efectuó una serie de toma de datos de orientación utilizando una brújula estructural (Figura 15), las que fueron contrastadas con la orientación calculada en el levantamiento remoto.

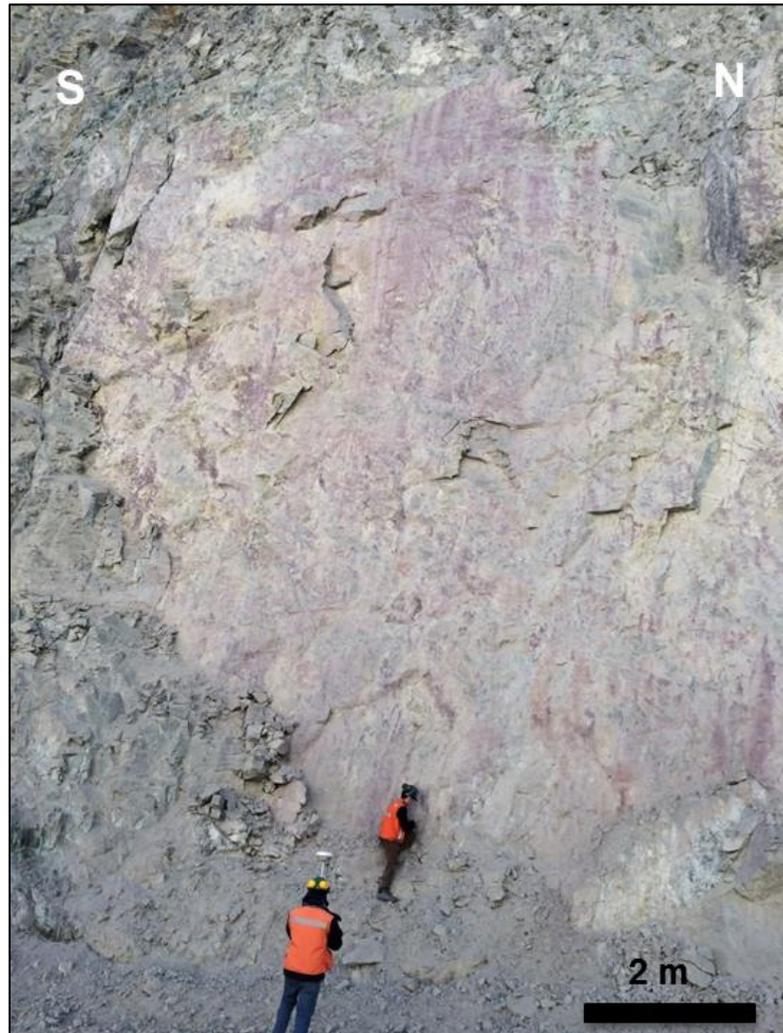


Figura 15: Medición, en terreno, de orientación de una estructura. En la imagen se observa el procedimiento de medición de rumbo y manto de una estructura bajo el protocolo definido por la Superintendencia de Geología en colaboración con la Superintendencia de Geomecánica.

Se logró tomar 18 datos de orientaciones, los cuales son mostrados en la Tabla 4 junto a la orientación medida en el mapeo remoto.

Tabla 4: Tabla de orientaciones medidas en terreno (brújula) y de manera remota (SMB)

| Medida | Brújula | | SMB | |
|---------------|----------------|----------------|------------|----------------|
| | DIP | DIP DIR | DIP | DIP DIR |
| 1 | 82 | 155 | 81 | 153 |
| 2 | 82 | 325 | 85 | 323 |
| 3 | 72 | 170 | 70 | 172 |
| 4 | 86 | 260 | 84 | 264 |
| 5 | 85 | 165 | 85 | 162 |
| 6 | 80 | 330 | 79 | 335 |
| 7 | 85 | 125 | 84 | 126 |
| 8 | 82 | 164 | 83 | 167 |
| 9 | 85 | 143 | 86 | 143 |
| 10 | 62 | 201 | 62 | 197 |
| 11 | 82 | 165 | 80 | 169 |
| 12 | 68 | 160 | 69 | 160 |
| 13 | 42 | 54 | 41 | 54 |
| 14 | 10 | 137 | 10 | 141 |
| 15 | 86 | 143 | 83 | 147 |
| 16 | 43 | 302 | 45 | 302 |
| 17 | 87 | 155 | 85 | 150 |
| 18 | 80 | 162 | 78 | 164 |

Conviene subrayar que con el fin de considerar la rugosidad innata de las estructuras, se otorgó una libertad de 5° para las mediciones en brújula; variación considerada aceptable en experiencias similares de análisis de precisión en la medición de orientación de estructuras por fotogrametría (Sturzenegger *et al.*, 2009a; Sturzenegger *et al.*, 2009b; Coggan *et al.*, 2007; Cerda 2006). Los resultados de este experimento se pueden ver en la (Figura 16), en donde se muestra la comparación entre las distintas mediciones de Dip y DipDir.

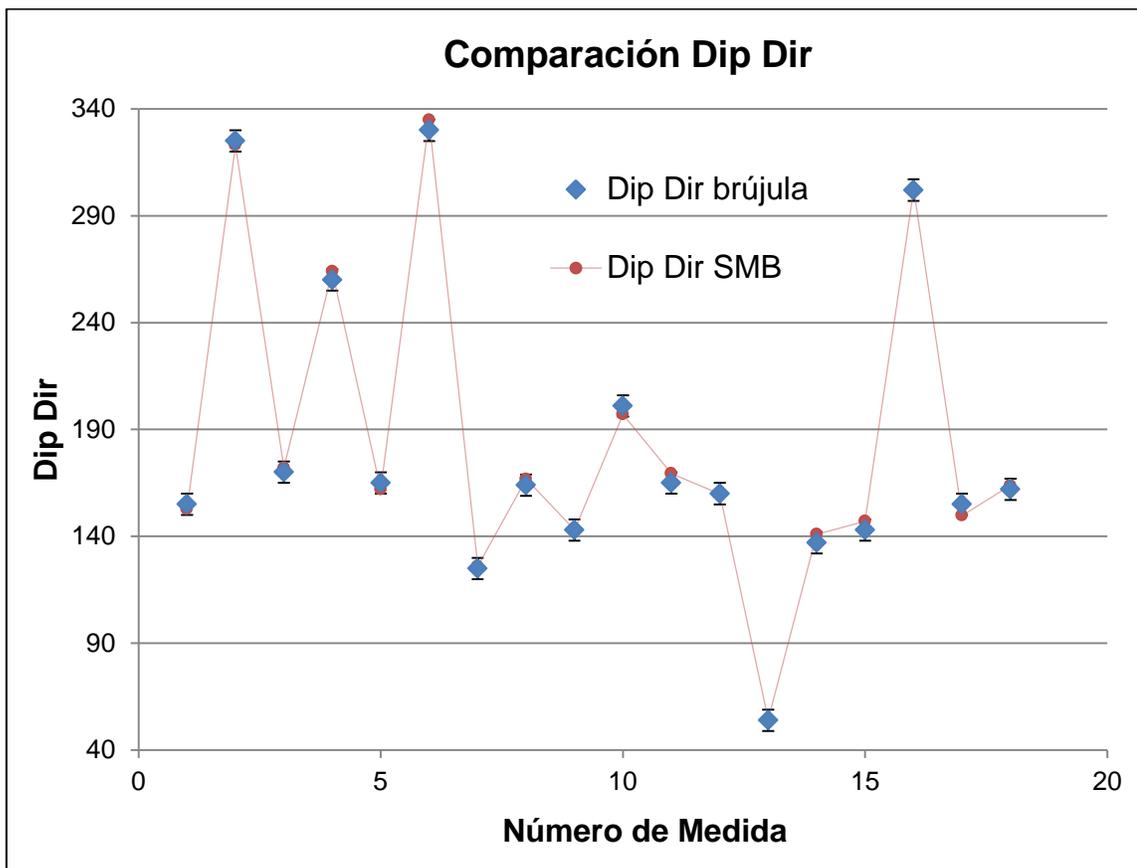
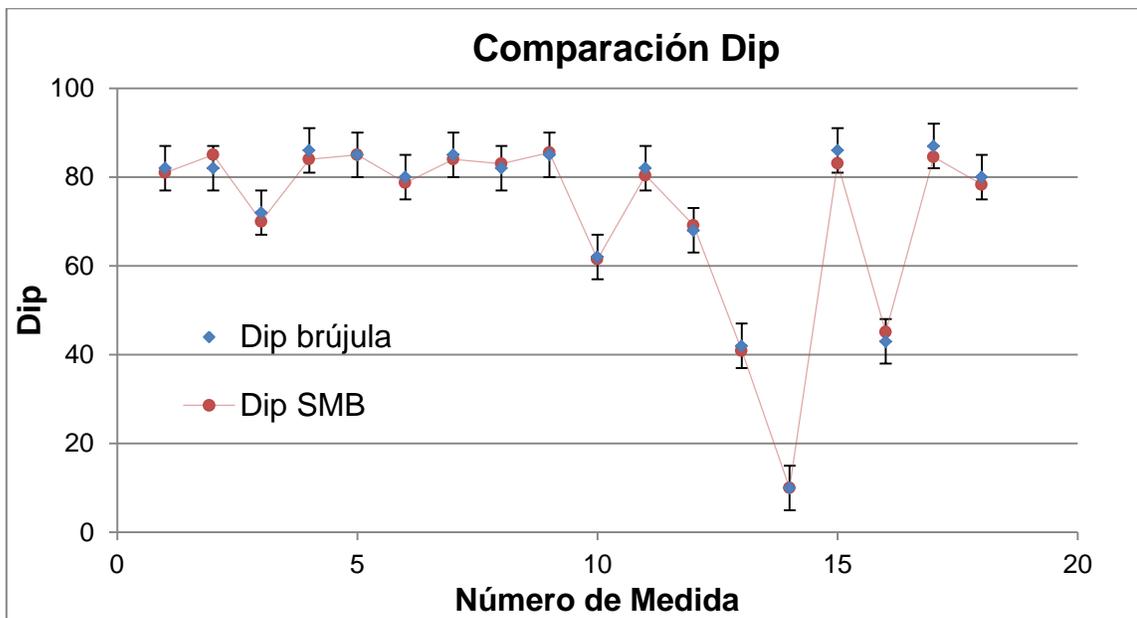


Figura 16: Comparación de orientación de estructuras para Dip y DipDir entre el levantamiento remoto y medición por brújula. Se observa que las mediciones, para cada estructura, son concordantes dentro del rango establecido de 5° de libertad.

Los puntos graficados muestran que la medición de Dip y de DipDir, para la misma estructura, es concordante dentro del rango establecido entre el valor del levantamiento remoto y la medición realizada con la brújula.

Es importante destacar la dificultad de generar esta campaña debido a la necesidad de condiciones climáticas favorables y a la elección de una pared útil para el objetivo, pues no necesariamente las estructuras posibles de medir lograban ser reconocidas en la reconstrucción al detalle; y a causa del correcto acatamiento de los protocolos de seguridad presentes en la mina, los que requirieron entre otros: una constante coordinación entre las Superintendencias de Geomecánica y Geología, y ausencia de actividad operacional cercana a la pared.

4.1.2. Mapeo estructural digital

Comprende el principal producto generado en la presente memoria y corresponde a una caracterización completa de estructuras menores, mayores y principales: puntos espaciales de traza y orientación. La clasificación de este estudio está basada en el criterio propuesto por Carrizo *et al.*, (2013), señalado en el Capítulo 2, el cual considera criterios de persistencia, evidencia visual/geológica y en menor medida antecedentes históricos.

El mapeo estructural generado es fruto de una campaña cuya duración fue de seis meses, iniciada con la toma de fotografías del rajo y finalizada con el mapeo estructural en sí. Su importancia radica en que la información obtenida aumenta en un gran porcentaje la caracterización estructural de la mina, en condiciones acordes a seguridad y precisión de los datos, y en un tiempo menor en comparación al mapeo tradicional.

4.1.2.1. Estructuras menores (Eme)

Estructuras discretas de una persistencia no mayor a 10 metros. Se mapearon un total de 15.560 estructuras (Figura 17) en esta categoría, abarcando casi la totalidad de las paredes de ambos rajos de la mina Los Bronces. Estos nuevos datos aumentan en un 260% la información proveniente de mapeo estructural de bancos, y representa el 73% de la base de datos vigente de esta categoría en la mina.

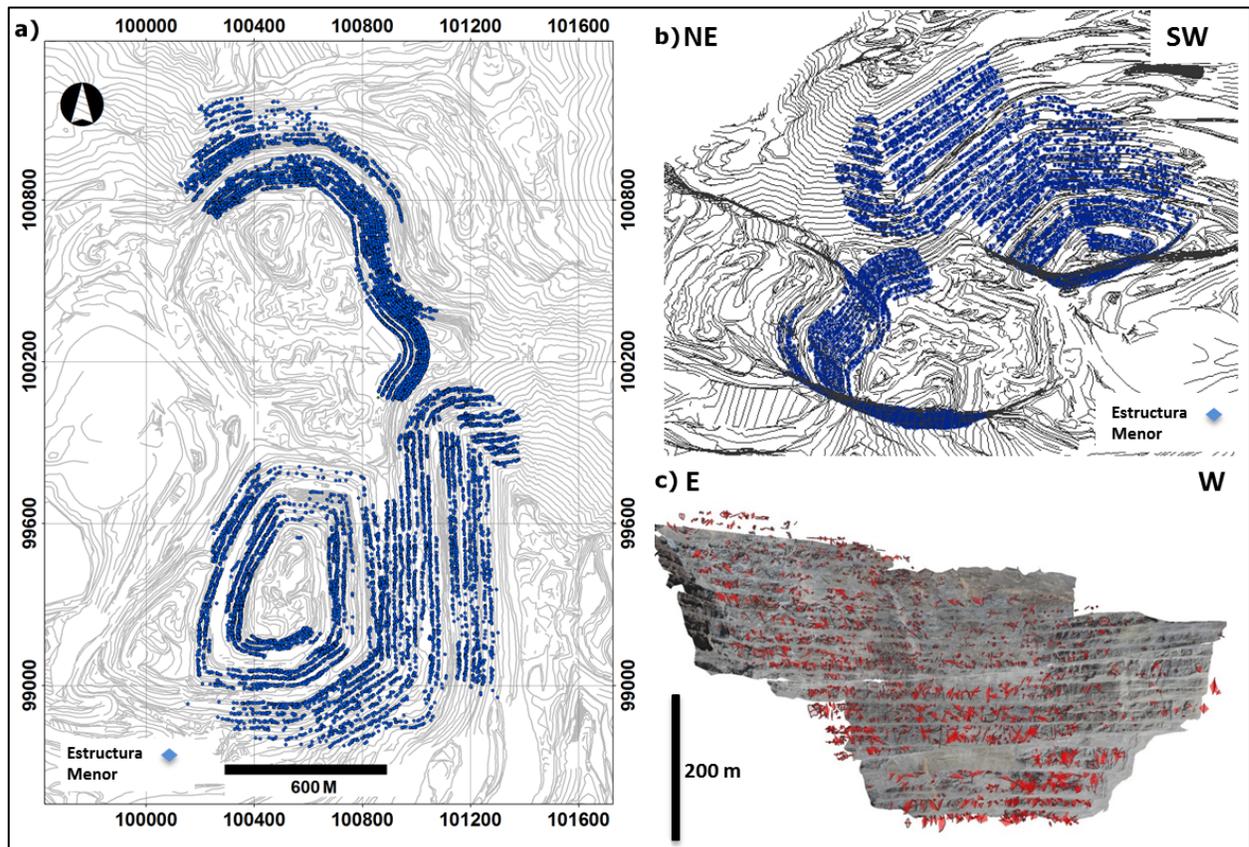


Figura 17: Mapeo de estructuras menores. En la figura se observa la distribución espacial del mapeo de estructuras menores: en a) se observa una vista en planta de esta; en b) una vista en perspectiva hacia el SE de Los Bronces, en donde destaca el levantamiento de datos en las paredes superiores de la mina; y c) muestra la distribución de las estructuras menores -polígonos rojos- en el mapeo digital efectuado en el sector sur del rajo F5SW Sur.

4.1.2.2. Estructuras mayores (Ema)

Las estructuras mayores comprenden fallas cuya persistencia abarca de dos a diez bancos (de 30 a 150 metros) y poseen una expresión moderada de su traza. Se identificaron en este estudio un total de 144 nuevas estructuras mayores (Figura 18), en su mayoría estructuras sub-verticales y de orientación NW-SE o NE-SW. Este mapeo generó un aumento de un 230% en la cantidad de estructuras mayores respecto al Modelo Estructural 2013, representando actualmente el 70% de la base de datos vigente.

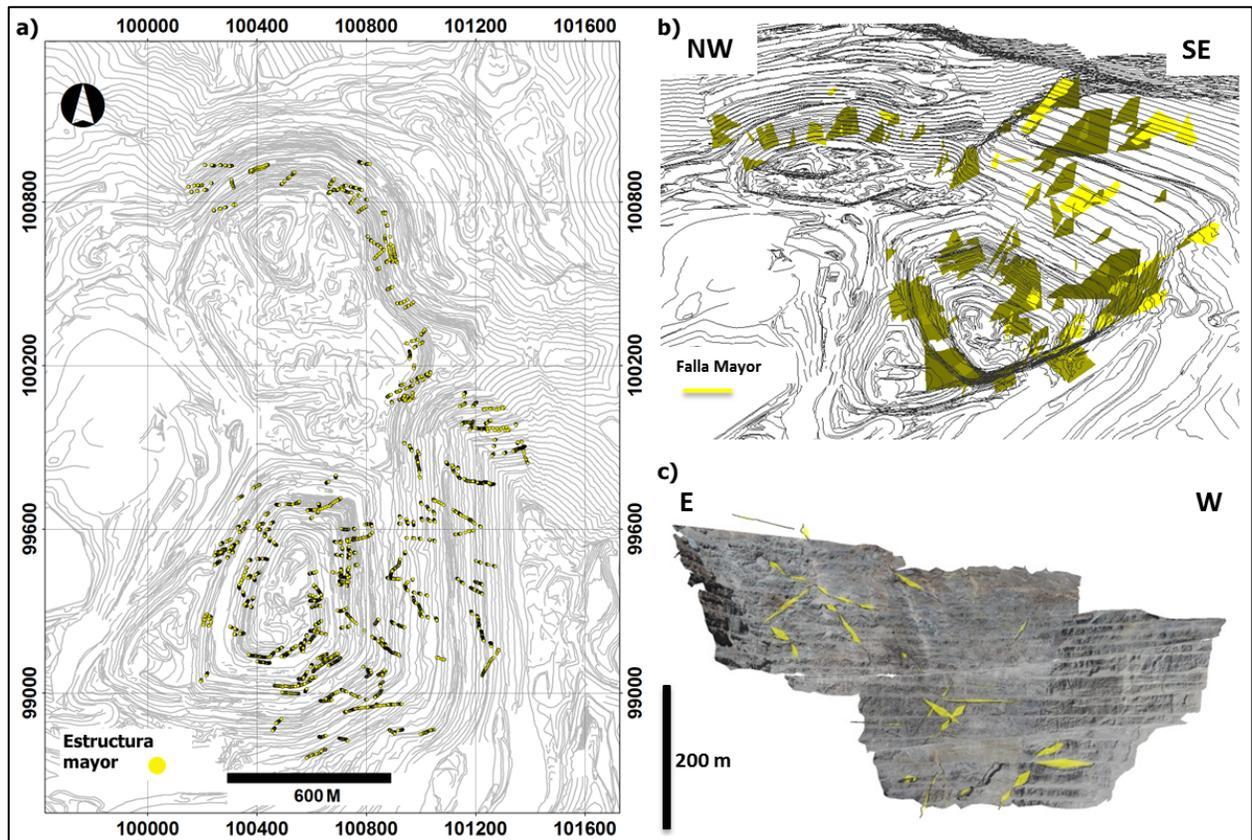


Figura 18: Mapeo de estructuras mayores. La figura presenta: a) una vista en planta de las trazas –puntos espaciales- levantadas de cada estructura mayor; b) una vista en perspectiva, hacia el Norte de la mina Los Bronces, de los planos de falla -orientación y punto medio espacial- de las estructuras mayores; y c) las estructuras mayores interpretadas -polígonos amarillos- en el mapeo digital del sector sur del rajo F5SW Sur.

4.1.2.3. Estructuras principales

Validadas y definidas en el Modelo Estructural 2013, corresponden a estructuras cuya persistencia es mayor a veinte bancos y su expresión geológica es evidente. Si bien, no se interpretaron nuevas estructuras principales en este estudio, sí se logró una amplia identificación de puntos trazas de estas, destacando el afloramiento en la parte sur de la mina de la Falla Sur, en donde se mapeó de manera completa su traza incluyendo su carácter anastomosado. Los resultados del mapeo de estas fallas se muestran en la (Figura 19).

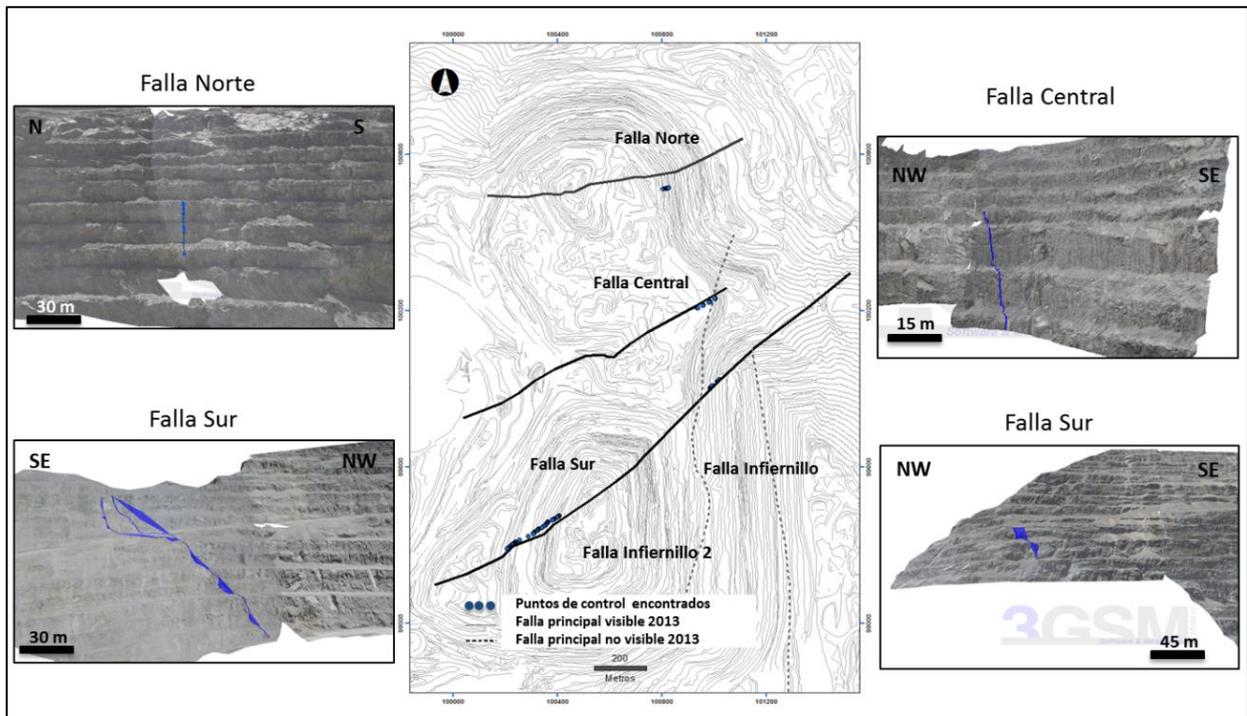


Figura 19: Mapeo de fallas principales. Se aprecian las trazas interpretadas de las Fallas Principales visibles en la mina Los Bronces y definidas en el Modelo Estructural 2013: Falla norte, Central y Sur.

4.2. Análisis estructural

4.2.1. Modelación 3D de estructuras mayores y principales.

La base vectorial de fallas de alta persistencia representa parte fundamental de un modelo estructural ya que configuran potenciales escenarios de problemas geotécnicos como formación de cuñas, deslizamientos planares o toppling. Dada su importancia, la modelación de estas fallas debe ser conciliada con la realidad; razón por la cual es imprescindible un registro suficiente de sus características. El mapeo en las frentes de bancos ofrece una identificación, clasificación y posterior caracterización en terreno de las fallas gracias al seguimiento de evidencias geológicas en el lugar –continuidad del plano de falla o del material de relleno de la traza-, ventaja comparativa frente a la interpretación de fallas en sondajes, en donde los resultados son obtenidos por trabajos posteriores. No obstante, la caracterización de fallas de alta persistencia, en el mapeo de bancos tradicional, posee un grado de inexactitud debido, entre otros, a la asignación de valores subjetivos y discretos de persistencia (10 m, 15 m, etc) o la definición de orientación de la falla en un solo punto, obviando el efecto de la rugosidad del plano de falla o su geometría cambiante. En la actualidad, todas estas desventajas, son posibles de solucionar mediante un levantamiento de datos remoto.

Con el propósito de mostrar el aporte de esta nueva herramienta, evidenciando un efecto directo de la adquisición completa de puntos de control de traza, se planteó dentro de los objetivos específicos de la memoria el modelamiento 3D de las estructuras mayores y principales. Utilizando el *software* de modelamiento geológico *Leapfrog*, se generó una base vectorial de las 144 nuevas estructuras mayores mapeadas en este estudio. Una vista general de las estructuras modeladas es mostrada en la Figura 20.

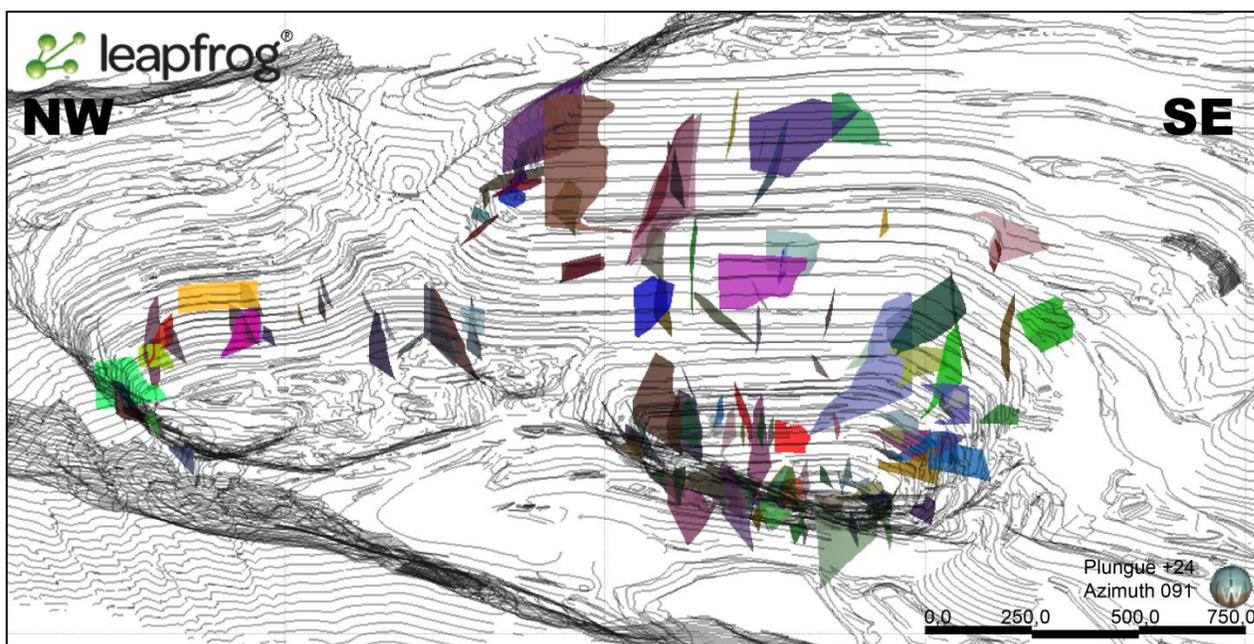


Figura 20: Modelo de estructuras mayores. Se observa una vista hacia la parte NE de la mina de los Bronces de los modelos 3D de las estructuras mayores mapeadas en este estudio.

Gracias a las ventajas propias del levantamiento remoto, se modeló de manera completa la traza de las estructuras; y para el cálculo de su orientación, se consideró el carácter sinuoso y cambiante a lo largo de su persistencia a través del uso de variados puntos de control (Figura 21). Este ejercicio logró una interpretación tanto a nivel de superficie como en profundidad de las estructuras, generando un modelo vectorial conciliado con lo que se observa en la mina, evitando una exagerada interpolación del largo de la traza y plano de falla de la estructura.

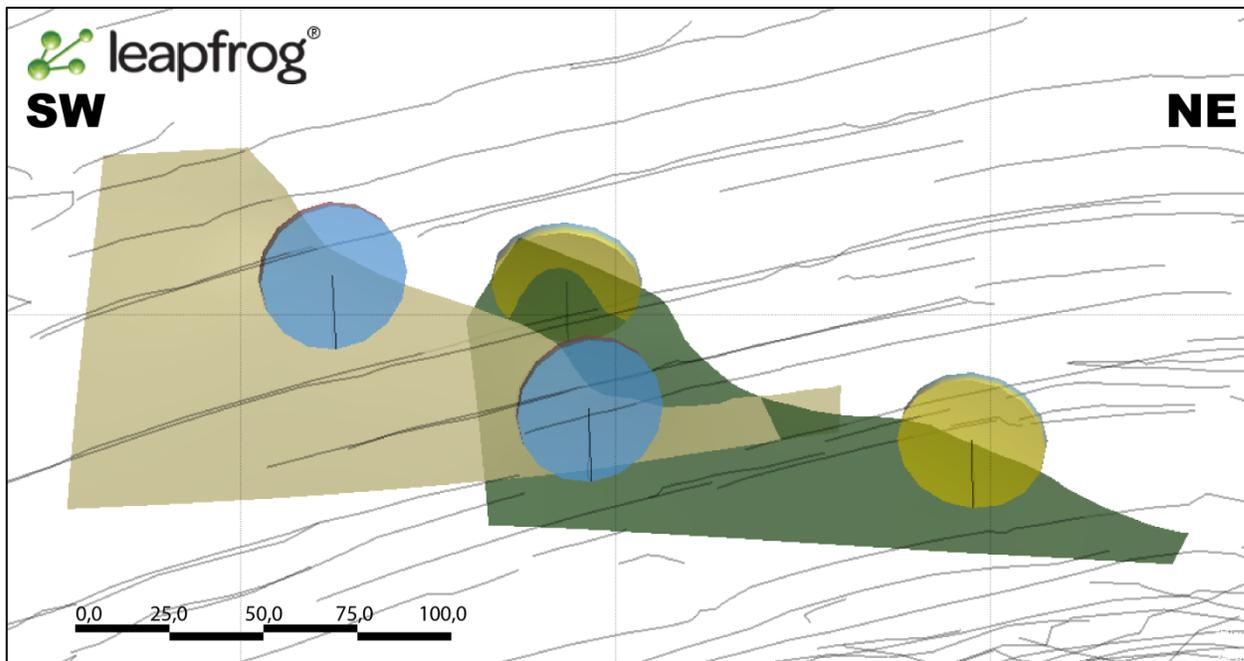


Figura 21: Modelación de estructuras mayores. En la imagen se observa el modelo 3D para las estructuras mayores 100 y 34. Nótese la presencia, en ambas fallas, de dos puntos de control de orientación: disco azul y amarillo, respectivamente.

Para el caso de las estructuras o fallas principales levantadas en la campaña: Falla Norte, Central y Sur, todas validadas y definidas en el Modelo Estructural 2013, no se generó una modelación 3D de estas, debido a la ausencia de información suficiente para una representación completa; sin embargo, se logró validar y actualizar su presencia y caracterización, obteniendo coordenadas espaciales pertenecientes a las trazas aflorantes de estas.

4.2.2. Densidad de datos estructurales

Con el fin de obtener el grado de homogeneidad en el mapeo estructural de bancos hecho en este estudio y comparar frente a la información pre existente, se generaron y contrastaron dos mapas de densidad de datos estructurales tipo Kernel 10x10 [m] (Figura 22). En particular, debido a su extensa área y fuerte cambio de densidad, se analizó el caso de la pared este de Infiernillo y el sector de Donoso.

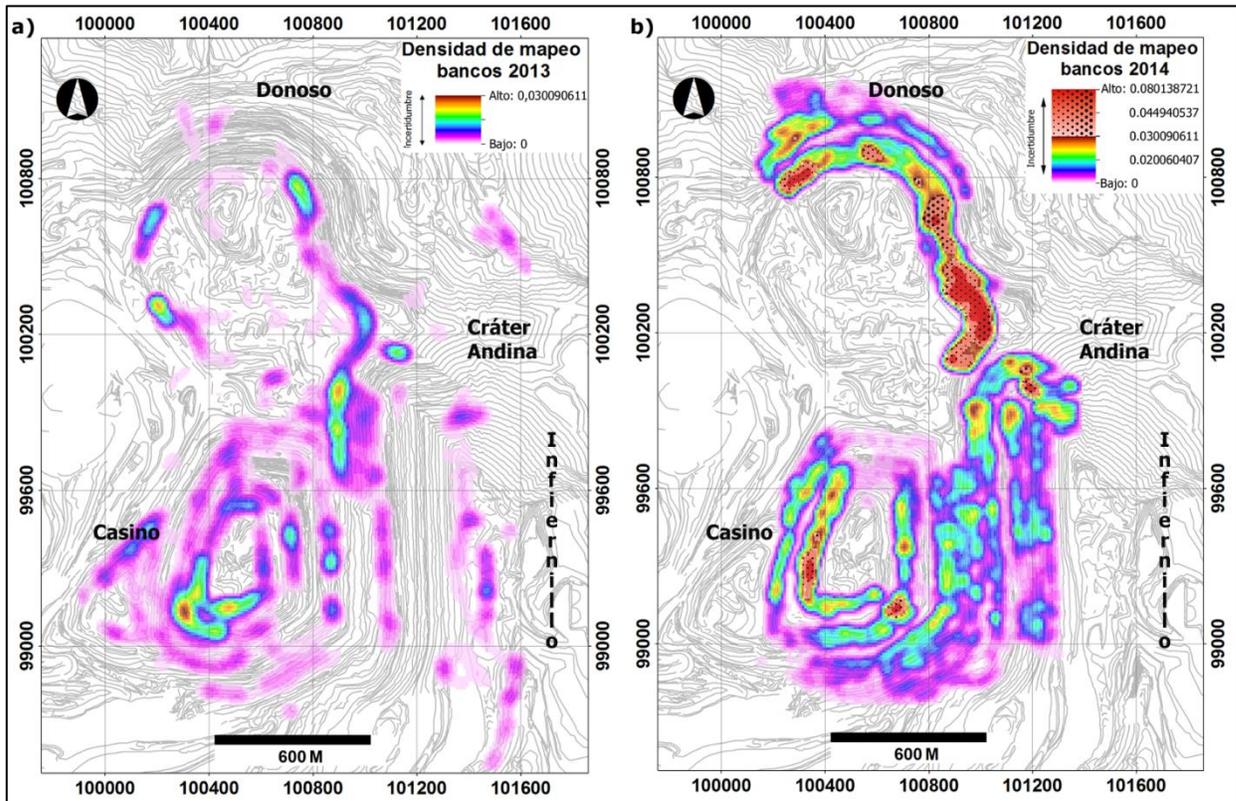


Figura 22: Mapa de densidad de mapeo de bancos: a) Mapa de densidad de datos estructurales de bancos 2013 y b) Mapa de densidad de datos estructurales usando la información levantada en este estudio. En la figura se observa el fuerte aumento en la densidad de información proveniente del mapeo de bancos, destacando el aporte de la pared este de Infiernillo y el sector de Donoso.

La pared este de Infiernillo posee alrededor de 800.000 m^2 de área y 700 metros de altura respecto al nivel de explotación actual, esto, junto a un alto peligro en el mapeo de bancos a causa de la exposición a caída de bloques genera condiciones de difícil o nulo acceso a las frentes, por lo que la información existente de mapeo de bancos previa a este estudio es escasa y proviene principalmente de campañas desfasadas con el avance actual, año 2007 y 2009, y de niveles bajos de esta pared (Figura 22a). Tomando en consideración estas dificultades, las ventajas que presenta el método de levantamiento remoto en este caso permitieron una caracterización amplia, homogénea y de mayor resolución de datos estructurales en la pared. Este hito generó recomendaciones en la definición del dominio estructural que abarca esta pared, el cual se explica en el capítulo 4.2.7.

Con respecto al sector Donoso, este presenta condiciones similares a Infiernillo: alturas del orden de 300 metros, una extensa área de mapeo bordeando los 500.000 m² y alta actividad operacional (zona actual de explotación debido al afloramiento de la brecha Donoso). Estas características generan un difícil o nulo acceso a los bancos, generando una mala distribución de los datos y restringidos mayoritariamente a información tomada en las partes bajas del rajo (Figura 22a). Sin embargo, posterior al mapeo remoto, el sector Donoso se convierte en la zona de mayor cantidad de información registrada por unidad de área, (Figura 22b), disminuyendo considerablemente la incertidumbre estructural en una zona en donde debido a la operación de la mina, el conocimiento geomecánico es crucial.

En síntesis, el levantamiento remoto de datos generado en este estudio originó un mapeo amplio, homogéneo y de alta resolución en ambos rajos de la mina (Figura 22b), obteniendo información precisa y actualizada, e incluyendo antecedentes de paredes actuales afectas a operación y bancos colgados de los cuales se desconocía su caracterización estructural.

4.2.3. Impacto del levantamiento remoto en la caracterización de dominios estructurales: análisis y exploración de diagramas de contornos de polos (DCP)

Con motivo de evaluar el aporte del levantamiento remoto de datos estructurales en la definición de dominios estructurales, se desarrolló un análisis de diagramas de contornos de polos (DCP) sobre seis de los dominios estructurales definidos en la mina, para así encontrar posibles nuevos comportamientos mecánicos del macizo, y consecuentemente, sugerir cambios en la definición de los dominios. Este ejercicio utilizó la información recopilada en el presente estudio (Bancos 2014) en conjunto con la base de datos estructural categorizada en el Modelo Estructural 2013 de la mina Los Bronces (Modelo 2013): mapeo de bancos (Bancos 2013) y/o información proveniente de campañas de sondajes (Sondajes 2013). Los datos incluidos en este modelo son resultado de una evaluación, diagnosis y consolidación de base de datos estructurales de la mina, efectuada en el desarrollo del mismo. Esta base de datos incluye variados orígenes: información vectorial de mapeo indirecto de bancos 2012-2013, información de fuente desconocida, información de geofísica de pozos (ATV), cartillas de mapeo físicas (pre-2004), información de mapeos levantados con GV Mapper y mapas geológicos físicos (información pre-Anglo American).

Dentro de las consideraciones del análisis, se supuso un comportamiento estructural isotrópico en la vertical, que fue evidenciado en la exploración por DCP a distintos niveles de la mina durante el desarrollo del Modelo Estructural 2013. Por otro lado, en la definición de los “clusters” de polos, la información fue sometida a una corrección de Terzaghi. Esta corrección consideró traversas ya definidas en el Modelo Estructural 2013, para las estructuras incluidas en esa base de datos; y para el caso de la información levantada en este estudio, se consideraron 18 traversas de tipo planar para la corrección de Terzaghi, asociadas a 18 polígonos distintos que contienen y dividen la totalidad del mapeo (Figura 23). En estas traversas se asumió un Dip igual a cero, y un DipDir definido a partir de la proyección de los datos sobre el mapa de cotas junto con la visualización de cambios en la orientación de las caras –que poseen datos proyectados- de los taludes.

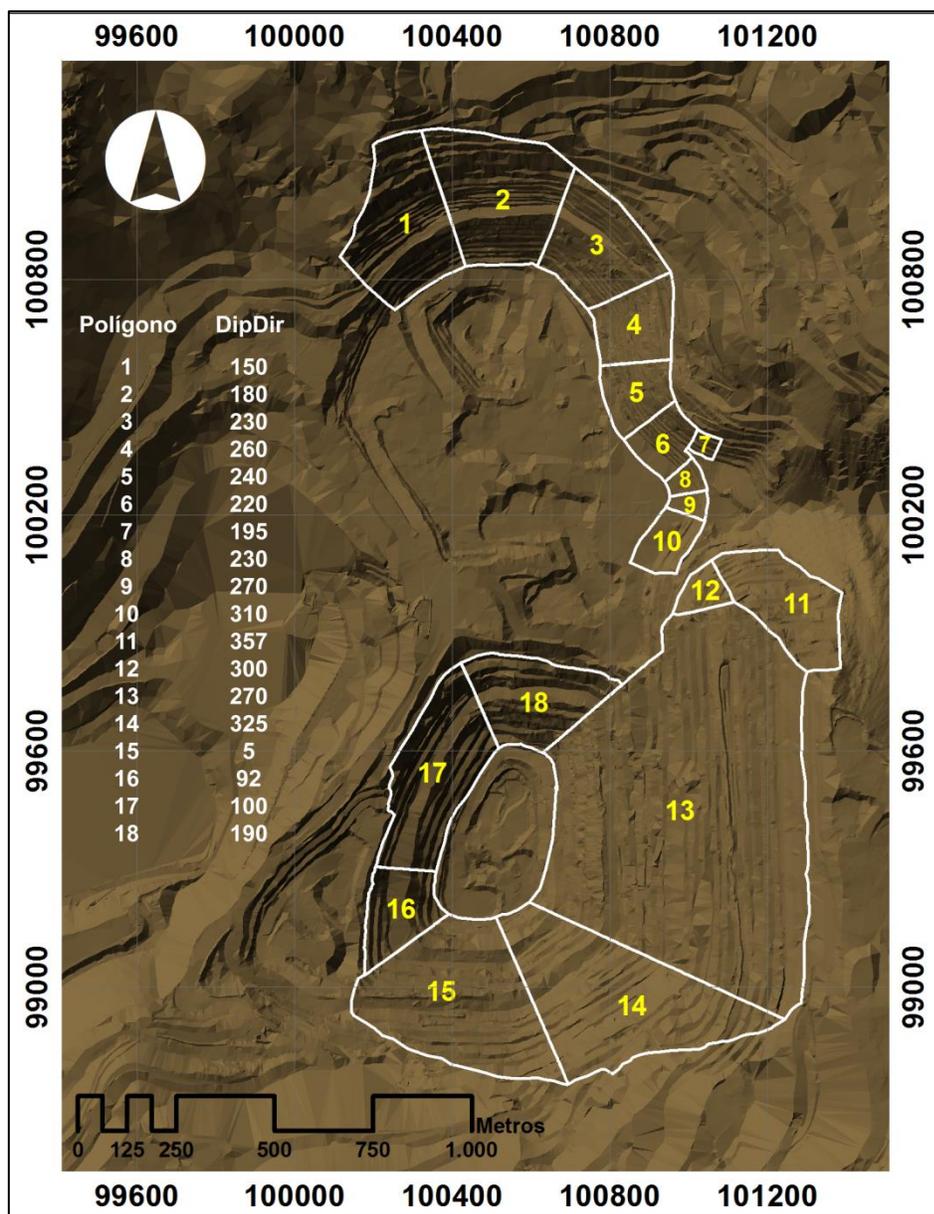


Figura 23: Polígonos de corrección planar de Terzaghi de Bancos 2014. En el mapa se observan los límites espaciales y las orientaciones determinadas para los 18 polígonos utilizados en la corrección planar de Terzaghi de la información generada en este estudio (Bancos 2014).

Por último, mencionar que el Dominio 2, dominio ubicado al noreste de la mina y controlado y limitado litológicamente por la Riolita, no fue considerado en este estudio debido a condiciones de seguridad insuficientes y de difícil acceso a la zona próxima al cráter Andina, lo cual no permitió una campaña de toma de fotografías.

4.2.4. Dominio 1

Ubicado en la parte superior de Infiernillo, se relaciona y acota a una sola litología, la andesita. Este mapeo dobla la cantidad de datos pertenecientes a este dominio (1016 estructuras) y considera información proveniente principalmente la cara norte de Infiernillo, hacia el Cráter Andina (Figura 24).

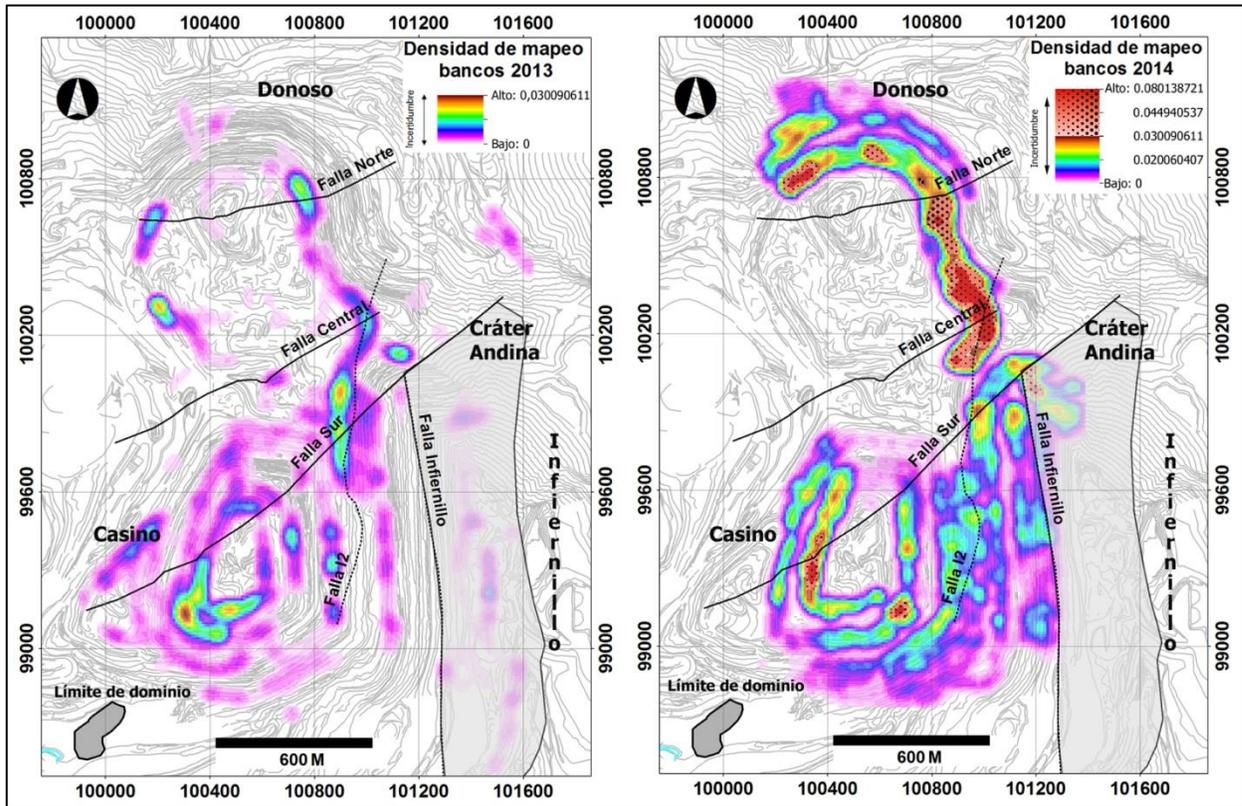


Figura 24: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 1. En la figura se observa el mapeo efectuado sobre el dominio 1, cuya principal fuente de información proviene de la pared norte de Infiernillo, hacia el cráter Andina.

Al comparar el DCP de Bancos 2014 contra el de Bancos 2013, se observa una notoria diferencia en los *set* de estructuras definidos (Figura 25), hecho causado probablemente porque este estudio no considera la parte alta de Infiernillo, zona que no fue posible mapear en este estudio, debido a los lugares de toma de fotografías elegidos.

Por otro lado, al analizar los *set* definidos en el diagrama del Modelo 2013, y el generado por Bancos 2014 más la los datos del Modelo 2013, se nota una similitud entre estos. Este fenómeno es debido a la fuerte influencia en ambos de información proveniente de Sondajes 2014, evidenciado al comparar ambos DCPs con el de Sondajes 2013 (Figura 25). En la Tabla 5 se presenta un resumen de las características de los DCPs para cada fuente de información.

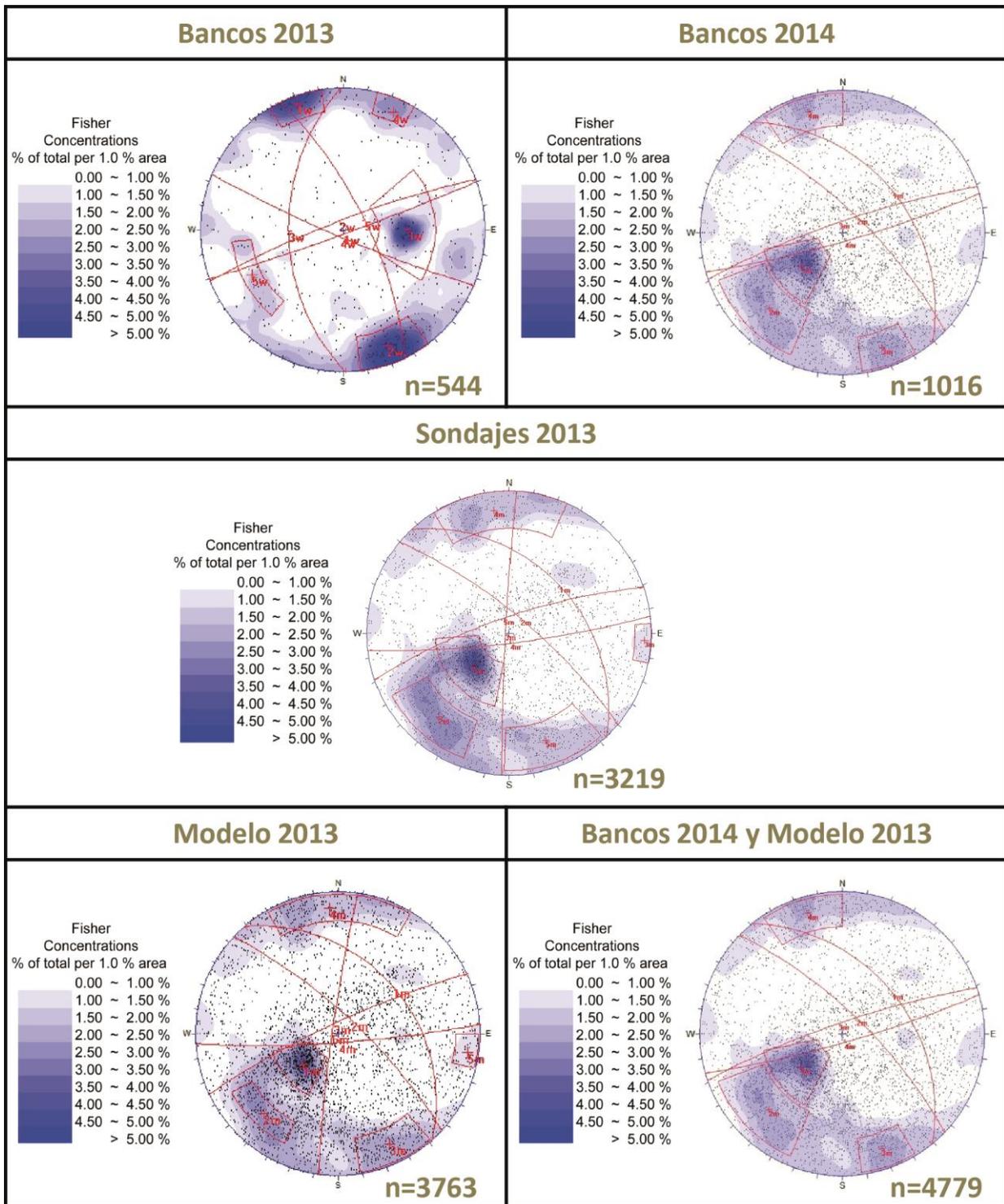


Figura 25: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 1. Se presentan los DCPs desarrollados con información de mapeo de bancos del año 2013 y 2014, de los sondeos utilizados en el desarrollo del Modelo Estructural 2013, el DCP característico para el dominio, y finalmente, el DCP desarrollado con información proveniente de bancos 2013, 2014 y sondeos 2013.

Tabla 5: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 1. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo para las distintas fuentes de información pertenecientes al Dominio 1. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada *set* definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada *set* respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada *set* normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los *sets*.

| Dominio 1 | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|------|------|-----|-----|-------|-------|-------|
| Bancos 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas |
| | Dip | 87 | 82 | 51 | 97 | 71 | | |
| | DipDir | 160 | 340 | 265 | 191 | 60 | | |
| | n _{set} | 39 | 73 | 55 | 14 | 23 | 340 | 544 |
| | n _{total} | 544 | | | | | | |
| | Total | 7% | 13% | 10% | 3% | 4% | 63% | 100% |
| | n _{set corr} | 104 | 195 | 147 | 37 | 61 | 0 | 544 |
| | Total _{corr} | 19% | 36% | 27% | 7% | 11% | 0% | 100% |
| Bancos 2014 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas |
| | Dip | 53 | 55 | 33 | 86 | 79 | | |
| | DipDir | 48 | 180 | 325 | 176 | 302 | | |
| | n _{set} | 99 | 110 | 102 | 18 | 84 | 603 | 1016 |
| | n _{total} | 1016 | | | | | | |
| | Total | 10% | 11% | 10% | 2% | 8% | 59% | 100% |
| | n _{set corr} | 244 | 271 | 251 | 44 | 207 | 0 | 1016 |
| | Total _{corr} | 24% | 27% | 25% | 4% | 20% | 0% | 100% |
| Sondajes 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas |
| | Dip | 39 | 76 | 87 | 82 | 77 | | |
| | DipDir | 50 | 41 | 273 | 175 | 341 | | |
| | n _{set} | 627 | 255 | 31 | 217 | 275 | 1814 | 3219 |
| | n _{total} | 3219 | | | | | | |
| | Total | 19% | 8% | 1% | 7% | 9% | 56% | 100% |
| | n _{set corr} | 1437 | 584 | 71 | 497 | 630 | 0 | 3219 |
| | Total _{corr} | 45% | 18% | 2% | 15% | 20% | 0% | 100% |
| Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas |
| | Dip | 37 | 75 | 81 | 84 | 85 | | |
| | DipDir | 50 | 43 | 335 | 175 | 278 | | |
| | n _{set} | 488 | 174 | 259 | 234 | 32 | 2576 | 3763 |
| | n _{total} | 3763 | | | | | | |
| | Total | 13% | 5% | 7% | 6% | 1% | 68% | 100% |
| | n _{set corr} | 1547 | 552 | 821 | 742 | 101 | 0 | 3763 |
| | Total _{corr} | 41% | 15% | 22% | 20% | 3% | 0% | 100% |
| Bancos 2014 y Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 42 | 73 | 81 | 83 | | | |
| | DipDir | 51 | 44 | 341 | 164 | | | |
| | n _{set} | 686 | 434 | 252 | 208 | 3199 | 4779 | |
| | n _{total} | 4779 | | | | | | |
| | Total | 14% | 9% | 5% | 4% | 67% | 100% | |
| | n _{set corr} | 2075 | 1313 | 762 | 629 | 0 | 4779 | |
| | Total _{corr} | 43% | 27% | 16% | 13% | 0% | 100% | |

4.2.5. Dominio 3

Este dominio se ubica en la parte central de la mina, y limita entre las Fallas Central y Sur. Se observa en el DCP de Bancos 2013 un *set* primario conjugados de fallas de alto ángulo de orientación ENE-WSW, y tres *set* secundarios: fallas de alto ángulo NNW-SSE, y su conjugado; y estructuras de menor ángulo con disposición NE-SW y NNW-SSE. Por otro lado, Bancos 2014 presenta información similar a Bancos 2013 con cambios en la jerarquía de los *set*s: tres *set* primarios, dos de fallas conjugadas de alto ángulo E-W y ENE-WSW, y un *set* de manto $\sim 10^\circ$ y orientación NNW-SSE, re-definido como *set* primario. Cabe destacar que Bancos 2014 presenta estructuras dispuestas en rumbo NE-SW, sin embargo no registra una densidad suficiente de estas para su definición como *set* (Figura 27). Nuevamente esta diferente conducta, probablemente, es resultado de doblar la cantidad de datos (2906 datos), y/o porque Bancos 2014 no considera zonas de alta densidad de mapeo estructural que sí fueron consideradas por Bancos 2013, como Casino o el área próxima al Cráter Andina (Figura 26).

Finalmente, en lo que se refiere al análisis del dominio estructural en su totalidad, los *set*s definidos en el diagrama del Modelo Estructural 2013, y el dado por Bancos 2014 más los datos del Modelo Estructural 2013, presentan una similitud. Esta evaluación es debida a la fuerte influencia, en ambos, de información proveniente de Sondajes 2014, evidenciado al comparar ambos diagramas con el de Sondajes 2013. En la Tabla 6 se presenta un resumen de las características de los DCPs para cada fuente de información.

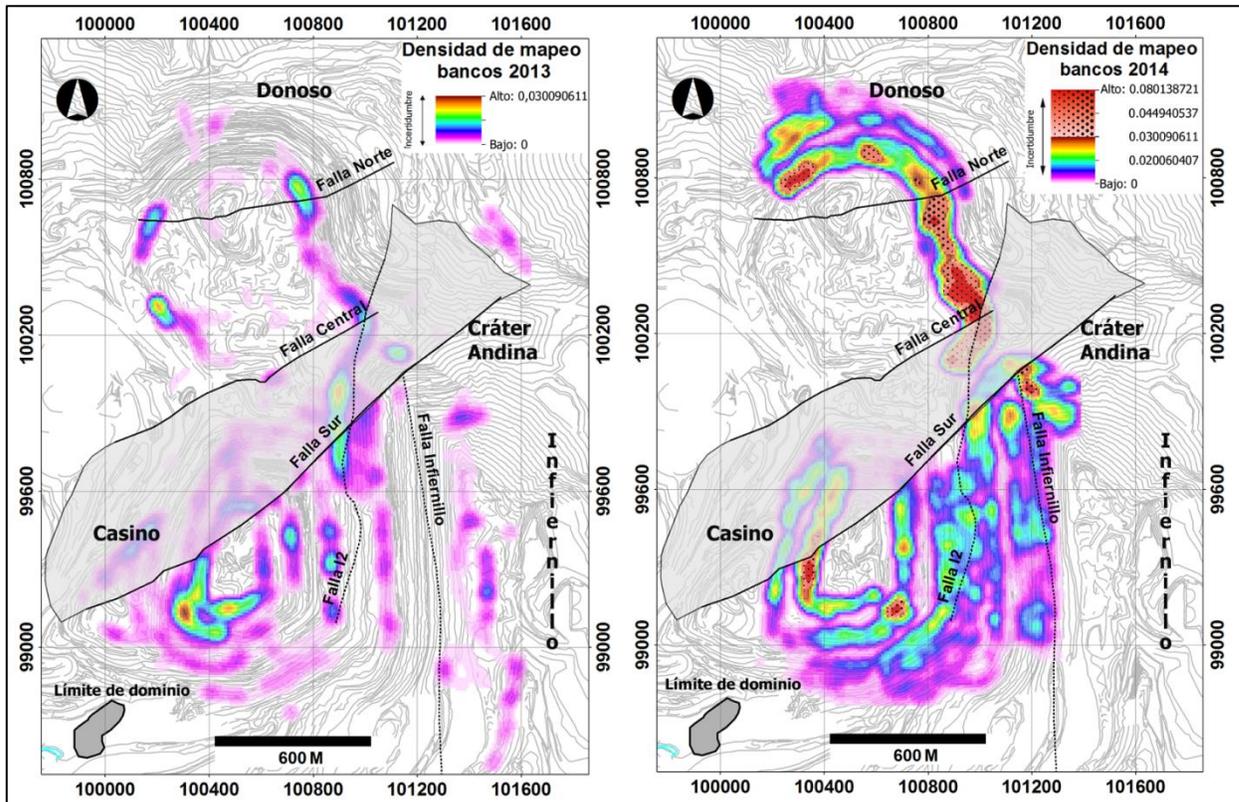


Figura 26: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 3. En la figura se observa el mapeo efectuado sobre el dominio 3, cuya principal fuente de información proviene de la pared oeste de F5SW.

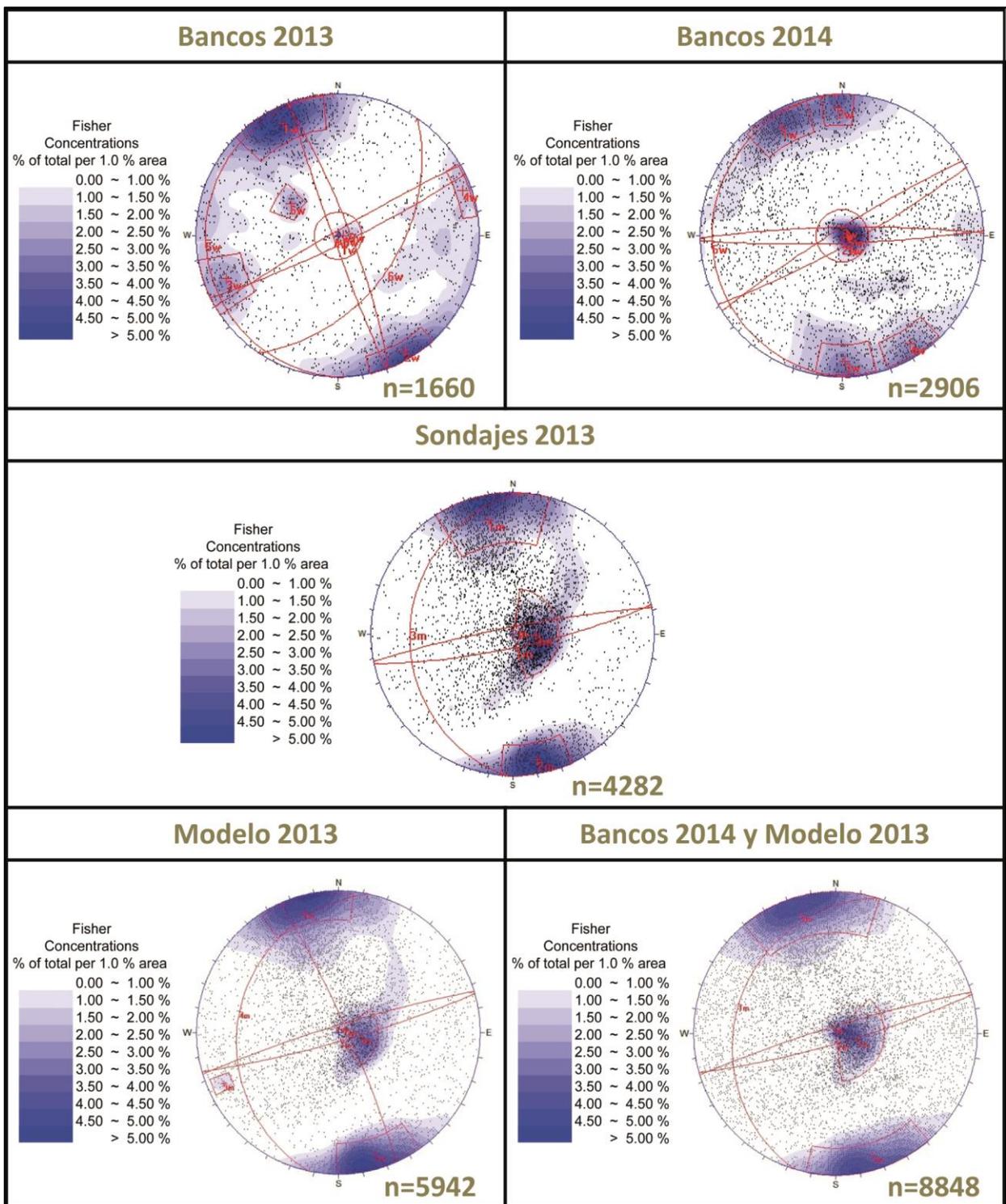


Figura 27: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 3. Se presentan los DCPs desarrollados con información de mapeo de bancos del año 2013 y 2014, de los sondajes utilizados en el desarrollo del Modelo Estructural 2013, el diagrama característico para el dominio, y finalmente, el DCP desarrollado con información proveniente de bancos 2013, 2014 y sondajes 2013.

Tabla 6: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 3. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo para las distintas fuentes de información pertenecientes al Dominio 3. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada *set* definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada *set* respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada *set* normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los *sets*.

| Dominio 3 | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bancos 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Otros | Sumas |
| | Dip | 83 | 86 | 81 | 86 | 10 | 44 | | |
| | DipDir | 155 | 331 | 68 | 249 | 218 | 124 | | |
| | n _{set} | 297 | 69 | 114 | 23 | 48 | 42 | 1067 | 1660 |
| | n _{total} | 1660 | | | | | | | |
| | Total | 18% | 4% | 7% | 1% | 3% | 3% | 64% | 100% |
| | n _{set corr} | 831 | 193 | 319 | 64 | 134 | 118 | 0 | 1660 |
| | Total _{corr} | 50% | 12% | 19% | 4% | 8% | 7% | 0% | 100% |
| Bancos 2014 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 83 | 84 | 83 | 84 | 11 | | | |
| | DipDir | 150 | 177 | 199 | 328 | 220 | | | |
| | n _{set} | 277 | 75 | 93 | 161 | 275 | 2025 | 2906 | |
| | n _{total} | 2906 | | | | | | | |
| | Total | 10% | 3% | 3% | 6% | 9% | 70% | 100% | |
| | n _{set corr} | 914 | 247 | 307 | 531 | 907 | 0 | 2906 | |
| | Total _{corr} | 31% | 9% | 11% | 18% | 31% | 0% | 100% | |
| Sondajes 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | Otros | Sumas | | | |
| | Dip | 80 | 84 | 23 | | | | | |
| | DipDir | 168 | 318 | 272 | | | | | |
| | n _{set} | 684 | 290 | 1081 | 851 | 2906 | | | |
| | n _{total} | 2906 | | | | | | | |
| | Total | 24% | 10% | 37% | 29% | 100% | | | |
| | n _{set corr} | 967 | 410 | 1529 | 0 | 2906 | | | |
| | Total _{corr} | 33% | 14% | 53% | 0% | 100% | | | |
| Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | Otros | Sumas | | |
| | Dip | 83 | 84 | 83 | 21 | | | | |
| | DipDir | 164 | 335 | 66 | 281 | | | | |
| | n _{set} | 590 | 420 | 34 | 692 | 4206 | 5942 | | |
| | n _{total} | 5942 | | | | | | | |
| | Total | 10% | 7% | 1% | 12% | 71% | 100% | | |
| | n _{set corr} | 2019 | 1438 | 116 | 2369 | 0 | 5942 | | |
| | Total _{corr} | 34% | 24% | 2% | 40% | 0% | 100% | | |
| Bancos 2014 y Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | Otros | Sumas | | | |
| | Dip | 22 | 82 | 85 | | | | | |
| | DipDir | 286 | 164 | 294 | | | | | |
| | n _{set} | 1365 | 1428 | 761 | 5294 | 8848 | | | |
| | n _{total} | 8848 | | | | | | | |
| | Total | 15% | 16% | 9% | 60% | 100% | | | |
| | n _{set corr} | 3398 | 3555 | 1895 | 0 | 8848 | | | |
| | Total _{corr} | 38% | 40% | 21% | 0% | 100% | | | |

4.2.6. Dominio 4

Este dominio es controlado por la presencia de dos fallas principales: Falla Sur y Falla Infiernillo 2, que lo limitan por el norte y este, respectivamente (Figura 28).

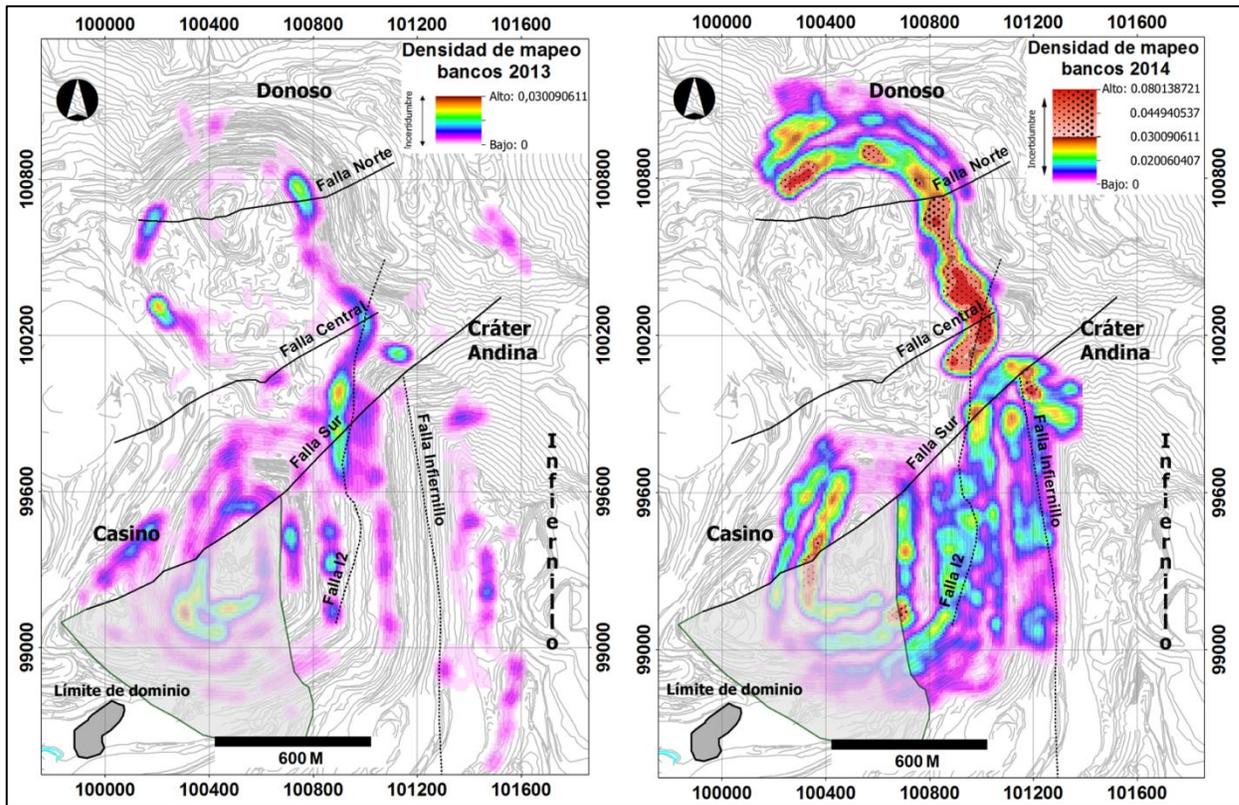


Figura 28: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 4. En la figura se observa el mapeo efectuado sobre el dominio 4, cuya principal fuente de información proviene de la pared sur- oeste superior de F5SW.

El mapeo generado en Bancos 2013 y Bancos 2013 destacan por una notoria similitud. En ambos se presentan *set* secundarios de estructuras conjugadas de alto ángulo de orientación NNE-SSW, ENE-WSW, NNW-SSW y WNW-ESE; y un *set* primario sub-vertical y orientación aproximada E-W (Figura 30). Por otro lado, los *set* interpretados en Sondajes 2013, muestran un comportamiento distinto a lo observado en Bancos 2013 y Bancos 2014. Esta condición se presenta a causa de las distintas proveniencias de la información: Sondajes 2013 deriva sólo del lado oriental del Dominio 4 (Figura 29), mientras tanto Bancos 2013 y Bancos 2014 posee un carácter notoriamente más homogéneo, abarcando variados bancos y extensas ventanas de mapeo (Figura 29). Si bien no existen evidencias suficientes, no hay cambios litológicos o nuevas fallas principales en la zona, para determinar una causa específica a este distinto comportamiento, por ejemplo, determinar la existencia un subdominio, tal hecho se puede asociar a la heterogeneidad estructural intrínseca del dominio 4.

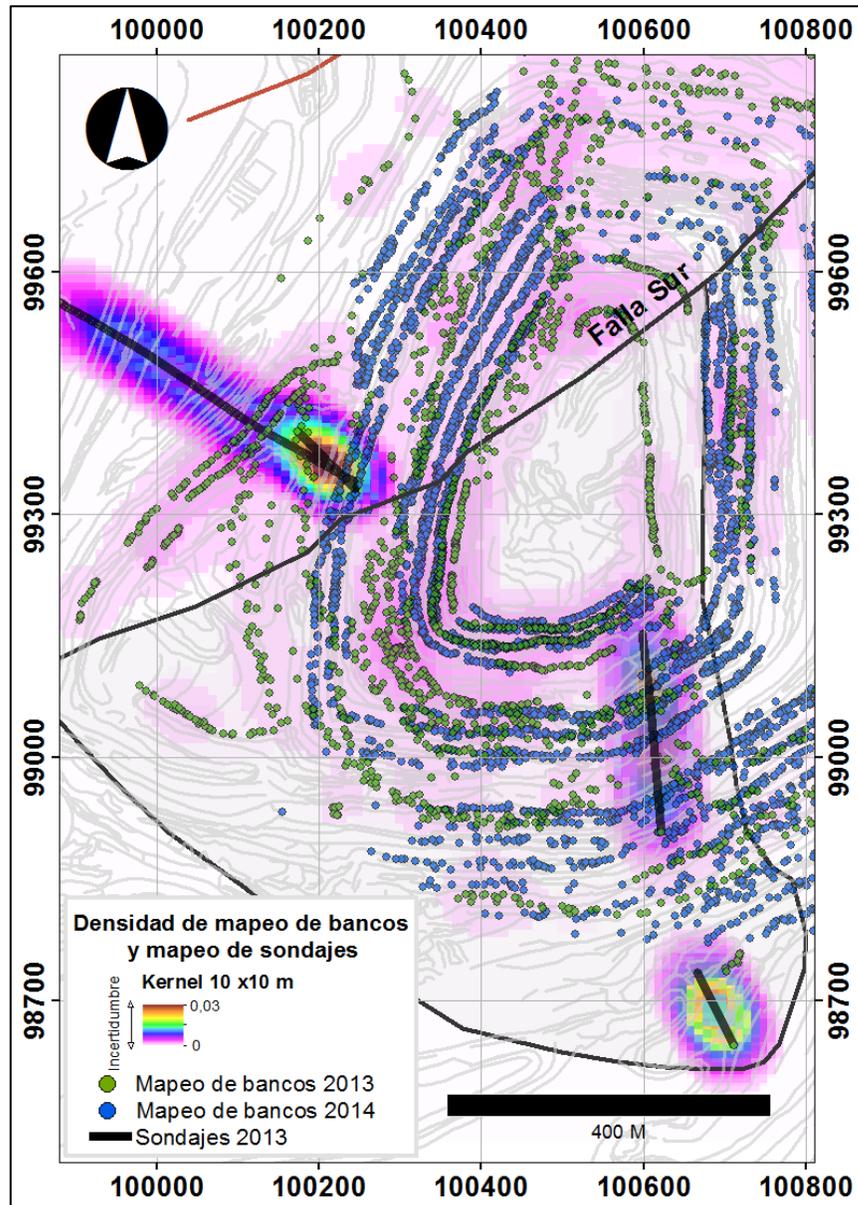


Figura 29: Mapa de mapeo de bancos 2013-2014 y ubicación de los sondajes 2013. En el mapa adjunto se observa la buena distribución y carácter homogéneo de Bancos 2013-2014; frente a la información proveniente de Sondajes 2013, concentrada espacialmente en la parte oriental del Dominio 4.

Para terminar, la información proveniente de Sondajes 2013, al igual que en el dominio 1 y 3, condiciona la definición del dominio 4. Tal hecho se muestra en la similitud entre los diagramas de contornos de polos del Modelo 2013, y el de Bancos 2014 más la los datos del Modelo 2013, comparados con las fallas inferidas en Sondajes 2013 (Figura 30). En la Tabla 7 se presenta un resumen de las características de los DCPs para cada fuente de información.

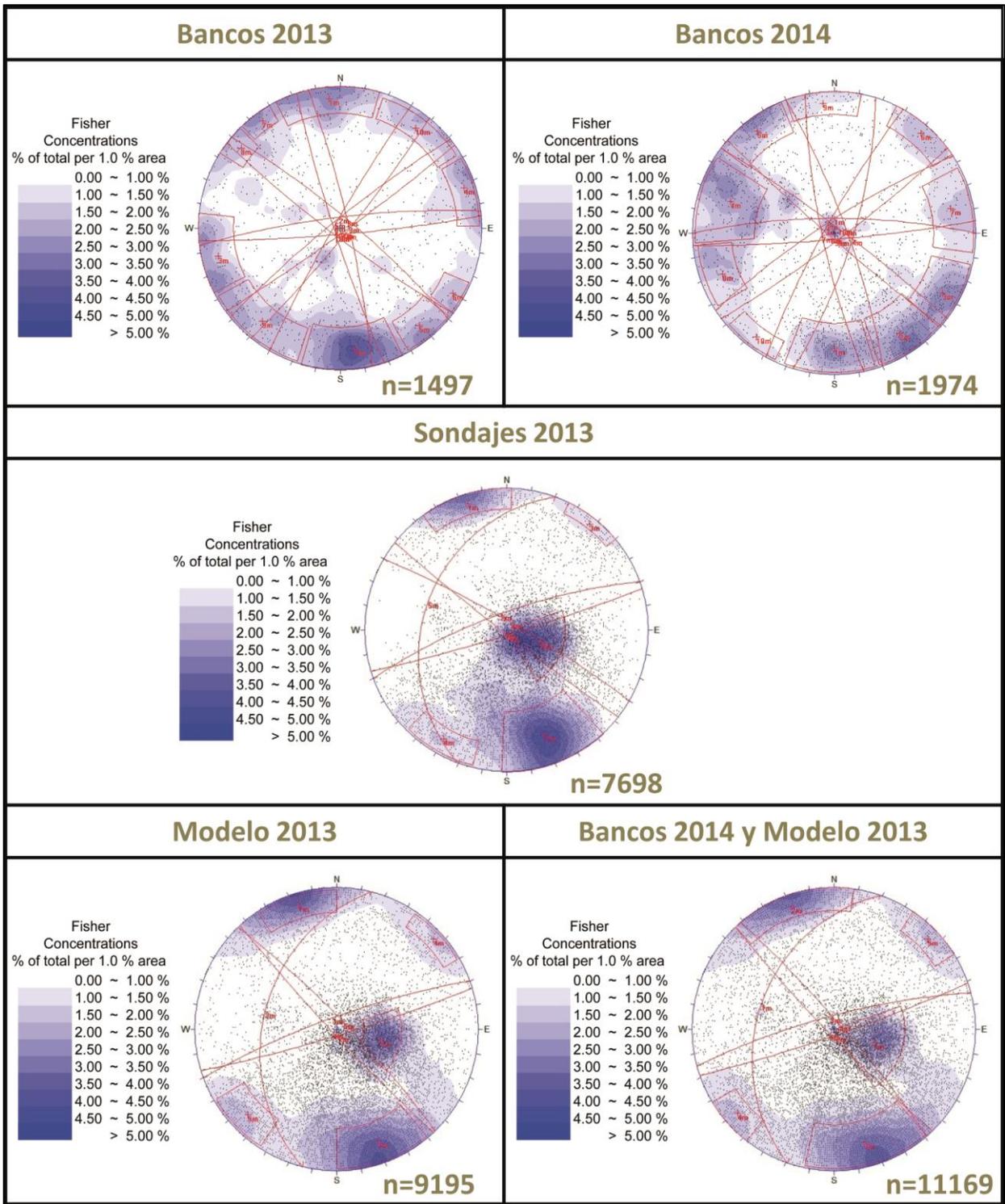


Figura 30: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 4. Se presentan los DCPs desarrollados con información de mapeo de bancos del año 2013 y 2014, de los sondeos utilizados en el desarrollo del Modelo Estructural 2013, el diagrama característico para el dominio, y finalmente, el DCP desarrollado con información proveniente de bancos 2013, 2014 y sondeos 2013.

Tabla 7: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 4. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo para las distintas fuentes de información pertenecientes al Dominio 4. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada *set* definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada *set* respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada *set* normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los *sets*.

| Dominio 4 | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|-------|------|------|-----|------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|
| Bancos 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Otros | Sumas |
| | Dip | 85 | 81 | 83 | 85 | 83 | 85 | 86 | 84 | 81 | 83 | | |
| | DipDir | 175 | 251 | 77 | 252 | 321 | 300 | 144 | 129 | 40 | 217 | | |
| | n _{set} | 95 | 171 | 57 | 54 | 53 | 35 | 28 | 29 | 118 | 62 | 795 | 1497 |
| | n _{total} | 1497 | | | | | | | | | | | |
| | Total | 6% | 11% | 4% | 4% | 4% | 2% | 2% | 2% | 8% | 4% | 53% | 100% |
| | n _{set corr} | 203 | 365 | 122 | 115 | 113 | 75 | 60 | 62 | 252 | 132 | 0 | 1497 |
| | Total _{corr} | 14% | 24% | 8% | 8% | 8% | 5% | 4% | 4% | 17% | 9% | 0% | 100% |
| Bancos 2014 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Otros | Sumas |
| | Dip | 79 | 80 | 82 | 76 | 84 | 86 | 80 | 80 | 85 | 85 | | |
| | DipDir | 165 | 327 | 299 | 107 | 143 | 221 | 258 | 70 | 175 | 37 | | |
| | n _{set} | 289 | 238 | 140 | 141 | 128 | 46 | 60 | 56 | 58 | 24 | 794 | 1974 |
| | n _{total} | 1974 | | | | | | | | | | | |
| | Total | 15% | 12% | 7% | 7% | 6% | 2% | 3% | 3% | 3% | 1% | 40% | 100% |
| | n _{set corr} | 483 | 398 | 234 | 236 | 214 | 77 | 100 | 94 | 97 | 40 | 0 | 1974 |
| | Total _{corr} | 24% | 20% | 12% | 12% | 11% | 4% | 5% | 5% | 5% | 2% | 0% | 100% |
| Sondajes 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | | | | | |
| | Dip | 86 | 76 | 87 | 83 | 31 | | | | | | | |
| | DipDir | 163 | 325 | 218 | 30 | 290 | | | | | | | |
| | n _{set} | 277 | 1206 | 53 | 192 | 1720 | 4250 | 7698 | | | | | |
| | n _{total} | 7698 | | | | | | | | | | | |
| | Total | 4% | 16% | 1% | 2% | 22% | 55% | 100% | | | | | |
| | n _{set corr} | 618 | 2693 | 118 | 429 | 3840 | 0 | 7698 | | | | | |
| | Total _{corr} | 8% | 35% | 2% | 6% | 50% | 0% | 100% | | | | | |
| Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | | | | | |
| | Dip | 85 | 36 | 80 | 86 | 82 | | | | | | | |
| | DipDir | 163 | 284 | 335 | 227 | 46 | | | | | | | |
| | n _{set} | 337 | 1362 | 996 | 107 | 292 | 6101 | 9195 | | | | | |
| | n _{total} | 9195 | | | | | | | | | | | |
| | Total | 4% | 15% | 11% | 1% | 3% | 66% | 100% | | | | | |
| | n _{set corr} | 1002 | 4048 | 2960 | 318 | 868 | 0 | 9195 | | | | | |
| | Total _{corr} | 11% | 44% | 32% | 3% | 9% | 0% | 100% | | | | | |
| Bancos 2014 y Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | | | | | |
| | Dip | 34 | 85 | 79 | 84 | 85 | | | | | | | |
| | DipDir | 289 | 161 | 275 | 49 | 226 | | | | | | | |
| | n _{set} | 2144 | 590 | 1711 | 223 | 169 | 6332 | 11169 | | | | | |
| | n _{total} | 11169 | | | | | | | | | | | |
| | Total | 19% | 5% | 15% | 2% | 2% | 57% | 100% | | | | | |
| | n _{set corr} | 4951 | 1362 | 3951 | 515 | 390 | 0 | 11169 | | | | | |
| | Total _{corr} | 44% | 12% | 35% | 5% | 3% | 0% | 100% | | | | | |

4.2.7. Dominio 5

Ubicado en la parte sur-central de la mina, se encuentra controlado y limitado sólo en su parte este por la presencia de la falla Infiernillo 2 de orientación N-S, ya que en el lado oeste presenta un límite indefinido el cual linda con el dominio 4. Este dominio fue caracterizado en el Modelo Estructural vigente con información exclusiva de mapeo de bancos, dado que no existían sondajes asociados a la zona.

Se observa que el diagrama de Bancos 2014 y Bancos 2013 muestran distintas interpretaciones de sets de fallas, y cantidad y distribución de polos representados (Figura 31, Tabla 8) lo cual se entiende como consecuencia de que Bancos 2014 cuadruplicó la información obtenida de mapeo de bancos, y sobre todo, logró un mapeo homogéneo y con mayor resolución en toda la pared que contiene al dominio (Figura 32).

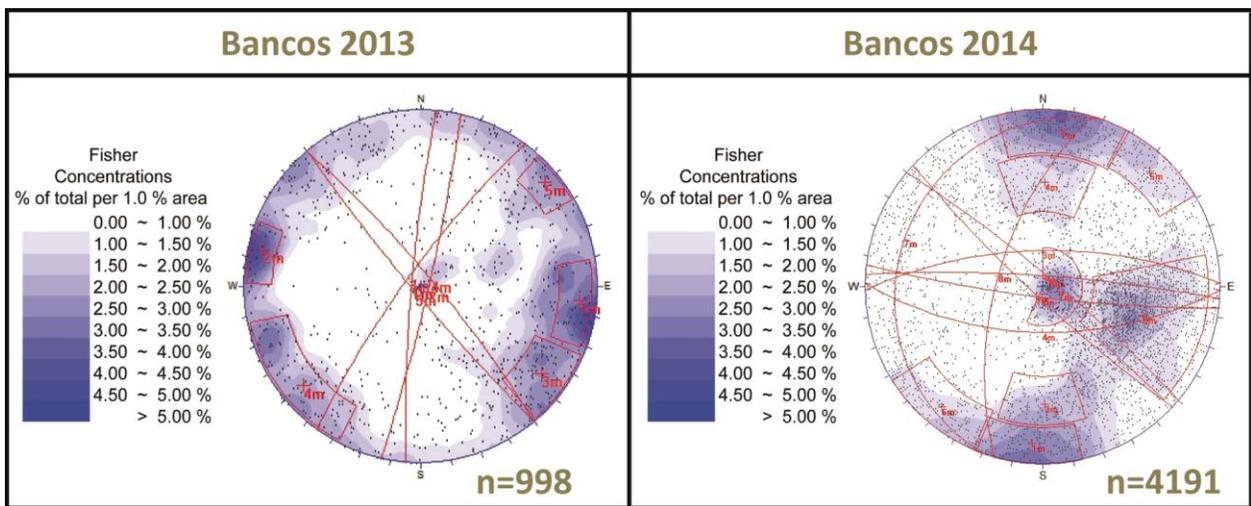


Figura 31: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 5. Se presentan los DCPs desarrollados con información de mapeo de bancos del año 2013 y 2014; en donde este último es el diagrama característico del Modelo Estructural 2013 para el dominio, debido a la ausencia de información proveniente de sondajes.

Tabla 8: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 5. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo para Bancos 2013 y Bancos 2014 para el Dominio 5. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada set definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada set respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada set normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los sets.

| Dominio 5 | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|------|-------|-------|
| Bancos 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | | | |
| | Dip | 84 | 85 | 86 | 82 | 85 | | | | | |
| | DipDir | 275 | 103 | 306 | 50 | 230 | | | | | |
| | n _{set} | 37 | 23 | 77 | 85 | 31 | 745 | 998 | | | |
| | n _{total} | 998 | | | | | | | | | |
| | Total | 4% | 2% | 8% | 9% | 3% | 75% | 100% | | | |
| | n _{set corr} | 146 | 91 | 304 | 335 | 122 | 0 | 998 | | | |
| Total _{corr} | 15% | 9% | 30% | 34% | 12% | 0% | 100% | | | | |
| Bancos 2014 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Otros | Sumas |
| | Dip | 83 | 83 | 67 | 61 | 83 | 83 | 16 | 59 | | |
| | DipDir | 140 | 187 | 185 | 181 | 224 | 40 | 252 | 284 | | |
| | n _{set} | 159 | 225 | 161 | 159 | 143 | 174 | 233 | 986 | 1951 | 4191 |
| | n _{total} | 4191 | | | | | | | | | |
| | Total | 4% | 5% | 4% | 4% | 3% | 4% | 6% | 24% | 47% | 100% |
| | n _{set corr} | 297 | 421 | 301 | 297 | 268 | 326 | 436 | 1845 | 0 | 4191 |
| | Total _{corr} | 7% | 10% | 7% | 7% | 6% | 8% | 10% | 44% | 0% | 100% |

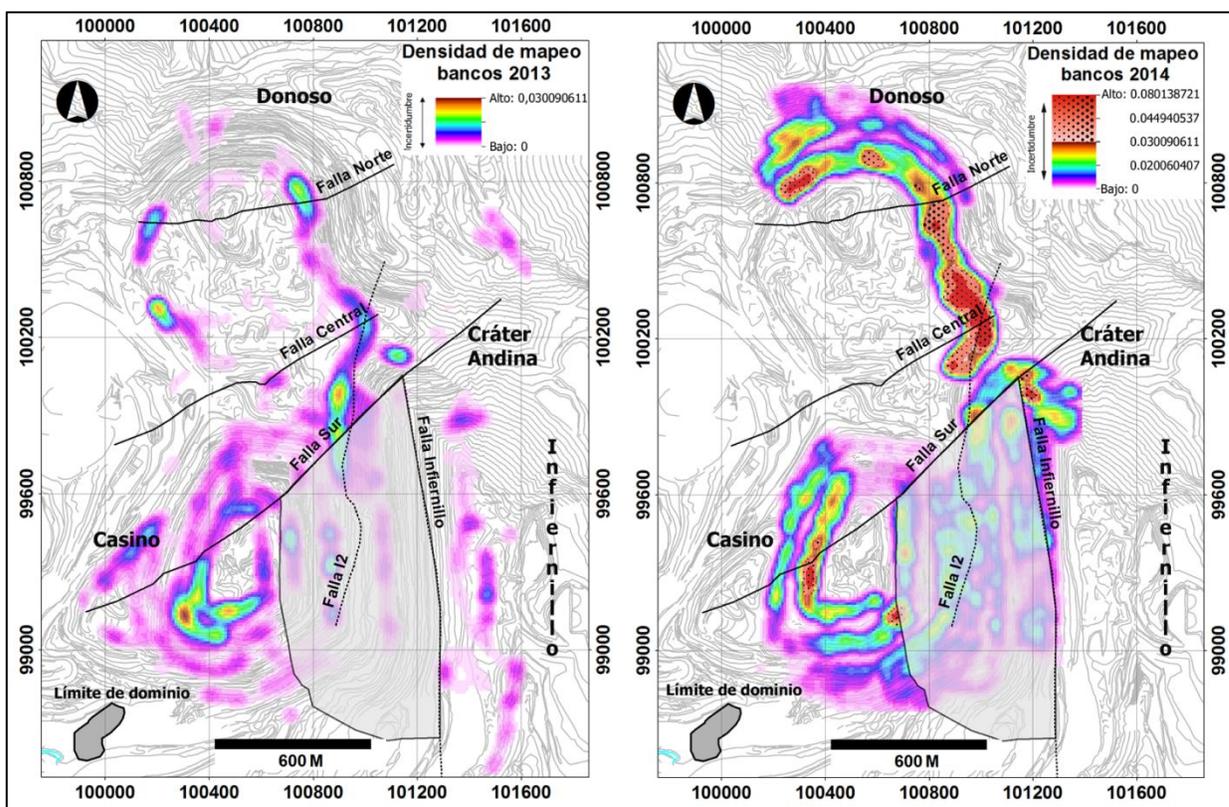


Figura 32: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 5. En la figura se observa el mapeo efectuado sobre el dominio 5; este destaca por el fuerte aumento en la resolución del mapeo de bancos, pasando a un mapeo discreto y acotado a la parte inferior del dominio, a un mapeo homogéneo, abarcando gran parte de la pared asociada al dominio.

A causa de esta mayor distribución de datos, se realizó una exploración a través de diagramas de contornos de polos utilizando cuadrantes de 100x100 metros con el objetivo de identificar probables patrones en la distribución de las estructuras según su comportamiento. Cada cuadrante fue contrastado con todos los demás, especialmente con los que se encuentran a su alrededor, a través de una exploración visual y considerando el total de polos para cada uno.

En la exploración se descubrieron variaciones dentro del dominio que podrían corresponder a una heterogeneidad intrínseca de este o a posibles subdominios. Se identificaron dos zonas de interés debido a que mostraron comportamientos similares en su diagrama de contornos de polos (Figura 33): una en el sur, próxima al dominio 4 (marco negro), y otra ubicada en la parte este, hacia el límite con el dominio 1 (marco pardo).

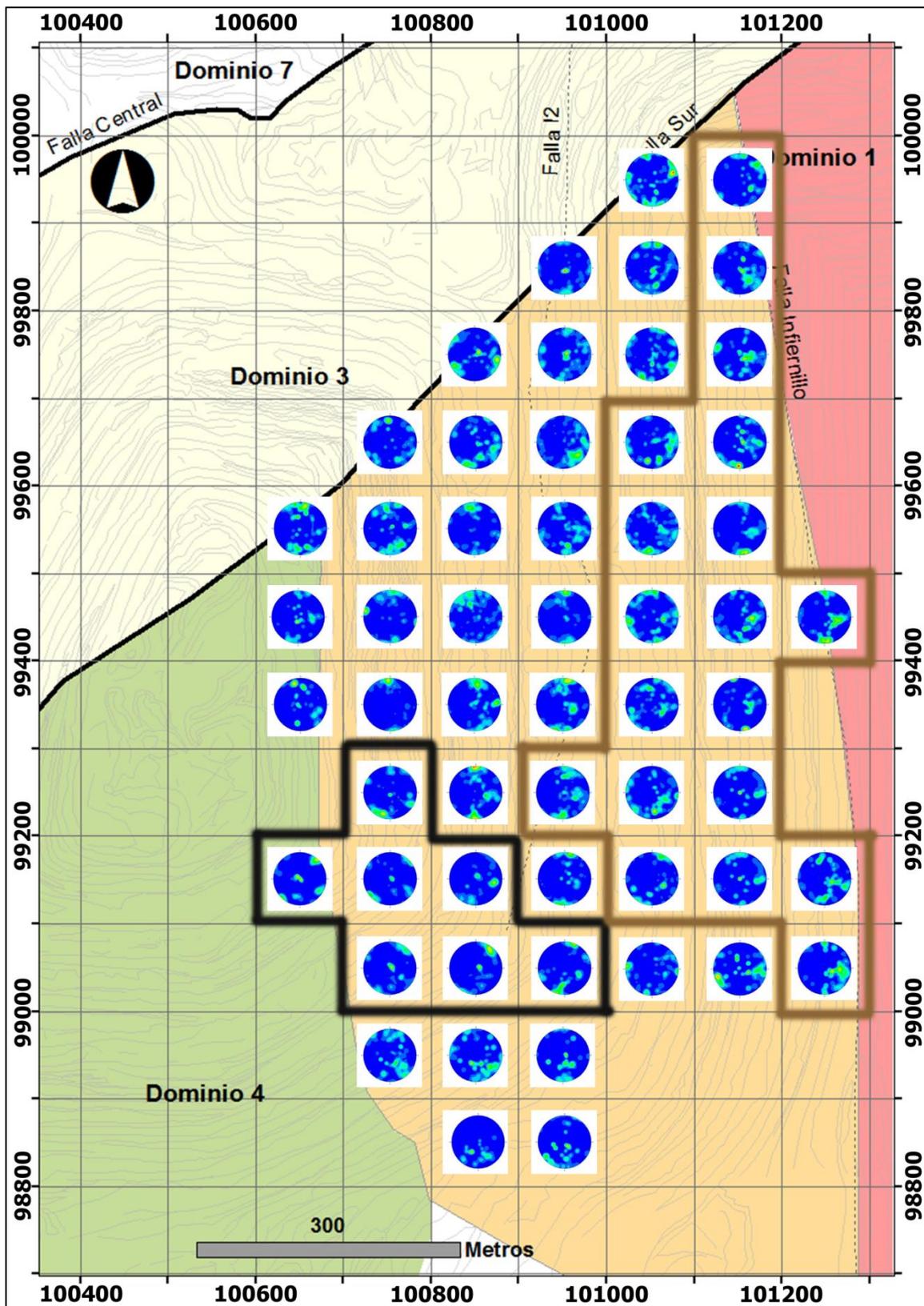


Figura 33: Distribución de celdas de exploración sobre el Dominio 5. En la figura se observa la ubicación de las celdas de exploración y los límites de las zonas interpretadas como zonas de interés debido a su comportamiento estructural similar ubicados en la parte sur-oeste (negro) y este del dominio (pardo).

Los diagramas dispuestos hacia el dominio 4 (Figura 34, polígono negro) muestran un comportamiento similar al diagrama de contorno de polos que define tal dominio: estructuras de alto ángulo con orientación NW-SE y NE-SW; con sus *set* conjugados; y en menor medida, estructuras sub-horizontales manteniendo hacia SW. Más aún, la litología presente en esta heterogeneidad coincide, mayormente, con la litología que contiene al dominio 4: cuarzomonzonita.

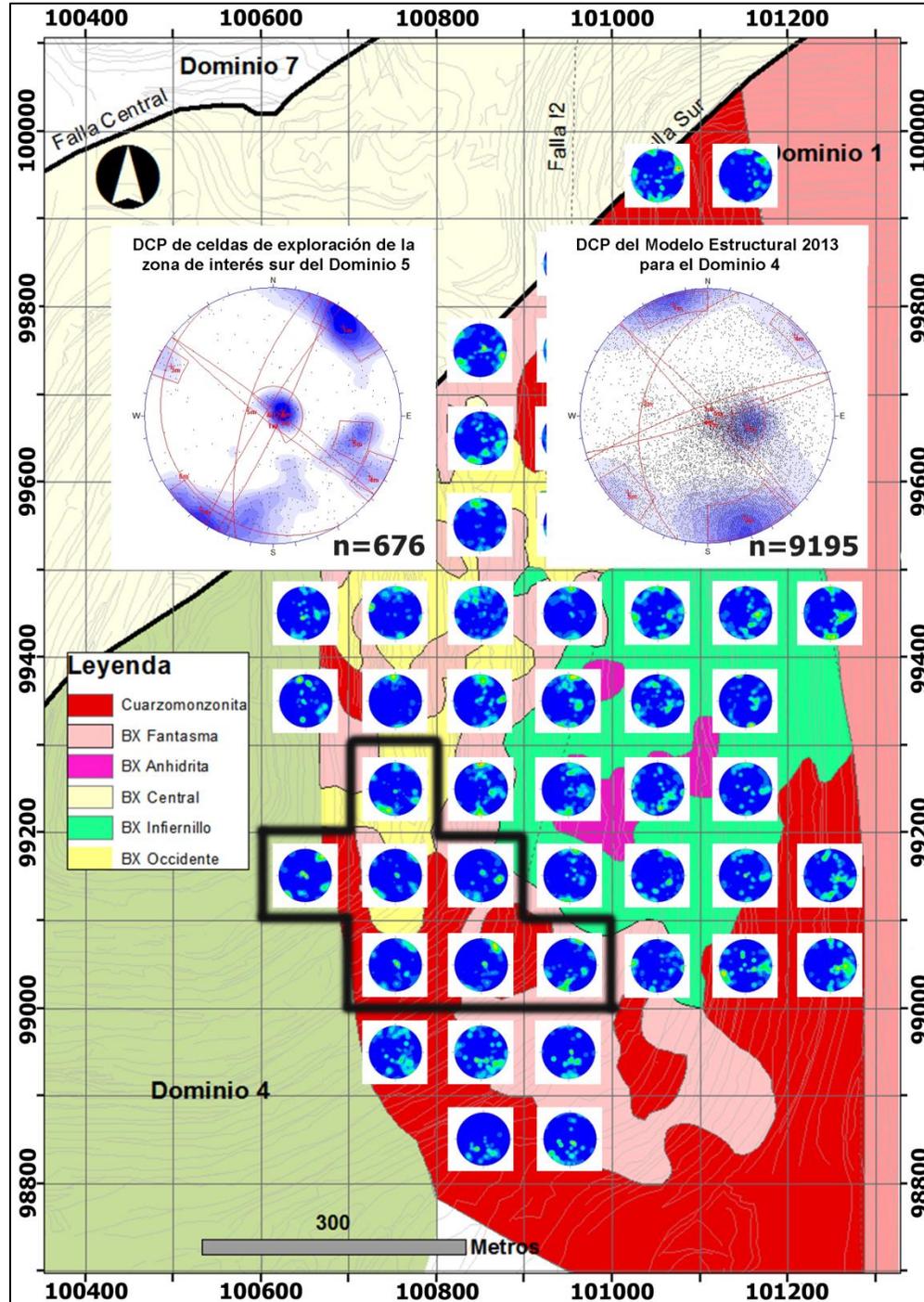


Figura 34: Distribución de celdas de exploración de la zona de interés sur del dominio 5. La figura muestra la relación espacial encontrada entre las celdas de exploración de comportamiento similar al dominio 4 y el afloramiento de cuarzomonzonita, litología además contendora del dominio 4.

Para el caso de los diagramas de contorno de polos ubicados cerca del límite con el dominio 1 (Figura 35, polígono pardo), se definen fallas de alto ángulo con orientación ESE-WNW y su respectivo conjugado; y *set* de estructuras de orientación NNE-SSW con manteos promedio de 15 y 45 grados. A su vez, la exploración muestra que este comportamiento se relaciona espacialmente, en gran parte, a la presencia de la Brecha Infernillo.

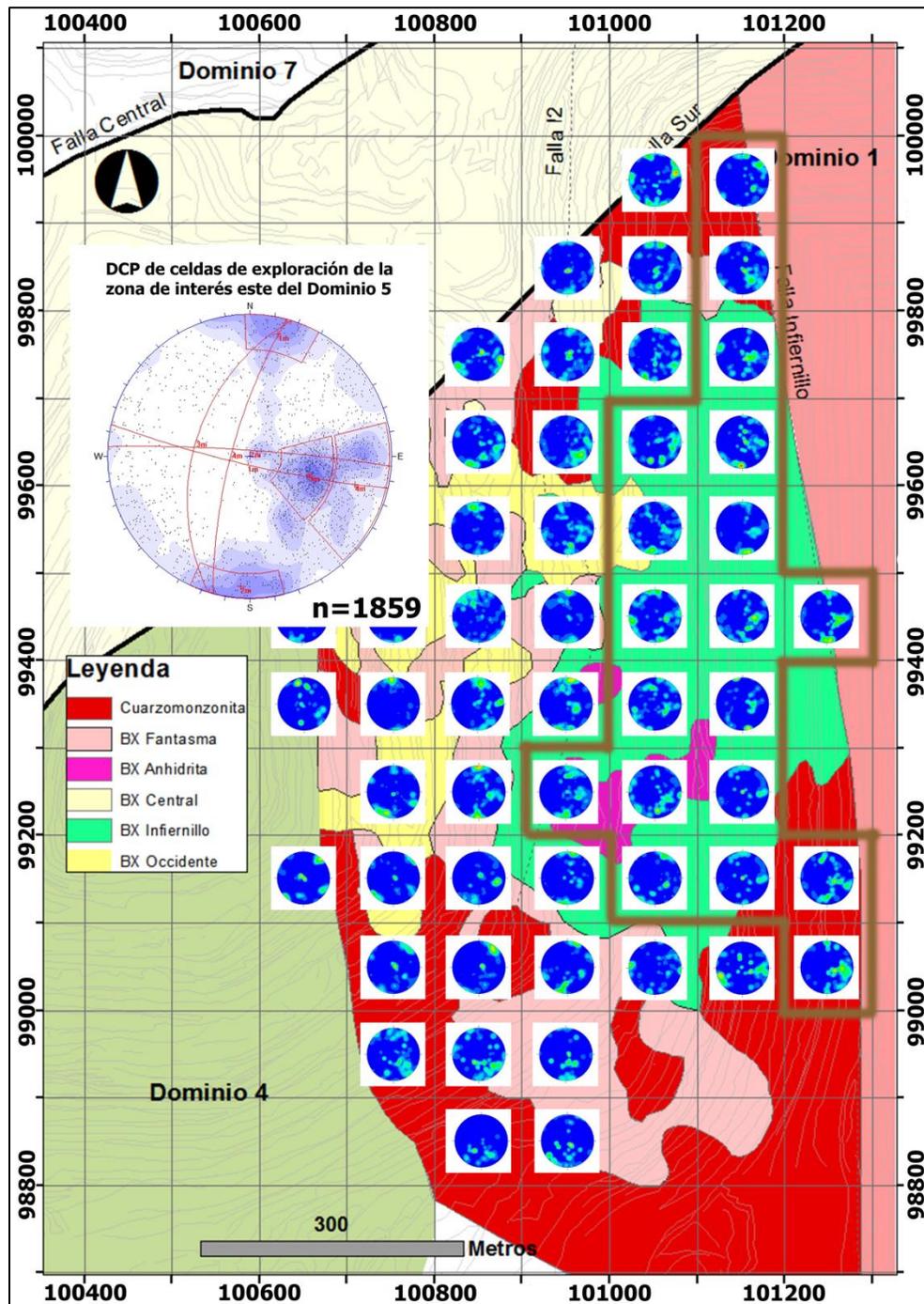


Figura 35: Distribución de celdas de exploración de la zona de interés este del dominio 5. La figura muestra celdas de exploración de comportamiento similar entre sí: fallas de alto ángulo con orientación ESE-WNW y su respectivo conjugado, y *set* de estructuras de orientación NNE-SSW con manteos promedio de 15 y 45 grados; y su relación espacial con el afloramiento de la Brecha Infernillo.

4.2.8. Dominio 6

En cuanto a la ubicación del dominio, este se encuentra en la zona norte de la mina, y es controlado en su lado sur por la presencia de la Falla Norte y en su flanco este por la Riolita. Como resultado de la campaña de mapeo Bancos 2014, se logró aumentar 10 veces la cantidad de datos pertenecientes a este dominio (2956 estructuras), obteniendo información de toda la cara norte del rajo Donoso (Figura 36).

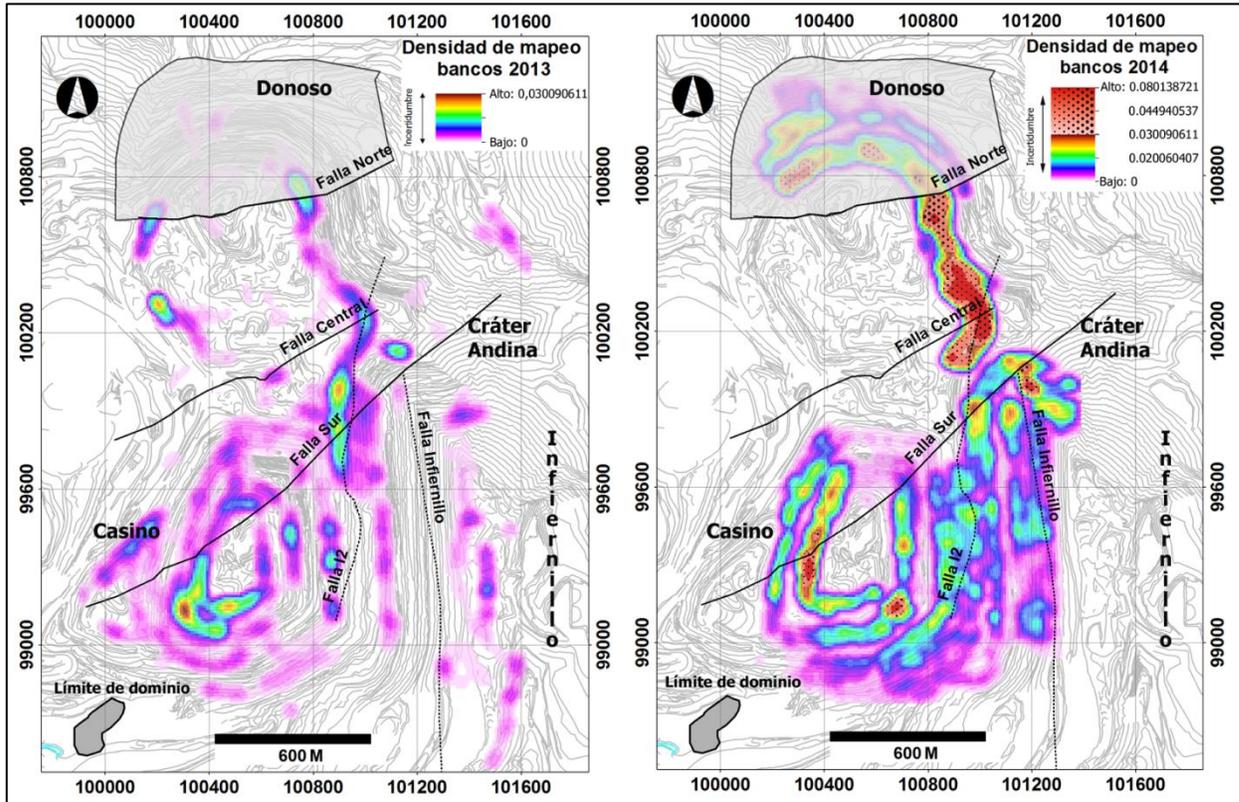


Figura 36: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 6. En la figura se observa el mapeo efectuado sobre el dominio 6, en este destaca el aporte de información proveniente de la parte superior de la pared norte de Donoso.

Tanto el diagrama de contorno de polos de Bancos 2014, como el de Bancos 2013 (Figura 37), muestra un *set* primario de estructuras sub-verticales con orientación NE-SW y otro de mucho menor manteo ($\sim 20^\circ$) y orientación E-W; y un sistema secundario de estructuras de fallas de alto ángulo con orientación NNW-SSE. En la Tabla 9 se presenta un resumen de las características de los DCPs para cada fuente de información.

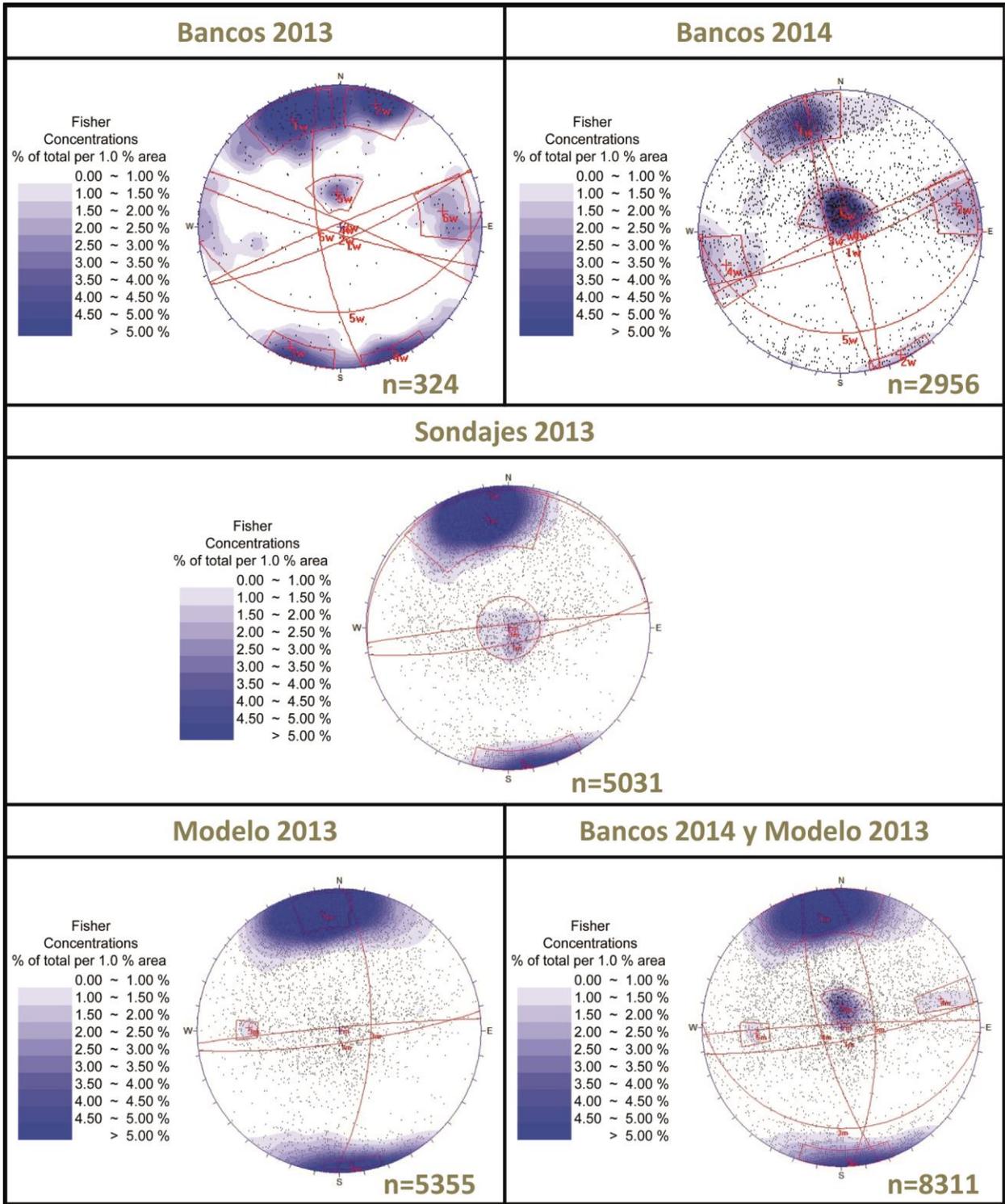


Figura 37: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 6. Se presentan los DCPs desarrollados con información de mapeo de bancos del año 2013 y 2014, de los sondajes utilizados en el desarrollo del Modelo Estructural 2013 el diagrama característico para el dominio, y finalmente, el DCP desarrollado con información proveniente de bancos 2013, 2014 y sondajes 2013.

Tabla 9: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 6. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo para las distintas fuentes de información pertenecientes al Dominio 6. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada *set* definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada *set* respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada *set* normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los *sets*.

| Dominio 6 | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bancos 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Otros | Sumas |
| | Dip | 79 | 84 | 85 | 85 | 30 | 74 | | |
| | DipDir | 156 | 196 | 22 | 252 | 172 | 262 | | |
| | n _{set} | 63 | 38 | 11 | 4 | 27 | 27 | 154 | 324 |
| | n _{total} | 324 | | | | | | | |
| | Total | 19% | 12% | 3% | 1% | 8% | 8% | 48% | 100% |
| | n _{set corr} | 120 | 72 | 21 | 8 | 51 | 51 | 0 | 324 |
| | Total _{corr} | 37% | 22% | 6% | 2% | 16% | 16% | 0% | 100% |
| Bancos 2014 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 79 | 88 | 79 | 81 | 23 | | | |
| | DipDir | 159 | 334 | 256 | 74 | 178 | | | |
| | n _{set} | 725 | 46 | 141 | 108 | 448 | 1488 | 2956 | |
| | n _{total} | 2956 | | | | | | | |
| | Total | 25% | 2% | 5% | 4% | 15% | 50% | 100% | |
| | n _{set corr} | 1460 | 93 | 284 | 217 | 902 | 0 | 2956 | |
| | Total _{corr} | 49% | 3% | 10% | 7% | 31% | 0% | 100% | |
| Sondajes 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | Otros | Sumas | | | |
| | Dip | 78 | 87 | 15 | | | | | |
| | DipDir | 169 | 228 | 250 | | | | | |
| | n _{set} | 2419 | 277 | 254 | 2081 | 5031 | | | |
| | n _{total} | 5031 | | | | | | | |
| | Total | 48% | 6% | 5% | 41% | 100% | | | |
| | n _{set corr} | 4125 | 472 | 433 | 0 | 5031 | | | |
| | Total _{corr} | 82% | 9% | 9% | 0% | 100% | | | |
| Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 84 | 85 | 86 | 82 | 85 | | | |
| | DipDir | 275 | 103 | 306 | 50 | 230 | | | |
| | n _{set} | 37 | 23 | 77 | 85 | 31 | 745 | 998 | |
| | n _{total} | 998 | | | | | | | |
| | Total | 4% | 2% | 8% | 9% | 3% | 75% | 100% | |
| | n _{set corr} | 146 | 91 | 304 | 335 | 122 | 0 | 998 | |
| | Total _{corr} | 15% | 9% | 30% | 34% | 12% | 0% | 100% | |
| Bancos 2014 y Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 80 | 87 | 20 | 73 | 63 | | | |
| | DipDir | 169 | 208 | 183 | 254 | 86 | | | |
| | n _{set} | 2952 | 317 | 495 | 154 | 79 | 4314 | 8311 | |
| | n _{total} | 8311 | | | | | | | |
| | Total | 36% | 4% | 6% | 2% | 1% | 52% | 100% | |
| | n _{set corr} | 6138 | 659 | 1029 | 320 | 164 | 0 | 8311 | |
| | Total _{corr} | 74% | 8% | 12% | 4% | 2% | 0% | 100% | |

En contraste con lo anterior, el diagrama de Sondajes 2013 y Modelo 2013, este último representativo del dominio 6 y fuertemente influenciado por la información de sondajes, en general muestran una escasa existencia de estructuras sub-horizontales, las que no alcanzan una cantidad suficiente para ser interpretadas como un *set* primario, ni menos definir el *set* ampliamente reconocido en el mapeo de bancos (Figura 38) formado de estructuras de orientación E-W.

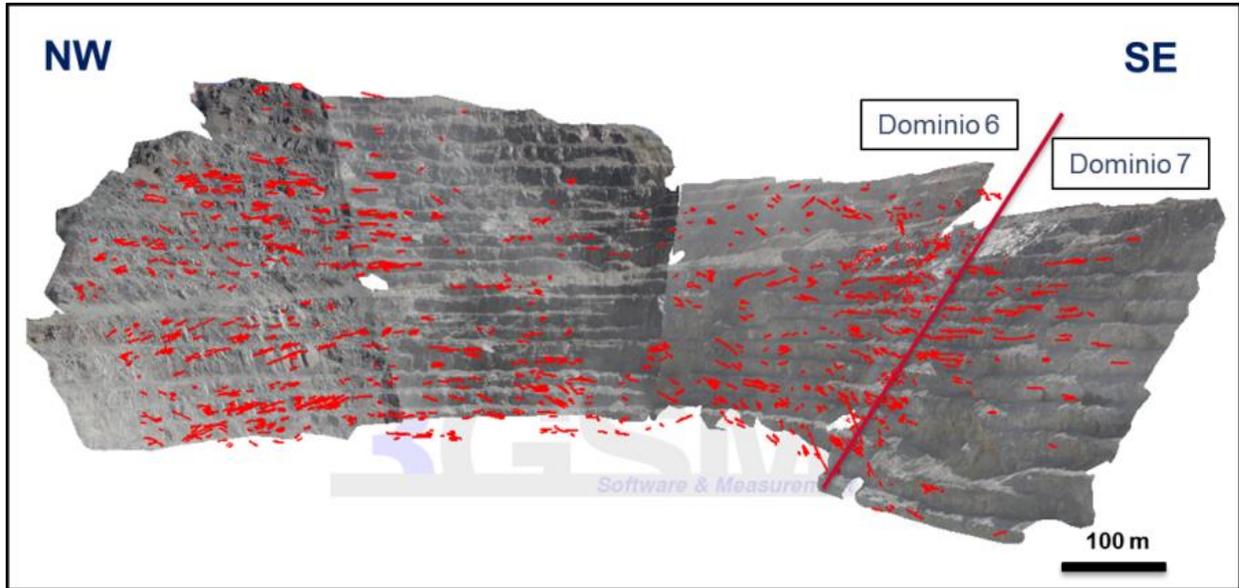


Figura 38: Mapeo efectuado en la parte norte del rajo Donoso. En la figura se observan las estructuras subhorizontales mapeadas en este estudio, estructuras pertenecientes al *set* primario E-W del dominio 6.

Este hecho se puede deber a una anisotropía del comportamiento del macizo no vista, errores en la interpretación de estructuras como huellas dejadas por la perforación del sondaje, o debido a un sesgo que presenta el método geofísico utilizado en el reconocimiento y caracterización espacial de estructuras en sondajes: *Acoustic televiewers (ATV)*. Weir (2012) señala la existencia de un punto ciego en la medición de orientación de estructuras normales al plunge del sondaje, creando una sub-representación de estas. Esta condición se presentó en las campañas de sondajes efectuadas en este dominio, en donde, tres de los cuatro sondajes - de los cuales hay información de la orientación del sondaje, y que representan en conjunto un 75% de la base de datos - cortan de manera perpendicular el sistema de fallas 65/180 encontrado (Figura 39).

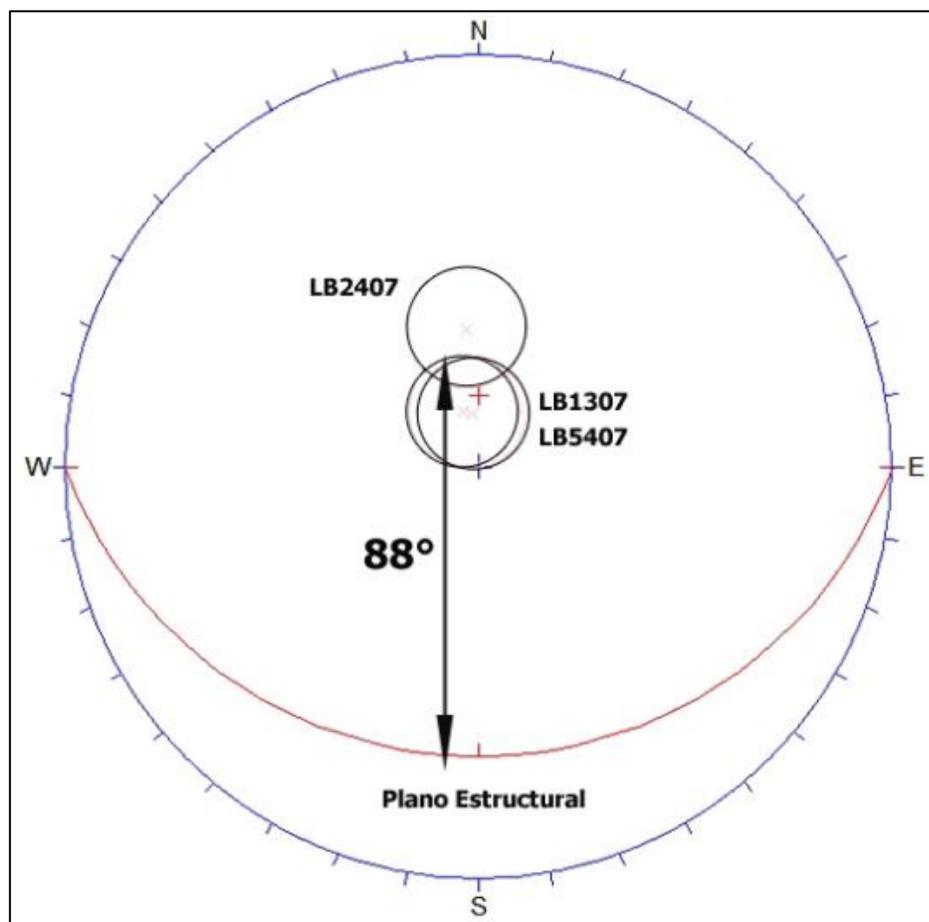


Figura 39: Relación entre set primario E-W y orientación de sondajes en el Dominio 6. La figura muestra el posible sesgo en el reconocimiento de las estructuras sub-horizontales E-W debido a su orientación normal al plunge del sondaje.

Finalmente, considerando la nueva información aportada, la caracterización estructural del dominio 6 correspondería un sistema primario formado por fallas sub-verticales de orientación ENE-WSW, con sets conjugados, y otras sub-horizontales ($\sim 20^\circ$) y orientación E-W; y un sistema secundario formado por estructuras de menor manteo ($\sim 60^\circ$) y orientación N-S, con sets conjugados.

4.2.9. Dominio 7

Ubicado en la parte norte y central de la mina, es limitado por la presencia de dos fallas principales: Falla Norte y Falla Central, por el norte y sur del dominio, respectivamente. Como resultado de este estudio se triplica la información derivada de mapeos de bancos, y se logran levantar datos de la zona este del dominio (Figura 40), la cual poseía una baja resolución y participación, en la definición mecánica del macizo.

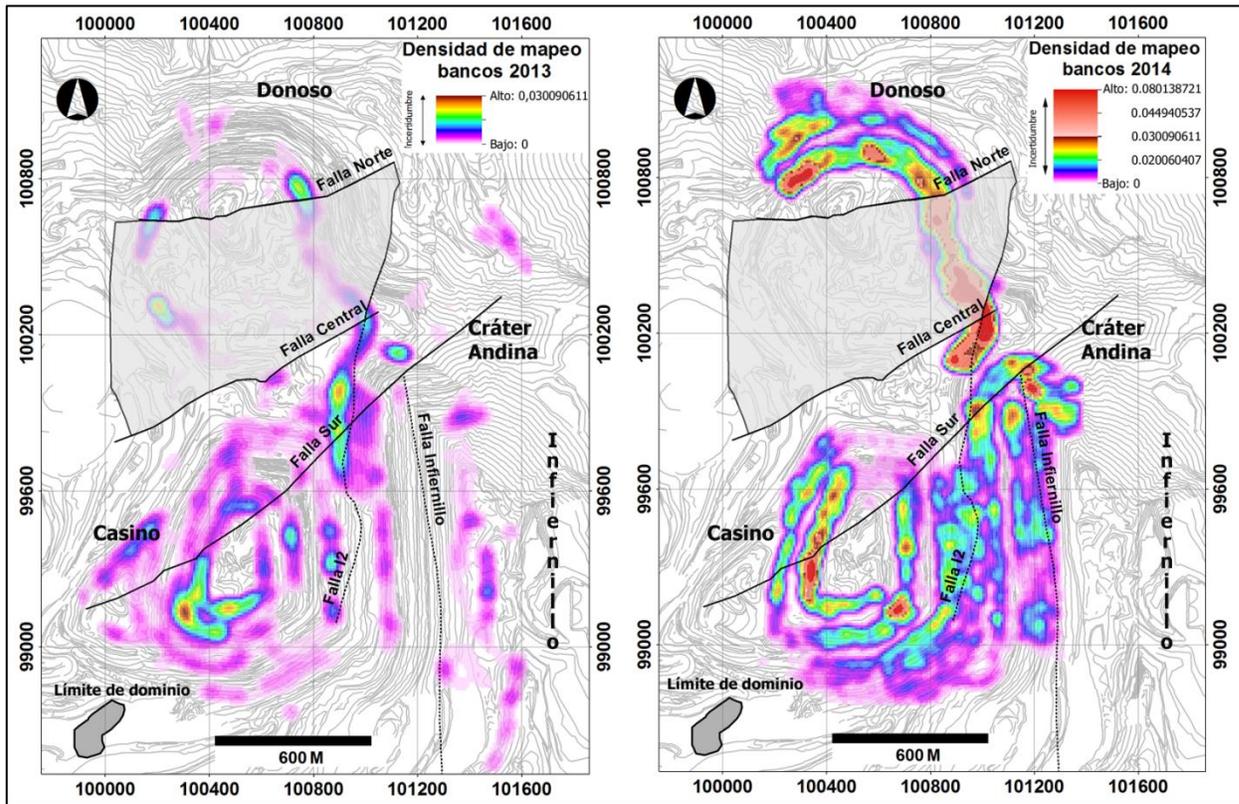


Figura 40: Densidad de mapeo de bancos del Dominio 7. En la figura se observa el mapeo efectuado sobre el dominio 7, en este destaca el fuerte aporte de información proveniente de la pared este del rajo de Donoso.

Tanto en Bancos 2013 y 2014 (Figura 41), se observa un *set* primario de estructuras sub-verticales de orientación ENE-WSW y WNW-ESE, junto a sus *set* conjugados; estructuras primarias sub-horizontales de orientación NW-SE, y un *set* secundario de estructuras NW-SE manteniendo 65° hacia el SW. En contraste, la interpretación hecha en Sondajes 2013, solo coincide con Bancos 2013 y 2014, en la definición del sistema secundario de estructuras NW-SE. En la Tabla 10 se presenta un resumen de las características de los DCPs para cada fuente de información.

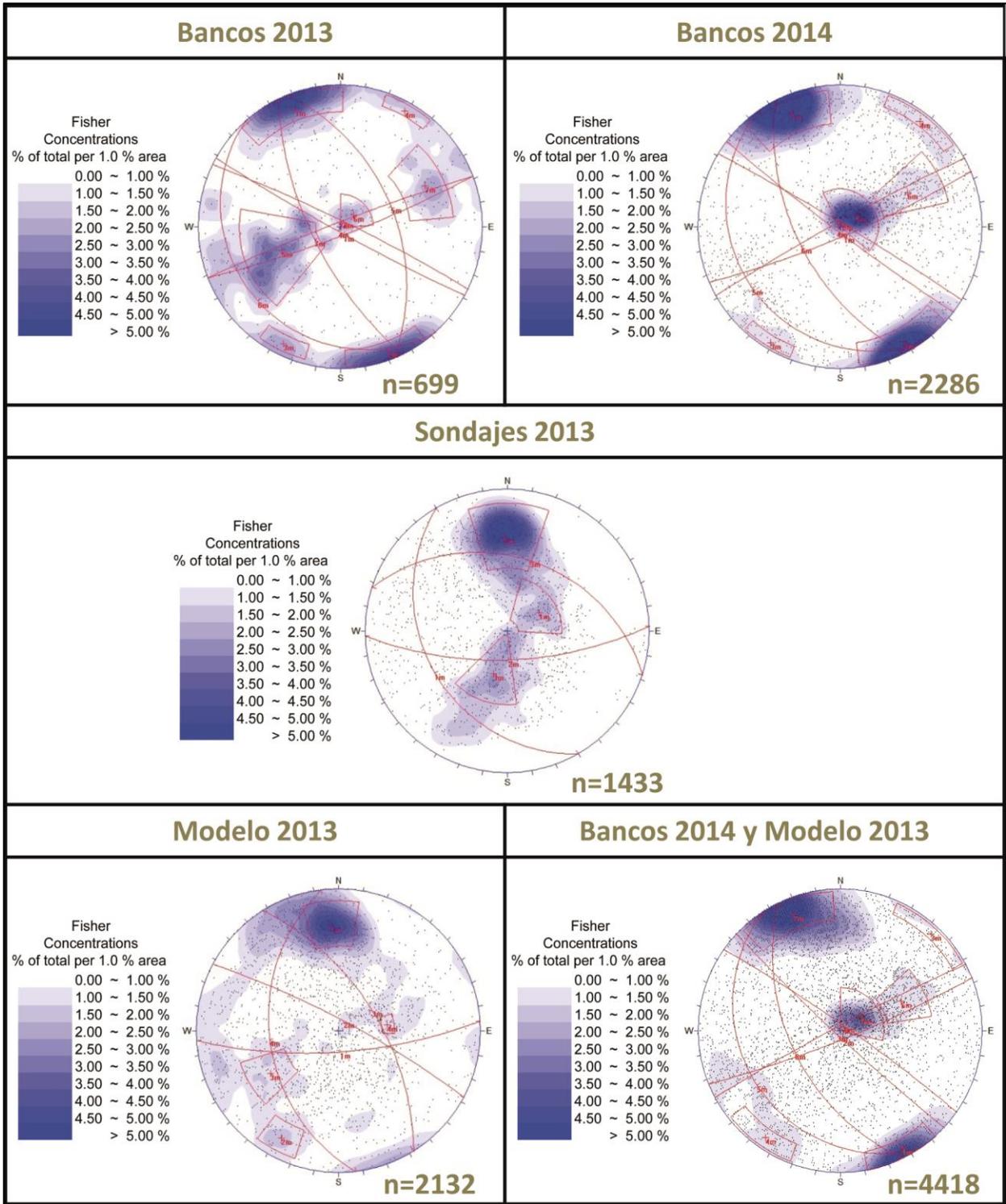


Figura 41: Diagramas de contornos de polos pertenecientes al Dominio 7. Se presentan los DCPs desarrollados con información de mapeo de bancos del año 2013 y 2014, de los sondajes utilizados en el desarrollo del Modelo Estructural 2013, el diagrama característico para el dominio, y finalmente, el DCP desarrollado con información proveniente de bancos 2013, 2014 y sondajes 2013.

Tabla 10: Tabla resumen de las características de los DCPs del Dominio 7. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo para las distintas fuentes de información pertenecientes al Dominio 7. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada *set* definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada *set* respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada *set* normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los *sets*.

| Dominio 7 | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bancos 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Otros | Sumas |
| | Dip | 83 | 86 | 85 | 86 | 49 | 16 | 67 | | |
| | DipDir | 159 | 339 | 26 | 210 | 69 | 224 | 244 | | |
| | n _{set} | 72 | 22 | 16 | 6 | 112 | 21 | 35 | 415 | 699 |
| | n _{total} | 699 | | | | | | | | |
| | Total | 10% | 3% | 2% | 1% | 16% | 3% | 5% | 59% | 100% |
| | n _{set corr} | 177 | 54 | 39 | 15 | 276 | 52 | 86 | 0 | 699 |
| | Total _{corr} | 25% | 8% | 6% | 2% | 39% | 7% | 12% | 0% | 100% |
| Bancos 2014 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 82 | 86 | 87 | 87 | 19 | 57 | | | |
| | DipDir | 157 | 331 | 31 | 217 | 231 | 243 | | | |
| | n _{set} | 276 | 150 | 37 | 77 | 298 | 238 | 1210 | 2286 | |
| | n _{total} | 2286 | | | | | | | | |
| | Total | 12% | 7% | 2% | 3% | 13% | 10% | 53% | 100% | |
| | n _{set corr} | 586 | 319 | 79 | 164 | 633 | 506 | 0 | 2286 | |
| | Total _{corr} | 26% | 14% | 3% | 7% | 28% | 22% | 0% | 100% | |
| Sondajes 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | Otros | Sumas | | | | |
| | Dip | 63 | 34 | 41 | | | | | | |
| | DipDir | 179 | 247 | 111 | | | | | | |
| | n _{set} | 324 | 99 | 191 | 819 | 1433 | | | | |
| | n _{total} | 1433 | | | | | | | | |
| | Total | 23% | 7% | 13% | 57% | 100% | | | | |
| | n _{set corr} | 756 | 231 | 446 | 0 | 1433 | | | | |
| | Total _{corr} | 53% | 16% | 31% | 0% | 100% | | | | |
| Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | Otros | Sumas | | | |
| | Dip | 73 | 81 | 60 | 38 | | | | | |
| | DipDir | 176 | 28 | 58 | 263 | | | | | |
| | n _{set} | 191 | 38 | 78 | 29 | 1796 | 2132 | | | |
| | n _{total} | 2132 | | | | | | | | |
| | Total | 9% | 2% | 4% | 1% | 84% | 100% | | | |
| | n _{set corr} | 1212 | 241 | 495 | 184 | 0 | 2132 | | | |
| | Total _{corr} | 57% | 11% | 23% | 9% | 0% | 100% | | | |
| Bancos 2014 y Modelo 2013 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas | | |
| | Dip | 80 | 87 | 20 | 73 | 63 | | | | |
| | DipDir | 169 | 208 | 183 | 254 | 86 | | | | |
| | n _{set} | 2952 | 317 | 495 | 154 | 79 | 4314 | 8311 | | |
| | n _{total} | 8311 | | | | | | | | |
| | Total | 36% | 4% | 6% | 2% | 1% | 52% | 100% | | |
| | n _{set corr} | 6138 | 659 | 1029 | 320 | 164 | 0 | 8311 | | |
| | Total _{corr} | 74% | 8% | 12% | 4% | 2% | 0% | 100% | | |

Al analizar la proveniencia espacial de las distintas fuentes, Sondajes 2013 y gran parte de Bancos 2013, recogió información proveniente del sector este del dominio; por el contrario, Bancos 2014 se limitó en levantar información de la pared ubicada al oeste del dominio (Figura 42).

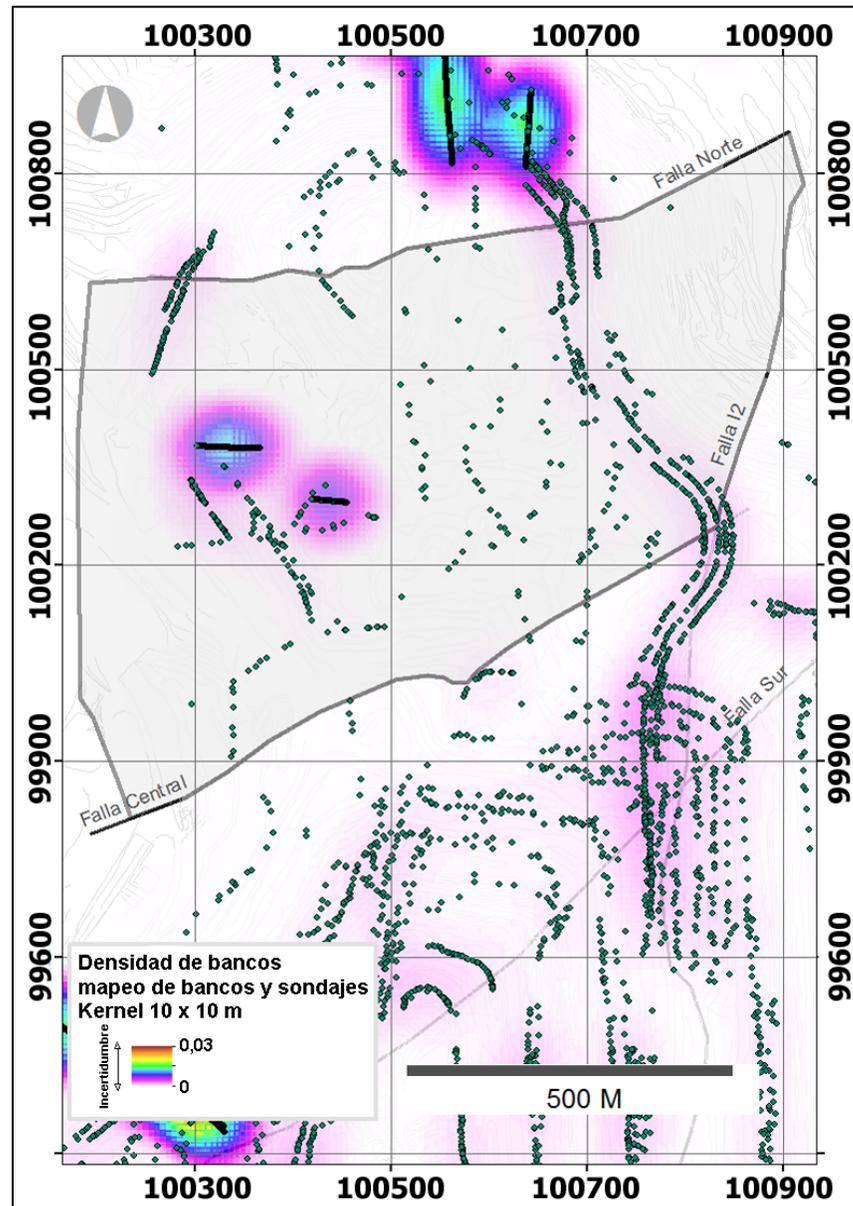


Figura 42: Mapa de densidad de mapeo de Bancos 2013 y Sondajes 2013 en el Dominio 7. Se observa que el mapeo de Sondajes 2013 y gran parte de Bancos 2013 proviene del sector este del dominio, situación contraria a Bancos 2014, el cual se limitó en levantar información de la pared oeste del dominio.

Entonces, dado el distinto comportamiento de los diagramas y el masivo aporte de información de la parte este del dominio, se generó una exploración sobre Sondajes 2013, Bancos 2013 y Bancos 2014 de diagramas de contornos de polos, utilizando cuadrantes de 100x100 metros en todo el sector perteneciente al dominio, cuyo fin fue identificar el grado de heterogeneidad de la distribución de los datos y/o posibles subdominios. Cada cuadrante fue contrastado con todos los demás, especialmente con los que se encuentran a su alrededor, a través de una exploración visual y considerando el total de polos para cada uno.

En la exploración se identificaron dos patrones de comportamiento espacialmente opuestos (Figura 43):

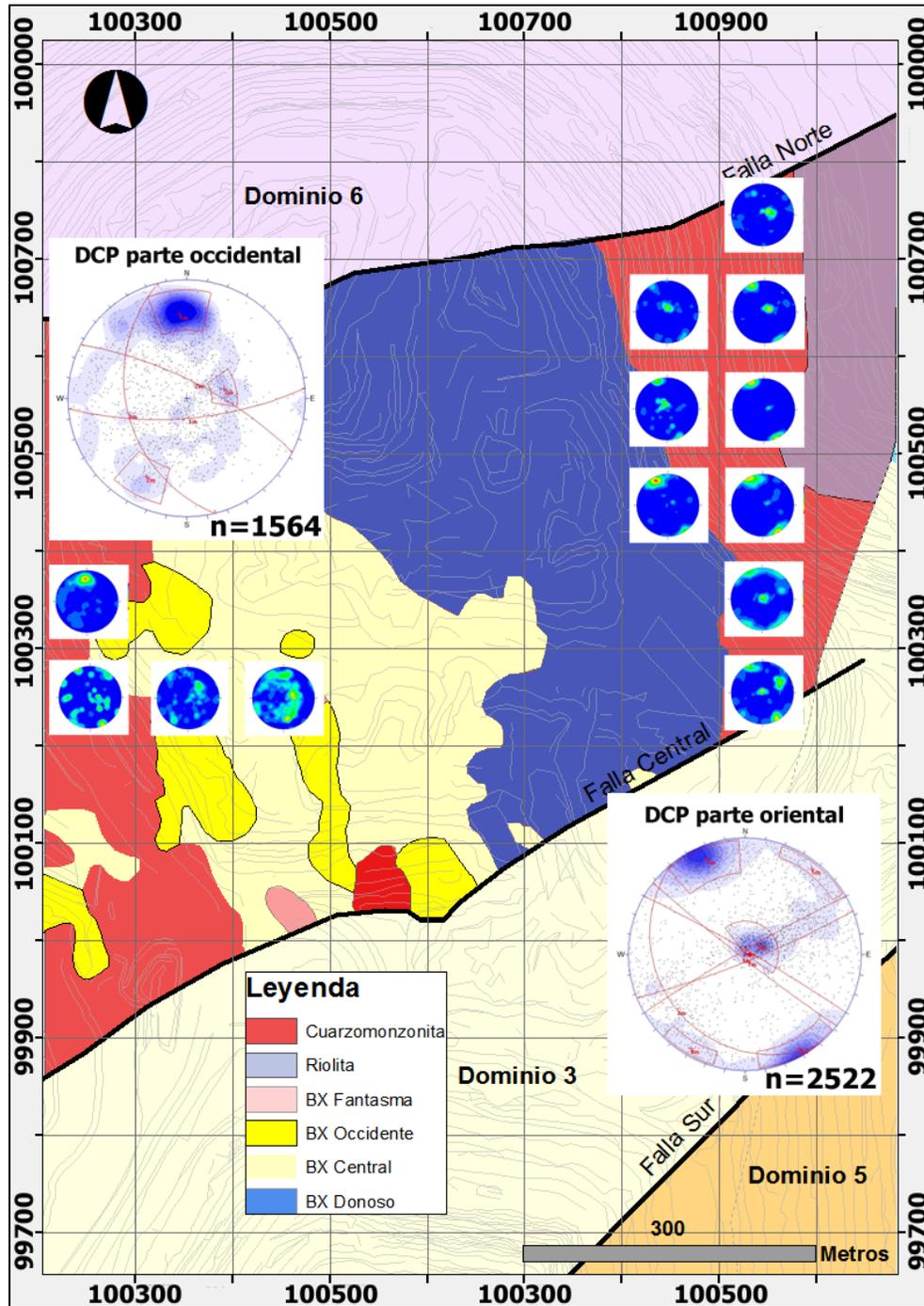


Figura 43: Distribución de celdas de exploración en el dominio 7 y su relación espacial con las litologías. En la figura se observan los dos comportamientos estructurales interpretados en el Dominio 7, en la parte occidental del dominio un comportamiento con fallas de alto ángulo de orientación E-W y NW-SE, y fallas de menor manteo, con orientación NNW-SSE, asociados, y relacionado espacialmente a los afloramientos de Brecha Central y Occidente; y en la parte oriental del dominio un set primario de estructuras sub-verticales de orientación ENE-WSW, junto a su set conjugado, y estructuras sub-horizontales de orientación NW-SE; y un set secundario de estructuras de alto ángulo NW-SE, en donde estos comportamientos se relaciona espacialmente a los afloramientos de cuarzomonzonita del dominio.

Relacionado espacialmente a los afloramientos de Brecha Central y Occidente, los diagramas ubicados en la parte oeste del dominio muestran un comportamiento similar al diagrama de contorno de polos que define el dominio: fallas de alto ángulo de orientación E-W y NW-SE, y fallas de menor manteo, con orientación NNW-SSE.

Por otra parte, en la parte este del dominio, los diagramas de contorno de polos muestran un comportamiento distinto, un *set* primario de estructuras sub-verticales de orientación ENE-WSW, junto a sus *set* conjugados, y de estructuras sub-horizontales de orientación NW-SE; y un *set* secundario de estructuras de alto ángulo NW-SE. Este comportamiento se relaciona espacialmente a los afloramientos de cuarzomonzonita del dominio.

Capítulo 5: Discusión de resultados

El sustento de cualquier modelo geológico es una fuerte base de datos, representativa de la realidad. En específico, las bases de datos estructurales para el desarrollo de un modelo estructural, en la minería a rajo abierto, se constituyen de información proveniente del mapeo de bancos y lo interpretado mediante lectura de sondajes.

En la actualidad, gracias al desarrollo de herramientas geofísicas como el televisor óptico y/o acústico, la información proveniente de sondajes alcanza una gran proporción de la cantidad de datos de una base de datos estructural, generando un impacto directo en la interpretación estructural del macizo de una mina; a modo de ejemplo, la caracterización del Dominio estructural 3 y 4, del Modelo Estructural 2013 de la mina Los Bronces, es prácticamente la interpretación de *sets* vistos sólo en los sondajes, dejando en un segundo plano a la información de mapeo de frentes, debido al menor número de mediciones efectuadas en estas.

El levantamiento remoto, como se observó en este estudio, permite generar un mapeo de frentes de bancos con un fuerte aumento en el registro y distribución de datos, una alta densidad estructural y buen grado de homogeneidad de la información. Estas cualidades aumentaron la cantidad de datos provenientes del mapeo de frentes: en el caso de estudio se logró un crecimiento del 260% de datos de estructuras menores y un 230% de datos de estructuras o fallas mayores. Las características de mapeo realizado, y respectivamente el aumento de información, trajo como consecuencia una actualización de las fallas mayores aflorantes en el rajo; modelación de fallas mayores, y en el futuro también las fallas principales, utilizando información objetiva de largo de trazas y variados puntos de control de orientación - prescindiendo de la interpretación subjetiva del geólogo de la persistencia de la falla en unidades discretas de medida (10 m, 15 m, 20 m, etc) o el efecto de sinuosidad local del plano estructural en la definición total de la orientación - y un acceso a la medición de rasgos estructurales a diferentes escalas permitiendo la determinación de su continuidad espacial; y la validación, en una ventana de mapeo más amplia, de los mapeos de bancos hechos anteriormente en la mina (Dominio estructural 4), observación de nuevos *set* de fallas (Dominio estructural 3 y Dominio estructural 6), y posibilidad de generar una exploración por diagrama de contorno de polos por zonas en las cuales existía incertidumbre de su comportamiento (Dominio estructural 5). En resumen, el levantamiento remoto de frentes de bancos generó un aumento en la influencia de esta fuente en el desarrollo de un modelo estructural: geometría de fallas mayores y definición de dominios estructurales.

Es por esto que el levantamiento remoto se perfila como una herramienta potente en la elaboración de una base de datos estructural; apreciación efectuada sin considerar otras ventajas de la metodología como: i) ser solución complementaria a la falta de condiciones de seguridad en la toma de datos por parte del geólogo, reduciendo la exposición a caída de rocas, y ii) su capacidad de crear un registro físico/digital de la interpretación estructural, permitiendo auditorías, actualizaciones, re-interpretaciones por otro geólogo, labores que no son fácilmente de realizar con un mapeo tradicional.

Sin embargo, se debe considerar, que el mapeo efectuado por levantamiento remoto y la información proveniente de sondajes son de carácter complementario, ya que el mapeo de bancos permite una ventana de observación amplia de una zona de la mina pero es ciego en el registro del comportamiento a niveles profundos y puede inducir a errores debido a que su geometría puede verse afectada por labores propias de la actividad minera, como el efecto de las tronaduras. A su vez, las lecturas estructurales provenientes de sondajes muestran

información en profundidad, pero al ser el sondaje una prospección de carácter local, la interpretación estructural puede verse afectada por variaciones particulares de la mecánica del macizo debido, por ejemplo, a pequeños cambios litológicos, intrusivos, variaciones de permeabilidad secundaria, etc. Considerando lo anterior, ambas fuentes deben tratarse como herramientas adjuntas entre ellas en la creación de una base de datos estructural.

En cuanto al impacto del levantamiento sistemático remoto de datos estructurales en la definición de dominios estructurales, gracias a la información generada en este estudio, se propone incluir en el modelo de dominios estructurales: i) re-definición del límite entre el dominio estructural 4 y 5; ii) re-caracterización del dominio estructural 5 a causa del cambio de límite estructural y aumento de la información del dominio; iii) re-caracterización del dominio estructural 6 a causa de la identificación del *set* primario sub-horizontal y el aumento de la información del dominio; y iv) la división del dominio estructural 7 en dos subdominios estructurales. Para el caso del dominio estructural 1, 3 y 4, no se observan grandes variaciones en su comportamiento. Sin embargo se re-define su caracterización estructural, respecto al Modelo Estructural 2013, debido al aumento de la información disponible.

La observación de un comportamiento estructural similar entre la zona sur-oeste del dominio estructural 5 y el dominio estructural 4, adyacente a esta zona, se propone un nuevo límite estructural entre estos dos, en donde se considere como límite la zona de paso entre la litología de cuarzomonzonita o QM y las brechas. Esta aseveración consigue una solución a la ausencia de un límite claro entre estos dominios. En el desarrollo del Modelo Estructural 2013 se observó un cambio en el comportamiento estructural entre las zonas delimitadas por estos dominios, no obstante, no existía evidencia suficiente para plantear una discontinuidad geológica como límite para los dominios, definiendo una falla principal ciega: Infiernillo 2. Ahora, gracias a la información levantada en este estudio es posible proyectar un límite, un control litológico.

En el caso del dominio estructural 7, se propone su división en dos subdominios: un subdominio 7 occidental formada por un *set* primario de fallas de alto ángulo con una orientación E-W y, dos *set* secundarios de fallas de similar y menor manteo, con orientaciones NW-SE y NNW-SSE, respectivamente; y un subdominio 7 oriental que se caracteriza por un *set* primario de estructuras sub-verticales de orientación ENE-WSW y WNW-ESE, junto a sus *set* conjugados; estructuras sub-horizontales de orientación NW-SE, y un *set* secundario de estructuras NW-SE manteando 65° hacia el SW. Esto a causa del diferente comportamiento de las estructuras notado en la exploración efectuada en este dominio. Cabe resaltar la ausencia de evidencias suficientes para plantear un límite físico, una discontinuidad geológica presente, entre estos dos subdominios, quedando este como un límite inferido, dejando su definición física como un trabajo a futuro.

Dada estos cambios, la (Figura 44) muestra la actualización de los dominios estructurales planteada y se adjunta, en la Tabla 11 y Tabla 12, el resumen de las características de los diagramas de contorno de polos generados para cada dominio.

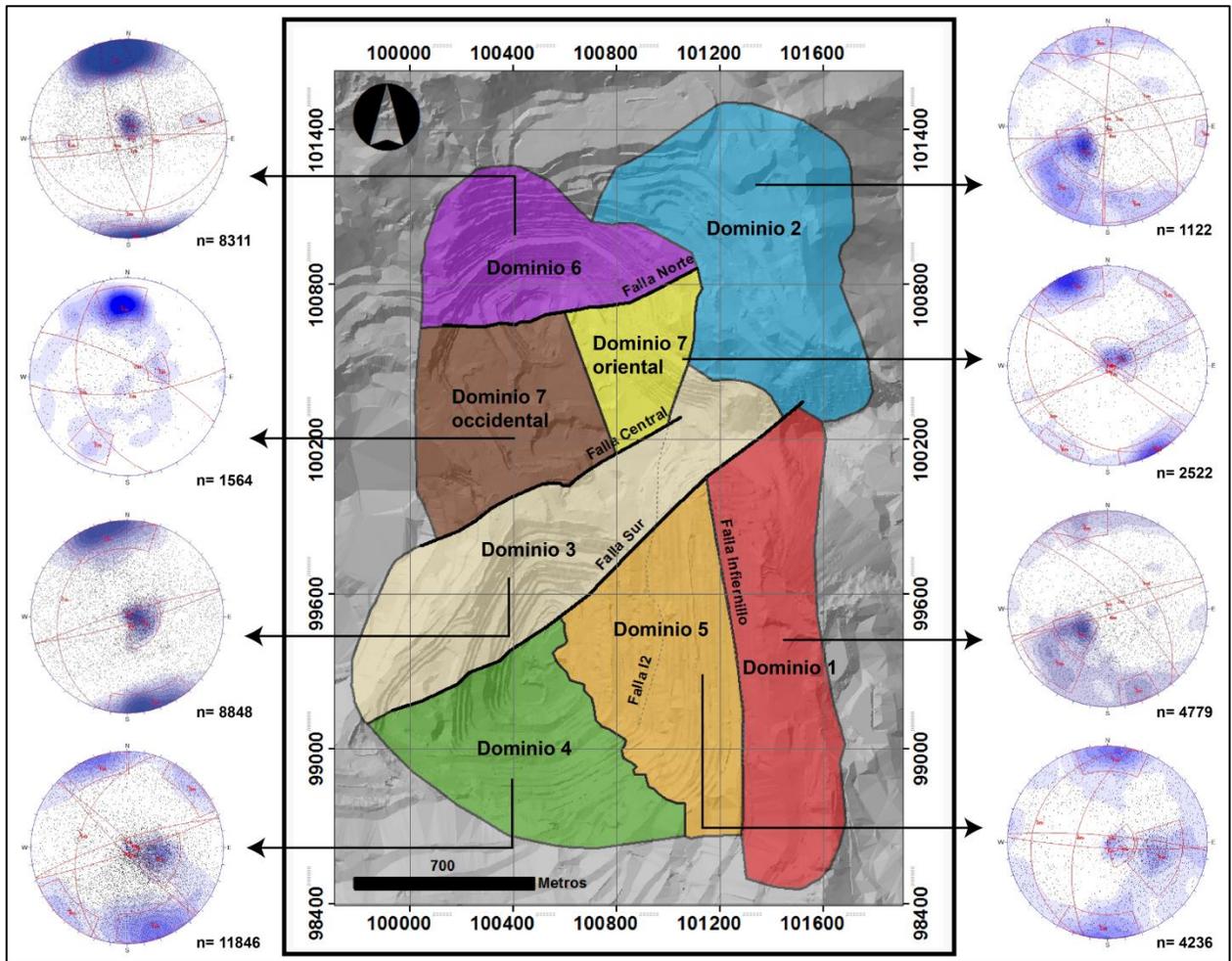


Figura 44: Dominios estructurales propuestos en este estudio. Se observa la re-definición del límite entre el Dominio 4 y 5, la re-interpretación del comportamiento estructural del Dominio 5 y 6, la división de Dominio 7 en dos subdominios: subdominio occidental y oriental, y la validación de la interpretación estructural del Dominio 1, 3, y 4 agregando la información levantada en este estudio. Para el caso del Dominio 2, se conservó el diagrama de contorno de polos definido en el Modelo Estructural 2013, ya que en esta zona no fue posible efectuar un mapeo remoto.

Dominio 1: acotado en su flanco Oeste por la Falla Infiernillo, se caracteriza por presentar un *set* primario de rumbo NW-SE y manteos de $\sim 40^\circ$ y 70° ; y un *set* secundario conjugado de fallas de alto ángulo con una orientación ENE-WSW. Este dominio presenta un control litológico en su definición, ya que se encuentra completamente formado por Andesita.

Dominio 2: se encuentra formado por una familia de fallas de alto ángulo con orientación WNW-ESE y fallas de orientación NNE-SSW. Este dominio, al igual que el dominio Sureste, presenta un control litológico en su definición por la Riolita.

Dominio 3: se caracteriza por la presencia de dos *sets* primarios: uno fallas de alto ángulo con una orientación principal ENE-WSW, con *sets* conjugados; y otro de fallas de bajo ángulo con una disposición NNE-SSW. Se encuentra controlado por fallas que lo limitan tanto por su porción norte como sur, Fallas Central y Sur, respectivamente.

Dominio 4: se encuentra determinado por dos *sets* primarios: fallas de alto ángulo de orientación NE-SW, con sus respectivo *set* conjugados, y fallas de bajo ángulo con una orientación NNE-SSW; también presenta un *set* secundario de fallas de alto ángulo de orientación NW-SE. Este dominio es controlado por la presencia de dos fallas principales: Falla Sur y Falla I2, que lo limitan por el norte y este, respectivamente.

Dominio 5: se definen por un *set* primario de fallas de alto ángulo con orientación prácticamente E-W, y su respectivo conjugado; y *set* secundarios de orientación NNE-SSW con manteos promedios de 15 y 45 grados. Este dominio se encuentra controlado por la presencia de la Falla I2 de orientación N-S.

Dominio 6: se define como un sistema primario formado por fallas sub-verticales de orientación ENE-WSW, con *sets* conjugados, y otras sub-horizontales ($\sim 20^\circ$) y orientación E-W; y un sistema secundario formado por estructuras de menor manteo ($\sim 60^\circ$) y orientación N-S, con *sets* conjugados. Este dominio se encuentra controlado por la presencia de la Falla Norte al sur y en su flanco este por la Riolita.

Dominio 7: Este dominio está controlado por la presencia de dos fallas principales: Falla Norte y Falla Central, limitándolo por el norte y sur, respectivamente. Se divide en dos subdominios:

Subdominio 7 occidental: se caracteriza por un *set* primario de fallas de alto ángulo con una orientación E-W y, dos *set* secundarios de fallas de similar y menor manteo, con orientaciones NW-SE y NNW-SSE; respectivamente.

Subdominio 7 oriental: formado por un *set* primario de estructuras sub-verticales de orientación ENE-WSW y WNW-ESE, junto a sus *set* conjugados; estructuras sub-horizontales de orientación NW-SE, y un *set* secundario de estructuras NW-SE manteniendo 65° hacia el SW.

Tabla 11: Tabla resumen de las características del nuevo DCP para el Dominio 1, 2, 3 y 4. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada *set* definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada *set* respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada *set* normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los *sets*.

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Dominio 1 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 42 | 73 | 81 | 83 | | | |
| | DipDir | 51 | 44 | 341 | 164 | | | |
| | n _{set} | 686 | 434 | 252 | 208 | 3199 | 4779 | |
| | n _{total} | 4779 | | | | | | |
| | Total | 14% | 9% | 5% | 4% | 67% | 100% | |
| | n _{set corr} | 2075 | 1313 | 762 | 629 | 0 | 4779 | |
| | Total _{corr} | 43% | 27% | 16% | 13% | 0% | 100% | |
| Dominio 2 | ID | 1 | 2 | 3 | Otros | Sumas | | |
| | Dip | 80 | 64 | 85 | | | | |
| | DipDir | 190 | 100 | 27 | | | | |
| | n _{set} | 244 | 100 | 41 | 751 | 1136 | | |
| | n _{total} | 1136 | | | | | | |
| | Total | 21% | 9% | 4% | 66% | 100% | | |
| | n _{set corr} | 720 | 295 | 121 | 0 | 1136 | | |
| | Total _{corr} | 63% | 26% | 11% | 0% | 100% | | |
| Dominio 3 | ID | 1 | 2 | 3 | Otros | Sumas | | |
| | Dip | 22 | 82 | 85 | | | | |
| | DipDir | 286 | 164 | 294 | | | | |
| | n _{set} | 1365 | 1428 | 761 | 5294 | 8848 | | |
| | n _{total} | 8848 | | | | | | |
| | Total | 15% | 16% | 9% | 60% | 100% | | |
| | n _{set corr} | 3398 | 3555 | 1895 | 0 | 8848 | | |
| | Total _{corr} | 38% | 40% | 21% | 0% | 100% | | |
| Dominio 4 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas |
| | Dip | 84 | 79 | 84 | 83 | 36 | | |
| | DipDir | 161 | 342 | 225 | 43 | 287 | | |
| | n _{set} | 648 | 1672 | 340 | 525 | 2028 | 6633 | 11846 |
| | n _{total} | 11846 | | | | | | |
| | Total | 5% | 14% | 3% | 4% | 17% | 56% | 100% |
| | n _{set corr} | 1473 | 3799 | 773 | 1193 | 4608 | 0 | 11846 |
| | Total _{corr} | 12% | 32% | 7% | 10% | 39% | 0% | 100% |

Tabla 12: Tabla resumen de las características del nuevo DCP para el Dominio 5 y 6 y los definidos para el subdominio 7 occidental y 7 oriental. En la tabla adjunta se observa el resumen de las características de los diagramas de contorno de polo. Para cada fuente se presenta el Dip y DipDir promedio de cada set definido, la cantidad y porcentaje de polos de cada set respectivo al total de datos, y la cantidad de polos y porcentaje de cada set normativo a la cantidad total de estructuras consideradas en la definición de los sets.

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------------|------|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| Dominio 5 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | Otros | Sumas | |
| | Dip | 83 | 82 | 16 | 55 | | | |
| | DipDir | 183 | 5 | 288 | 284 | | | |
| | n _{set} | 273 | 243 | 187 | 1029 | 2504 | 4236 | |
| | n _{total} | 4236 | | | | | | |
| | Total | 6% | 6% | 4% | 24% | 59% | 100% | |
| | n _{set corr} | 668 | 594 | 457 | 2517 | 0 | 4236 | |
| | Total _{corr} | 16% | 14% | 11% | 59% | 0% | 100% | |
| Dominio 6 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas |
| | Dip | 80 | 87 | 20 | 73 | 63 | | |
| | DipDir | 169 | 208 | 183 | 254 | 86 | | |
| | n _{set} | 2952 | 317 | 495 | 154 | 79 | 4314 | 8311 |
| | n _{total} | 8311 | | | | | | |
| | Total | 36% | 4% | 6% | 2% | 1% | 52% | 100% |
| | n _{set corr} | 6138 | 659 | 1029 | 320 | 164 | 0 | 8311 |
| | Total _{corr} | 74% | 8% | 12% | 4% | 2% | 0% | 100% |
| Dominio 7 occidental | ID | 1 | 2 | 3 | Otros | Sumas | | |
| | Dip | 71 | 73 | 36 | | | | |
| | DipDir | 175 | 27 | 256 | | | | |
| | n _{set} | 205 | 52 | 86 | 1221 | 1564 | | |
| | n _{total} | 1564 | | | | | | |
| | Total | 13% | 3% | 5% | 78% | 100% | | |
| | n _{set corr} | 935 | 237 | 392 | 0 | 1564 | | |
| | Total _{corr} | 60% | 15% | 25% | 0% | 100% | | |
| Dominio 7 oriental | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Otros | Sumas |
| | Dip | 83 | 86 | 16 | 86 | 86 | | |
| | DipDir | 158 | 330 | 231 | 30 | 218 | | |
| | n _{set} | 330 | 150 | 330 | 78 | 104 | 1530 | 2522 |
| | n _{total} | 2522 | | | | | | |
| | Total | 13% | 6% | 13% | 3% | 4% | 61% | 100% |
| | n _{set corr} | 839 | 381 | 839 | 198 | 264 | 0 | 2522 |
| | Total _{corr} | 33% | 15% | 33% | 8% | 10% | 0% | 100% |

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

1. El presente trabajo documenta el aporte del método de levantamiento remoto de estructuras, como una herramienta complementaria relevante, en la generación de modelos estructurales en la minería a rajo abierto.
2. El método de levantamiento indirecto por fotogrametría genera información con grados de exactitud y precisión aceptables dentro de parámetros definidos. Esta técnica, permite levantar una serie de puntos de control creando una medición más realista de la orientación, debido a que considera su ondulación completa y no una singularidad dentro de su traza, y evita un registro truncado de las persistencias, permitiendo incluso una modelación vectorial de las estructuras mayores y principales. A su vez, es capaz de generar un aumento considerable en la cantidad de estructuras mapeadas en bancos en un periodo de tiempo eficiente; para ilustrar esto, en este caso y comparando con la base de datos de bancos hasta el 2013, se triplicó la información de mapeo de bancos en un periodo de seis meses: un décimo de tiempo empleado en las campañas de mapeo de bancos utilizadas en el desarrollo del Modelo Estructural 2013.
3. El método permite establecer un registro permanente de datos estructurales, los que son posibles de ser auditados y/o re-mapeados, permitiendo unificar criterios y mejorar las condiciones para una futura actualización de cualquier modelo estructural. Además, su capacidad de obtener información a distancia presenta una fuerte ventaja comparativa frente al mapeo tradicional: mejora las condiciones de seguridad en la toma de datos - el operador se sitúa en una zona lejos del tráfico y caída de rocas- y elimina posibles interferencias en la medición de estructuras producidas por cuerpos magnéticos.
4. El aumento de datos permite un mapeo de bancos con una buena distribución: homogéneo, amplio, y de mayor resolución; generando un impacto directo en el conocimiento estructural del macizo, y por consiguiente, la caracterización de dominios estructurales. Esto reduce de manera importante la incertidumbre del modelo y permite tomar decisiones de diseño más óptimas (seguridad y costo).
5. Dentro de los efectos vistos, destaca el mapeo del *set* de estructurales sub-horizontales ($\sim 20^\circ$) y orientación E-W en el Dominio 6. Interpretado como un *set* primario y ampliamente reconocido en la cara norte de Donoso, se insta a considerar este *set* dentro de la caracterización estructural, tal como se muestra en la discusión realizada.
6. Simultáneamente, se evidenció que el Dominio 5 presenta una heterogeneidad en la distribución de estructuras, pero que es posible distinguir dentro del el dos sectores de comportamiento homogéneo: (I) uno ubicado en su parte oeste, relacionado espacialmente a la cuarzomonzonita, con un comportamiento estructural similar al Dominio 4, por ende, se propone incorporar este sector al Dominio 4 y dejar como límite con el dominio 5 el contacto litológico entre Qm-Brechas, (II) y uno ubicado en la zona este, relacionado espacialmente a la Brecha Infiernillo, y abarcando gran parte de la pared de Infiernillo, mostrando fallas de alto ángulo con orientación ESE-WNW y su respectivo conjugado; y un *set* de estructuras de orientación NNE-SSW con manteos promedios de 15 y 45 grados. Se insta a considerar la actualización mostrada en la discusión realizada.

7. Así mismo, el Dominio 7 presenta dos áreas con distinto comportamiento, opuestas espacialmente y sin un límite definido, por lo que se propone que este dominio se subdivida en dos subdominios: un sub-dominio occidente, asociado a la Brecha Occidental y Central, con fallas de alto ángulo con una orientación E-W y NW-SE, y fallas de menor manteo, con orientaciones NNW-SSE; y un sub-dominio oriental caracterizado por un *set* primario de estructuras sub-verticales de orientación ENE-WSW, junto a sus *set* conjugados, y estructuras sub-horizontales de orientación NW-SE; y un *set* secundario de estructuras de alto ángulo NW-SE.
8. Finalmente se recomienda: (I) generar nuevas campañas de validación geométrica del método, considerando mayor cantidad de datos, y en particular, de estructuras sub-horizontales; (II) generar una campaña de verificación de puntos espaciales contenidos en la traza de estructuras mayores y principales; (III) continuar con la metodología de mapeo vertical inédita de este estudio; (IV) considerar nuevas campañas de levantamiento remoto en partes con baja resolución de estructuras mapeadas - parte alta de Infiernillo, pared norte- superior de Donoso, y en la zona norte y sur del rajo F5SW - debido a propiedades geológicas intrínsecas del macizo, como su textura (Sturzenegger *et al.*, 2009) y/o frecuencia de fracturas; o a causas humanas, como el inadecuado lugar de toma de fotografía, escasa exposición a la luz, alta cantidad de polvo en el aire y/o alto tránsito de vehículos; y (V) considerar la adquisición sistemática de datos por medio de la repetición de medidas en el tiempo como una herramienta de monitoreo temporal de la deformación de los taludes asociada al desarrollo de la mina (respuesta del diseño y tronadura).

Bibliografía

- **Armijo, R.; Rauld, R.; Thiele, R.; Vargas, G.; Campos, J.; Lacassin, R.; Kausel, E. 2010.** The West Andean Thrust (WAT), the San Ramón Fault and the seismic hazard for Santiago (Chile). *Tectonics*: 29, TC2007, doi: 10.1029/2008TC002427.
- **Aguirre, L. 1960.** Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. *Inst. Inv. Geol.*, 9: 1- 70, Santiago de Chile.
- **Beccar, I., Vergara, M., Munizaga, F. 1986.** Edades K-Ar de la Formación Farellones, en el cordón del cerro La Parva, Cordillera de los Andes de Santiago, Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 28-29, p. 109-113.
- **Carrizo D., 2010.** Modelo estructural sector Tunel Sur Los Bronces. Estudio encargado por Los Bronces- AngloAmerican Exploraciones Chile.
- **Carrizo D., Comte D., Silva W., 2012.** Estructura del distrito cercano Los Bronces, Anglo American Chile: Tectónica y Tomografía sísmica. Estudio desarrollado para la Unidad de Desarrollo de Proyectos de AngloAmerican Chile
- **Carrizo, D., Barros, C. & Gallardo, S. 2013.** Modelo Estructural 3D de la Mina Los Bronces, Anglo American Sur S.A. (Chile). Informe interno, pp. 31-66.
- **Carrizo, D., Barros, C.; Castro; J. 2014.** Validación y actualización del Modelo Estructural de la mina Los Bronces: Modelo de Dominios Estructurales, Fallas Principales y Mayores, Anglo American Sur S.A. (Chile).
- **Cerda, R. 2006.** Informe proyecto piloto SIROVISION, evaluación de resultados, Anglo American Chile - MantoVerde . Datamine Chile.
- **Cepeda, A. 1976.** Geología Económica y Evaluación del Área Andina - Disputada. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago. 40 pp.
- **Charrier R. & Munizaga F. 1979.** Edades K–Ar de vulcanitas cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal (34°15' de latitud Sur), *Revista Geológica de Chile* 7, 1979, 41 – 51.
- **Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J.J., Gans, P., Kay, S.M., Muñoz, N., Wyss, A.R. y Zurita, E., 2002.** Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slabsegment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Science* 15, p. 117-139.
- **Coggan, J.S., Wetherelt, A., Gwynn, X.P. & Flynn, Z.N. 2007.** Comparison of hand-mapping with remote data captures systems for effective rock mass characterization. Camborne School of Mines, University of Exeter.
- **Contreras, A. 2003.** Geología Sondajes Profundos en la Mina Los Bronces. Informe Interno de la Compañía Minera Anglo American Chile. Superintendencia de Geología. División Los Bronces. 38 pp.

- **Deckart, K., Clark, A.H., Aquilar, C., and Vargas, R., .2005.** Magmatic and hydrothermal chronology of the supergiant Rio Blanco porphyry copper deposit, central Chile: Implications of an integrated U-Pb and 40Ar-39Ar database: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 100, p. 905–934.
- **Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J., Comte, D. 2008.** Late Miocene high and rapid Surface uplift and its erosional response in the Andes of Central Chile (33°-35°S). *Tectonics* 27: TC1005. doi: 10.1029/2006TC002046.
- **Frikken, P., Cooke, DR., Walshe, JL., Archibald, DA., Skarmeta, J., Serrano, L., Vargas, R. (2005).** Mineralogical and Isotopic Zonation in the Sur-Sur Tourmaline Breccia, Rio Blanco-Los Bronces Cu-Mo Deposit, Chile: Implications for Ore Genesis. *Economic Geology*, 100 (5). pp. 935-961. ISSN 0361-0128
- **Gaich, A., Pötsch, M. & Schubert, W. 2006a.** Acquisition and assessment of geometric rock mass features by true 3D images. In *ARMA Golden Rocks 2006*, Golden, Colorado, 17-21 June 2006, Paper 06-1051.
- **Gaich,A. & Pötsch, M. 2012.** Recent developments in the application of 3D imaging for Tunnelling. 3G Software & Measurement GmbH, Austria Wulf Schubert, Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Graz University of Technology, Austria.
- **Irrarázaval, V., Sillitoe, R.H., Wilson, A., Toro, J.C., Robles, W. & Lyall, G. 2010.** Discovery history of a giant, high-grade, hypogene porphyry copper-molybdenum deposit at Los Sulfatos, Los Bronces-Rio Blanco District, Central Chile. *Society of Economic Geologists, Special Publication 15*, p. 253-269.
- **Klohn, C. 1960.** Geología de la Cordillera de Los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 8, p. 1-95.
- **Latorre, J. 1981.** La formación Río Blanco en el área de la mina Andina. Memoria Depto. Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, U. de Chile.
- **Maksaev, V., Munizaga F., et al. 2009.** “Fission track thermochronology of Neogene plutons in the Principal Andean Cordillera of central Chile (33-35 degrees S): Implications for tectonic evolution and porphyry Cu-Mo mineralization.” *Andean Geology* 36(2): 153-171.
- **Primer Taller Geotécnico Interdivisional, 1997.** Estándares para la caracterización geotécnica de rocas, estructuras y macizos rocosos. División Chuquicamata, Codelco-Chile. 244 pp.
- **Piquer, J., Skarmeta, J. 2012.** Structural controls on stratigraphy magmatism and mineralization in the Rio Blanco-Los Bronces district, Central Chile. En Congreso Geológico Chileno, 13o, Antofagasta, Chile, 05-09 Agosto 2012: pp.19-21
- **Pötsch, M. y Gamboa, C. 2009.** La aplicación del sistema ShapeMetriX3D en túneles y estructuras subterráneas y su uso para la cartografía geológica e ingeniería de rocas.

- **Rivano S., Godoy E., Vergara M., Villarroel R. 1990.** Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32°–34°S), *Revista Geológica de Chile* 17, 1990, 205 – 214.
- **Serrano, L., Vargas, R., Stambuk, V., Aguilar, C., Galeb, M., Holmgren, C., Contreras, A., Goday, S., Vela, I., Skewes, M.A., and Stern, C.R., 1996.** The Late Miocene to Early Pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes, in Camus, F., Sillitoe, R.H., and Petersen, R., eds., *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, style and metallogeny*: Society of Economic Geologists Special Publication no. 5, p. 119–130.
- **Stern, C.R. 2004.** Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 31, No. 2, p. 161-206.
- **Sturzenegger, M., Stead, D. 2009a.** Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*.
- **Sturzenegger, M., Stead, D. 2009b.** Long-range terrestrial digital photogrammetry for discontinuity characterization at Parabola open-pit mine. 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009.
- **Sturzenegger, M., Stead, D. 2009c.** Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- **Thiele, R. 1980.** Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 29, 21p.
- **Toro J. C. et al., 2012.** Protracted Magmatic-Hydrothermal History of the Río Blanco-Los Bronces District, Central Chile: Development of World's Greatest Known Concentration of Copper, *Economic Geology*.
- **Vergara, M.; Drake, R. 1979.** Edades K/Ar en secuencias volcánicas continentales postneocomianas de Chile Central; su depositación en cuencas intermontanas restringidas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol 34, p. 42_52.
- **Yáñez, G.; Cembrano, J.; Pardo, M.; Ranero, C.; Selles, D. 2002.** The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca-Andean subduction system at 33-34°S: geodynamic evidence and implications. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 15, p. 23-38.
- **Warnaars, F., Holgrem, C. y Barassi, S. 1985.** Porphyry Copper and Tourmaline Breccias at Los Bronces, Chile. *Society of Economic Geologists*. Vol. 80. p. 1544-1565.
- **Weir, FM 2012.** 'The future of structural data from boreholes', ANZ 2012, Melbourne, July 2012.

Anexo A

Resumen de las características estructurales para cada dominio estructural definido en el Modelo Estructural de la mina Los Bronces

Tabla 13: Tabla resumen de las características estructurales de los dominios

| Dominios | Tipos | N Total | N Set | Set | Set | | Fisher's Kw | 1º corner | | 2º corner | |
|--------------------------------------|-------|---------|-------|-----|-----|-----|-------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | | | | Dip | Dir | | Trend | plunge | Trend | plunge |
| 1 Sureste Fma: Infiernillo | | 87 | 11 | 1 | 45 | 274 | 141.98 | 75 | 58 | 110 | 34 |
| | | | 14 | 2 | 82 | 338 | 154.26 | 147 | 15 | 168 | 1 |
| | | | 4 | 3 | 86 | 164 | 147.706 | 329 | 1 | 351 | 10 |
| | | | 4 | 4 | 35 | 47 | 888.003 | 200 | 61 | 247 | 49 |
| 1 Sureste Fme: Infiernillo | | 3676 | 516 | 1 | 36 | 50 | 463.578 | 197 | 67 | 259 | 40 |
| | | | 154 | 2 | 76 | 44 | 659.611 | 139 | 13 | 170 | 2 |
| | | | 171 | 3 | 82 | 334 | 68.949 | 328 | 1 | 353 | 18 |
| | | | 144 | 4 | 81 | 161 | 988.206 | 3 | 1 | 30 | 8 |
| | | | 51 | 5 | 86 | 196 | 897.477 | 208 | 20 | 240 | 8 |
| | | | 40 | 6 | 85 | 276 | 197.006 | 88 | 11 | 104 | 1 |
| 1 Sureste Fme+Fma: Infiernillo | | 3763 | 488 | 1 | 37 | 51 | 519.924 | 139 | 17 | 171 | 1 |
| | | | 174 | 2 | 75 | 43 | 558.814 | 330 | 1 | 31 | 13 |
| | | | 259 | 3 | 81 | 335 | 600.914 | 90 | 11 | 104 | 1 |
| | | | 234 | 4 | 83 | 177 | 212.619 | 206 | 69 | 255 | 39 |
| | | | 32 | 5 | 85 | 277 | 259.292 | 206 | 21 | 241 | 9 |
| 2 Noreste Fma : Riolita | | 26 | 9 | 1 | 84 | 202 | 161.378 | 8 | 1 | 33 | 15 |
| | | | 3 | 2 | 82 | 173 | 825.756 | 345 | 1 | 5 | 14 |
| 2 Noreste Fme : Riolita | | 1110 | 341 | 1 | 77 | 188 | 295.954 | 343 | 1 | 34 | 27 |
| | | | 62 | 2 | 85 | 24 | 498.736 | 182 | 10 | 222 | 1 |
| | | | 61 | 3 | 67 | 100 | 461.667 | 257 | 32 | 300 | 15 |
| 2 Noreste Fme+Fma : Riolita | | 1136 | 244 | 1 | 80 | 190 | 449.394 | 353 | 1 | 32 | 20 |
| | | | 100 | 2 | 65 | 98 | 31.409 | 253 | 38 | 301 | 13 |
| | | | 41 | 3 | 85 | 28 | 119.016 | 195 | 10 | 220 | 1 |
| 3 Dominio Central : Fma | | 223 | 45 | 1 | 84 | 155 | 809.728 | 321 | 0 | 350 | 14 |
| | | | 26 | 2 | 83 | 339 | 843.574 | 143 | 12 | 169 | 1 |
| | | | 8 | 3 | 55 | 306 | 127.588 | 114 | 39 | 137 | 29 |
| | | | 10 | 4 | 75 | 182 | 473.992 | 354 | 8 | 10 | 20 |
| 3 Dominio Central : Fme | | 5719 | 577 | 1 | 83 | 168 | 499.451 | 330 | 1 | 9 | 15 |
| | | | 398 | 2 | 83 | 346 | 626.518 | 147 | 15 | 182 | 1 |
| | | | 42 | 3 | 83 | 67 | 355.95 | 243 | 12 | 251 | 0 |
| | | | 568 | 4 | 24 | 287 | 622.619 | 74 | 81 | 139 | 53 |
| 3 Dominio Central : Fme+Fma | | 5942 | 590 | 1 | 83 | 166 | 52.532 | 327 | 1 | 6 | 13 |
| | | | 420 | 2 | 83 | 345 | 605.581 | 145 | 14 | 181 | 1 |
| | | | 34 | 3 | 83 | 66 | 449.88 | 243 | 11 | 250 | 2 |
| | | | 692 | 4 | 20 | 283 | 525.299 | 53 | 84 | 148 | 59 |

| Dominios | Tipo | N Total | N Set | Set | Set | | Fisher's Kw | 1º corner | | 2º corner | |
|--|------|---------|----------|-----|-----|-----|-------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | | | | Dip | Dir | | Trend | plunge | Trend | plunge |
| 4 Dominio Sur : Fma | | 179 | 8 | 1 | 86 | 326 | 164.837 | 132 | 13 | 161 | 1 |
| | | | 18 | 2 | 81 | 3 | 899.956 | 167 | 18 | 194 | 1 |
| | | | 11 | 3 | 86 | 148 | 715.571 | 311 | 1 | 343 | 9 |
| | | | 16 | 4 | 81 | 182 | 845.221 | 349 | 0 | 12 | 19 |
| 4 Dominio Sur : Fme | | 9016 | 143 3 | 1 | 35 | 281 | 39.747 | 77 | 79 | 124 | 37 |
| | | | 93 8 | 2 | 80 | 342 | 454.965 | 141 | 19 | 182 | 1 |
| | | | 22 3 | 3 | 83 | 49 | 114.952 | 218 | 15 | 241 | 1 |
| | | | 31 9 | 4 | 85 | 164 | 629.431 | 326 | 1 | 3 | 10 |
| | | | 93 | 5 | 85 | 227 | 102.209 | 34 | 2 | 61 | 8 |
| 4 Dominio Sur : Fme+Fma | | 9195 | 33 7 | 1 | 85 | 163 | 651.343 | 326 | 1 | 0 | 11 |
| | | | 13 62 | 2 | 36 | 282 | 46.887 | 71 | 68 | 130 | 41 |
| | | | 99 6 | 3 | 80 | 341 | 43.832 | 140 | 20 | 180 | 1 |
| | | | 10 7 | 4 | 86 | 227 | 107.65 | 34 | 1 | 60 | 8 |
| | | | 29 2 | 5 | 82 | 47 | 834.287 | 213 | 16 | 240 | 1 |
| 5 Domino Centro-Sur : Fma | | 99 | 3 | 1 | 86 | 123 | 912.579 | 284 | 1 | 315 | 7 |
| | | | 3 | 2 | 70 | 276 | 281.837 | 87 | 23 | 104 | 9 |
| | | | 4 | 3 | 87 | 306 | 71.664 | 106 | 8 | 137 | 2 |
| | | | 8 | 4 | 83 | 48 | 451.737 | 207 | 14 | 244 | 1 |
| | | | 4 | 5 | 87 | 210 | 491.313 | 11 | 1 | 45 | 5 |
| 5 Domino Centro-Sur : Fme | | 899 | 25 | 1 | 86 | 101 | 148.256 | 27 | 1 | 295 | 10 |
| | | | 15 | 2 | 84 | 72 | 321.192 | 243 | 12 | 259 | 1 |
| | | | 37 | 3 | 84 | 276 | 718.061 | 81 | 14 | 112 | 1 |
| | | | 22 | 4 | 85 | 229 | 331.568 | 43 | 1 | 58 | 9 |
| | | | 41 | 5 | 78 | 301 | 163.707 | 114 | 18 | 132 | 3 |
| 5 Domino Centro-Sur : Fme+Fma | | 998 | 37 | 1 | 83 | 275 | 756.245 | 81 | 14 | 111 | 2 |
| | | | 23 | 2 | 85 | 102 | 203.844 | 271 | 1 | 292 | 10 |
| | | | 77 | 3 | 80 | 305 | 725.035 | 113 | 20 | 139 | 1 |
| | | | 85 | 4 | 82 | 57 | 260.562 | 208 | 15 | 258 | 1 |
| | | | 31 | 5 | 85 | 231 | 171.164 | 42 | 1 | 60 | 12 |

| Dominios | Tipos | N Total | N Set | Set | Set | | Fisher's Kw | 1º corner | | 2º corner | |
|--|-------|---------|-------|-----|-----|-----|-------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | | | | Dip | Dir | | Trend | plunge | Trend | plunge |
| 6 <i>Dominio Norte : Fma</i> | | 73 | 16 | 1 | 83 | 196 | 205.273 | 7 | 1 | 24 | 15 |
| | | | 26 | 2 | 80 | 152 | 45.498 | 314 | 1 | 351 | 20 |
| 6 <i>Dominio Norte : Fme</i> | | 5282 | 1370 | 1 | 81 | 173 | 689.631 | 337 | 1 | 9 | 17 |
| | | | 200 | 2 | 87 | 356 | 823.904 | 158 | 7 | 190 | 1 |
| | | | 66 | 3 | 63 | 256 | 142.37 | 67 | 35 | 85 | 18 |
| | | | 117 | 4 | 66 | 91 | 843.908 | 256 | 34 | 284 | 14 |
| 6 <i>Dominio Norte : Fme+Fma</i> | | 5355 | 1229 | 1 | 81 | 172 | 932.626 | 340 | 1 | 5 | 18 |
| | | | 141 | 2 | 87 | 355 | 120.843 | 162 | 5 | 187 | 1 |
| | | | 43 | 3 | 66 | 91 | 272.952 | 265 | 30 | 276 | 18 |
| 7 <i>Dominio Centro-Norte : Fma</i> | | 144 | 13 | 1 | 85 | 158 | 123.015 | 322 | 1 | 349 | 9 |
| | | | 3 | 2 | 88 | 331 | 39.42 | 138 | 9 | 169 | 1 |
| 7 <i>Dominio Centro-Norte : Fme</i> | | 2018 | 237 | 1 | 72 | 175 | 604.814 | 339 | 4 | 10 | 32 |
| | | | 35 | 2 | 81 | 29 | 156.323 | 199 | 17 | 218 | 3 |
| | | | 74 | 3 | 61 | 59 | 655.176 | 225 | 42 | 253 | 18 |
| | | | 25 | 4 | 41 | 265 | 338.196 | 75 | 53 | 95 | 44 |
| 7 <i>Dominio Centro-Norte : Fme+Fma</i> | | 2132 | 191 | 1 | 73 | 176 | 828.146 | 344 | 5 | 9 | 28 |
| | | | 38 | 2 | 81 | 29 | 151.578 | 199 | 17 | 217 | 3 |
| | | | 78 | 3 | 60 | 59 | 632.448 | 225 | 18 | 252 | 46 |
| | | | 29 | 4 | 38 | 263 | 262.693 | 72 | 47 | 93 | 56 |

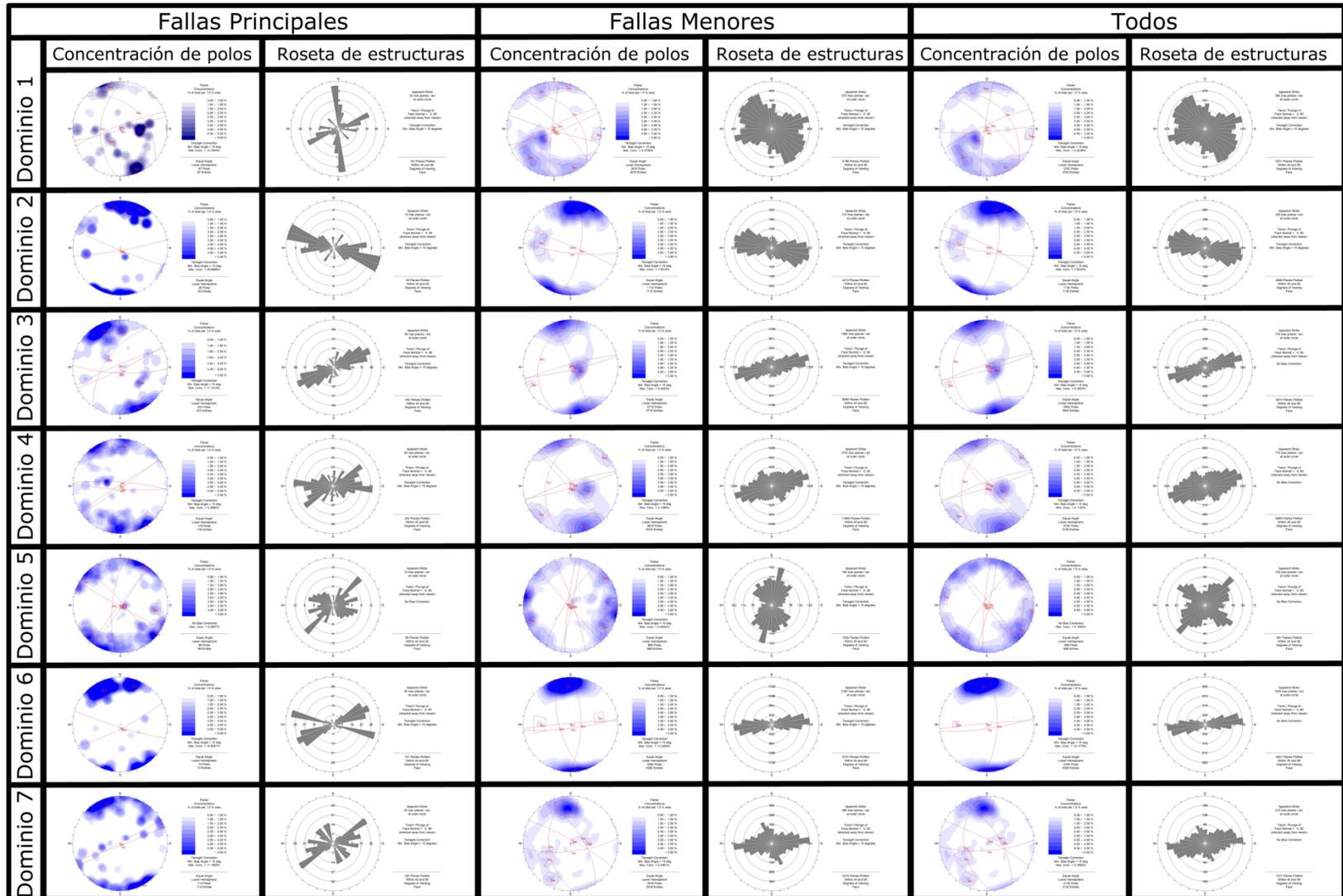


Figura 45: Diagrama de contorno de polos y rosetas de cada dominio definido en el Modelo Estructural 2013. En la figura se presenta el DCP para las estructuras mayores, menores y estructuras mayores + menores, este último, el DCP característico de cada dominio.