



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



**“Revisión y actualización de dominios estructurales para
Mina Candelaria Subterránea con validación de software
GeoREC”**

Memoria para optar al título de Geólogo

Lucía Elena Díaz Mangas

Profesor Patrocinante:	Msc. Abraham Elías González Martínez
Profesionales Guías:	Ms. Pablo Cesar Escares Báez
	Ms. Mario Andrés Guerrero Salvador
Profesores Comisión:	Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra
	Msc. Liubow Nikolaivna González Martínez

Concepción, agosto 2024

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS.	1
1.1.1. Objetivo General	1
1.1.2. Objetivos Específicos	1
1.2. UBICACIÓN, ACCESOS Y OTROS	1
1.3. ANTECEDENTES GENERALES	3
1.3.1. Método de explotación	3
1.4. AGRADECIMIENTOS	4
2. MARCO GEOLÓGICO	6
2.1. GEOLOGÍA REGIONAL	6
2.1.1. Rocas estratificadas	6
2.1.2. Rocas intrusivas	10
2.2. GEOLOGÍA DEL DISTRITO CANDELARIA-PUNTA DEL COBRE	11
2.2.1. Litología	12
3. BASE DE DATOS	14
3.1. PRESENTACIÓN	14
3.2. DESCRIPCIÓN	14
3.3. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN ESTRUCTURAL	15
4. METODOLOGÍA DOMINIOS ESTRUCTURALES	19
4.1. REVISIÓN DE DOMINIOS PRE-DEFINIDOS	19
4.2. NUEVOS ANTECEDENTES DE GEOREC Y TEÓRICOS	25
4.2.1. Actualización GeoRec	25
4.3. METODOLOGÍA PARA ACTUALIZACIÓN DE DOMINIOS	28
5. RESULTADOS	32
5.1. BASE DE DATOS	32
5.2. DOMINIOS ESTRUCTURALES GEOTÉCNICOS	32

5.3. VALIDACIÓN SOFTWARE	34
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
7. REFERENCIAS	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación Minera Candelaria y Ojos del Salado.	2
1. 2. Método de explotación Sub Level Stopping (SLS).	4
2. 1. Mapa esquemático geológico y ubicación.	12
3. 1. Ingreso comando Cotas en AutoCAD.	15
3. 2. Todos los elementos de la selección serán identificados.	16
3. 3. Visualización plataforma GeoRec para ingreso de cotas.	16
3. 4. Visualización plataforma GeoRec para registro de plano.	17
3. 5. Visualización plataforma GeoRec con el resultado del reconocimiento.	17
3. 6. Visualización final del resultado arrojado por GeoRec.	18
4. 1. Fallas controladoras principales de Alcaparrosa.	20
4. 2. Zonas pertenecientes a los 3 dominios estructurales de Alcaparrosa.	20
4. 3. Zonas pertenecientes a los 3 dominios estructurales de Santos.	21
4. 4. Zonas pertenecientes a los 3 dominios estructurales de Candelaria Norte.	22
4. 5. Franjas NS en Candelaria Norte	22
4. 6. Dominios en Candelaria Sur	23
4. 7. Dominios 7, 8 y 9 del rajo, sobre Dominios de Candelaria Norte UG.	24
4. 8. Grilla de Rosetas	26
4. 9. Informe Levantamiento Estructural.	27
4.10. Ejemplo de trabajo visual.	29
4.11. Resumen del análisis en vertical para observar influencia de la litología.	29
4.12. Dominios del Rajo con Dominios Candelaria Norte UG.	30
4.13. Nuevos dominios estructurales geotécnicos.	31

5. 1.	Información de fallas para cada dominio estructural.	34
5. 2.	Información de diaclasas para cada dominio estructural.	35
5. 3.	Resumen gráfico de los dominios con su ubicación y orientaciones preferenciales en las fallas.	36
5. 4.	Resumen gráfico de los dominios con su ubicación y orientaciones preferenciales en las fallas.	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página	
4.1.	Criterio para diferenciación de fallas.	19
5.1.	Resumen planos y elementos de la base de datos, por mina.	32
5.2.	Elementos utilizables para análisis en Candelaria Norte UG.	33
5.3.	Resumen información de dominios para Diaclasas.	33
5.4.	Resumen información de dominios para Fallas.	33

RESUMEN

Minera Candelaria, ubicada en la comuna de Tierra Amarilla y propiedad de Lundin Mining, posee actividad tanto del rajo como de subterránea. Es esta última, la que se encuentra dividida en dominios estructurales, sin contar con una base de datos estructurada de respaldo.

El Área de Geotecnia de Minera Candelaria propone actualizar estos dominios, para lo que se cuenta con los mapeos realizados en 2021 y 2022 con 30 planos, con unos 34.000 elementos entre fallas y diaclasas.

Para poder obtener una base de datos utilizable para la actualización, se consigna la realización de un software específico a cargo de Hibring, llamado GeoRec, el cuál extrae la información de las estructuras desde los planos CAD a archivos xls, trabajo que anteriormente se realizaba a mano, con una gran cantidad de horas-hombre invertidas. Posteriormente, se aumenta la utilidad de GeoRec obteniendo informes estructurales y diagramas de rosetas, a partir de los cuales se puede obtener la información para determinar los dominios estructurales.

Candelaria UG queda finalmente dividida en 5 nuevos dominios estructurales, derivados del análisis de la información tanto del rajo como de la subterránea. Se recomienda mantener actualizada la base de datos ya que, con el software validado, el proceso de actualización se reduce de semanas a minutos.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el programa de memoristas 2022 de la Compañía Contractual Minera Candelaria y busca la determinación de orientaciones preferenciales, con el objetivo de poder realizar más y mejores recomendaciones respecto al diseño geotécnico para galerías y caserones de las 3 minas subterráneas que opera el consorcio, las cuales son Mina Candelaria UG, Mina Santos y Mina Alcaparrosa, las dos últimas operadas bajo el nombre de Ojos del Salado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Validación Software y actualización de dominios estructurales en Mina Candelaria Norte UG.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Validación del software GeoRec.
- Creación de una base de datos de las estructuras de las 3 minas del distrito Candelaria, a través de la puesta en marcha del software GeoRec.
- Actualización de dominios estructurales en Mina Candelaria UG, a partir de los productos de GeoRec, generando una metodología para el desarrollo del trabajo.

1.2 UBICACIÓN, ACCESOS Y OTROS

El Complejo Minero Candelaria Cooper Mining, que opera las minas Candelaria UG a través de Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC), además de Santos y Alcaparrosa a través de Compañía Contractual Minera Ojos del Salado (Ojos del Salado), se ubica en la Región de Atacama, en la comuna de Tierra Amarilla, aproximadamente 20 kilómetros al Sur de Copiapó, y a 650 kilómetros al Norte de Santiago (Figura 1.1A.).

Las faenas son de fácil acceso usando caminos públicos, ya sea desde la Ruta 5 Norte, Copiapó o Tierra Amarilla (Figura 1.1.B). Las minas se encuentran cercanas al radio urbano de esta última comuna, con Candelaria UG y Alcaparrosa en el sector Oeste del Río Copiapó, y Santos en el lado Este (Figura 1.1.C).

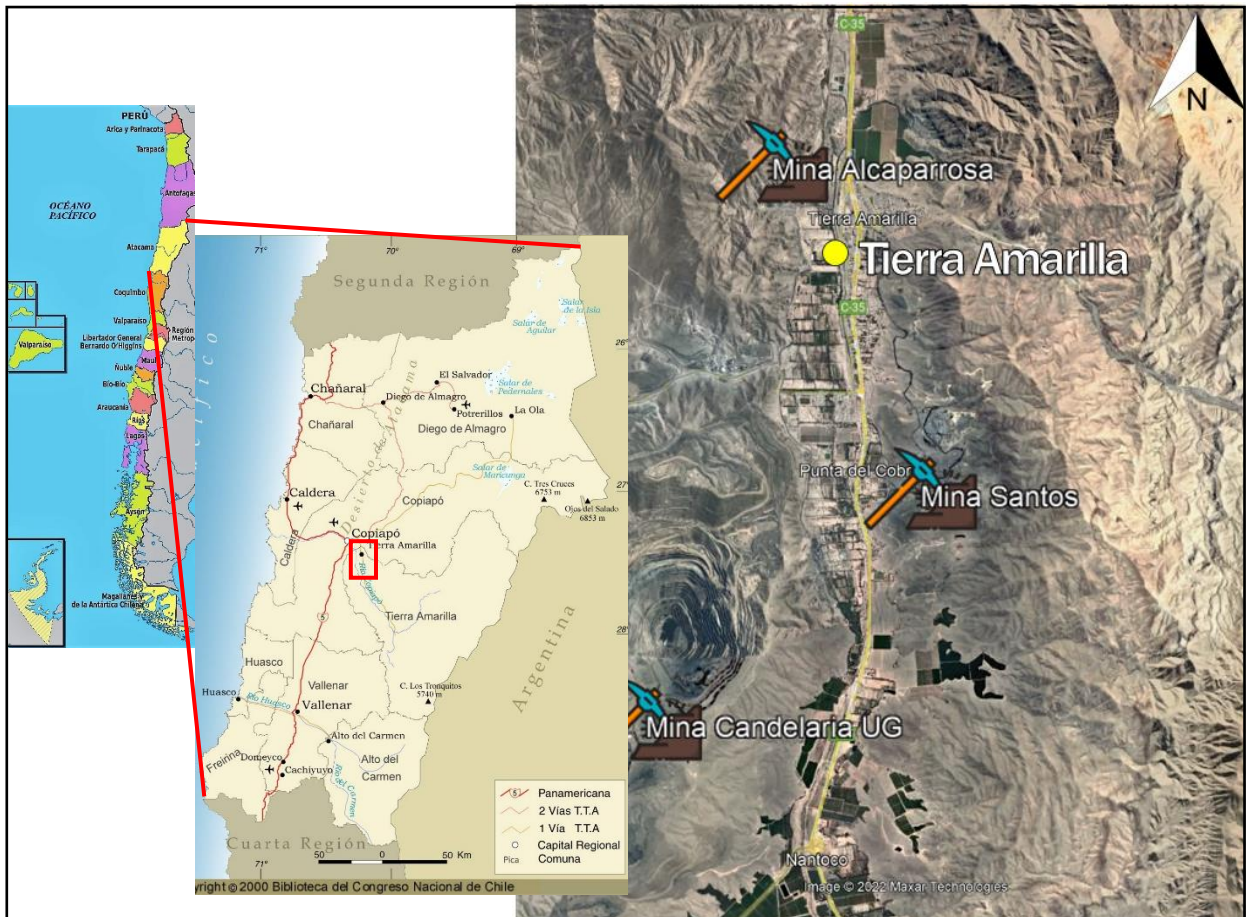


Figura 1.1. Mapa de ubicación Minera Candelaria y Ojos del Salado. A) Mapa regional de Chile. Mapa Región de Atacama. C) Mapa de ubicación minas del distrito.

Copiapó tiene un clima desértico, con temperaturas suaves todo el año. Los inviernos son suaves con temperaturas cálidas. La precipitación anual es de 17 mm en promedio, cayendo la mayoría en los meses de invierno. La elevación de las operaciones mineras no excede los 800 m s.n.m. El clima y la relativamente baja elevación permiten la minería y exploración durante todo el año.

El marco geomorfológico regional donde se emplaza el proyecto se localiza entre el norte chico y el norte grande, reconociéndose cinco grandes unidades: farellón costero y/o planicies fluviomarinas, Cordillera de La Costa, depresión intermedia, precordillera, Cordillera de Los Andes (Paskoff, 1970). El proyecto se ubica en una zona de depresión y discontinuidad ubicada entre la precordillera y la Cordillera de Los Andes, con un ancho máximo promedio de 10 km aproximadamente, nivel de base de 3.750 a 3.800 m s.n.m., y que incluye una serie de cuencas endorreicas cubiertas por rocas piroclásticas.

En esta unidad es característico encontrar Cordones Transversales que la interrumpen, uniendo la

Cordillera de Los Andes y la Cordillera de La Costa, dando origen a valles fluviales que van desde el este al oeste. Estos valles cortan la Cordillera de La Costa, que en esta latitud puede alcanzar altitudes superiores a los 1.000 m s.n.m. La depresión intermedia presenta un relieve áspero, con grandes diferencias de altura entre los fondos de las quebradas que la atraviesan y las cimas de los volcanes que son característicos de esta unidad a estas latitudes.

1.3 ANTECEDENTES GENERALES

Como se mencionó anteriormente, el Complejo Minero Candelaria comprende dos operaciones mineras adyacentes. CCMC opera Mina Candelaria Rajo (OP) y Mina Candelaria Subterránea (UG) y Ojos del Salado trabaja las minas subterráneas Santos y Alcaparrosa. Candelaria OP y UG proveen mena de cobre para la planta concentradora Candelaria que tiene capacidad de 75.000 toneladas diarias (SRK, 2018). La Mina Santos da mena de cobre a la planta concentradora Pedro Aguirre Cerda (PAC) que tiene capacidad de 3.800 toneladas diarias, además de entregar un promedio de 1.400 toneladas diarias a la planta concentradora Candelaria, junto con toda la mena extraída de la Mina Alcaparrosa (SRK, 2018).

Este complejo minero es propiedad indirecta de Lundin Mining en un 80% y Sumitomo en un 20%.

1.3.1 Método de explotación

En las 3 minas subterráneas, se utiliza el método de explotación Sub Level Stopping (SLS), que consiste en la extracción de mineral por subniveles mediante disparos con tiros de banqueo largos y tiros de realce radiales. Típicamente, este método permite la explotación de cuerpos de tipo vetiforme en conjunto con aquellos mantiforme de mayor potencia.

En el nivel base se construye la galería de “undercut” o zanja GU, por lo general en el centro del caserón y paralela a esta se construye una galería de transporte o GT donde es cargado el material a través de las galerías que unen a ambas comúnmente denominadas cruzados de extracción.

En el nivel superior (o subniveles de ser requeridos) se construyen galerías desde donde se realiza la perforación de producción de banqueo (GP).

El mineral es perforado y tronado en tajadas que caen en la zanja. Para ello, se construye una cara libre a través de una chimenea VCR la cual es desquinchada con tiros paralelos a ésta generando así cara libre para las corridas de producción. La perforación de la zanja se realiza en forma ascendente y radial con altura variable entre 12 hasta 25 m. La perforación de las paradas de producción se hace con tiros largos paralelos y/o en abanico de manera de abarcar el contorno del cuerpo a explotar. Las dimensiones de los caserones varían entre 20 y 45 m de ancho, longitud variable entre 25 a 90 m y en altura varía entre 25 a 60 m.

La extracción del mineral se ejecuta por un sistema de carguío directo desde los caserones a los camiones, el transporte del mineral se realiza por la rampa principal hasta superficie, depositándolo en el stock que se ubica cerca del portal principal de la mina.

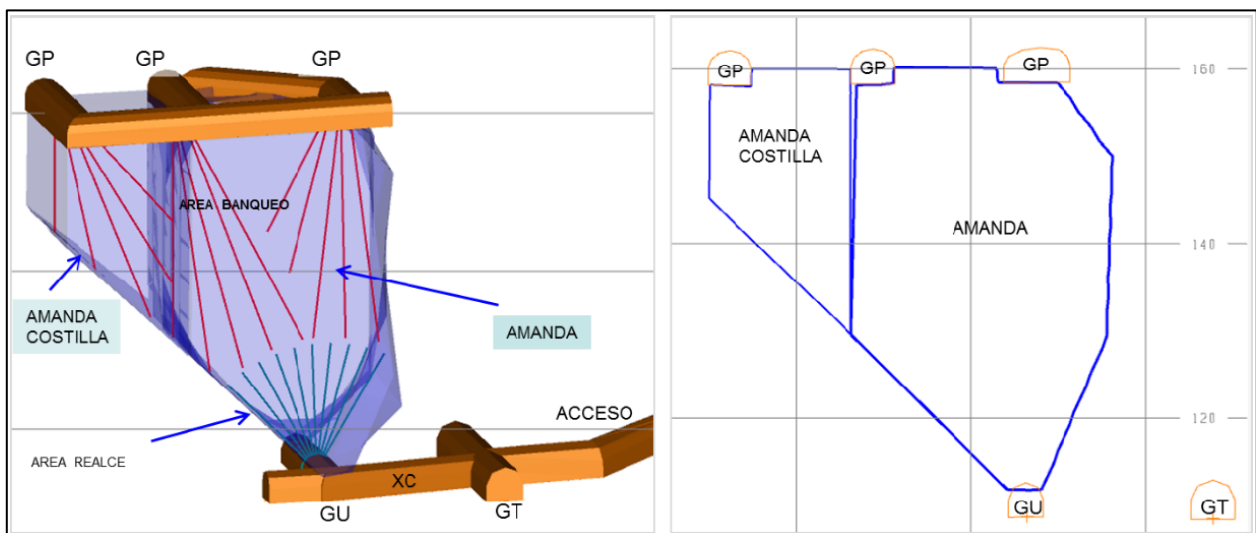


Figura 1.3: Método de explotación Sub Level Stopping (SLS).

1.4 AGRADECIMIENTOS

A Compañía Minera Candelaria por la oportunidad de desarrollar mi memoria enmarcada en el proyecto de memoristas de la Subgerencia de Geotecnia UG; a mi tutor Pablo Escares por el desafío de confiar en mi trabajo, además del apoyo dentro y fuera del trabajo.

A nuestra Paleoprofe Sylvia, por el constante apoyo durante toda la vida universitaria.

A mi familia, que a pesar de la distancia se hace presente día a día, y sobre todo en el desarrollo de este trabajo.

A la familia de amigos que formé en Copiapó con Danny, Amanda, Fran, Mariana, Pía, Andrea, Viviana, Lady y sus hombres. A la Dra Yumerlyn Arambulet, pilar fundamental en mis inicios copiapinos, gracias a su apoyo y amistad logré seguir buscando y llegar a desarrollar este trabajo. A las amigas y amigos que desde el Sur me siguen apoyando y motivando día a día, Leslie, Tania, Liz, Rodri, Daniela A y Camilo, entre muchas otras que siempre me acompañan.

A La Vecindad y mis muchos amigos universitarios, por ser una motivación constante para lograr este trabajo, por el apoyo en todo momento, las risas, memes y respuestas a las dudas geológicas y las no tanto.

A La Botika, apoyo fundamental en el mundo minero copiapino para finalizar esta obra.

A Claudio, que me ha motivado y acompañado en la última y más difícil etapa del camino para obtener el título, por tus consejos, preocupación y sobre todo, por el cariño sincero.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

2.1.1 Rocas Estratificadas

En el área de Paipote-Tierra Amarilla las rocas estratificadas están representadas por las formaciones Punta del Cobre, Abundancia, Nantoco, Totalillo, Pabellón y Bandurrias y sus características principales se describen a continuación:

A) Formación Punta del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962).

Esta Formación constituye la unidad más antigua del área, la cual hasta antes del trabajo de Segerstrom y Ruiz (1962), era considerada de origen intrusivo (denominada Albitófiro). La Formación Punta del Cobre infrayace a la Formación Abundancia, con una leve discordancia de erosión (paraconformidad). El límite inferior de la Formación Punta del Cobre no aflora ni tampoco ha sido reconocida en los sondajes profundos, hasta 700 m realizados en la zona del yacimiento Candelaria (Díaz, 1990).

Litológicamente, en su localidad tipo, en sus 50 m superiores consiste en flujos y brechas volcánicas intercaladas con capas lenticulares de calizas impuras y lutitas calcáreas. Algunos ammonites de edad Berrasiano fueron hallados por Tilling (1962) en la Quebrada Nantoco, en rocas volcanoclásticas de la parte más alta de esta unidad. La parte inferior de esta formación consiste de volcanitas masivas de carácter principalmente andesítico de texturas que varían de porfídicas de grano medio a fino, a afaníticas.

La potencia total de esta formación se desconoce, sin embargo, Segerstrom y Ruíz (1962) indican una potencia mínima expuesta de 680 m. Una potencia sobre 700 m ha sido observada en sondajes de diamantina realizados en el proyecto La Candelaria, distrito de Ojancos Nuevo (Díaz, 1990).

Las rocas de esta unidad están meta somatizadas y/o alteradas hidrotermalmente, tanto en el sector de la aureola metamórfica como en el distrito Punta del Cobre.

B) Formación Abundancia (Biese, en Corvalán, 1974).

La localidad tipo de la Formación Abundancia está ubicada en la vecindad inmediata de la mina

Abundancia, situado en el extremo nor-este del cuadrángulo Las Pintadas, las rocas de esta unidad cubren gran parte del área de Tierra Amarilla.

La mitad inferior de la Formación Abundancia tiene típicamente un aspecto bandeado, el cual resulta de la alternancia de calizas, limonitas calcáreas y niveles volcánicos y volcanoclásticas. Estas últimas son más potentes que las capas de calizas y corresponden a andesitas, areniscas tobáceas y conglomerados de grano fino. La mitad superior consiste principalmente de rocas calcáreas uniformemente estratificadas con rocas volcánicas y volcanoclásticas en menor cantidad. Los fósiles en la parte alta de esta formación indican una edad Valanginiano superior (Corvalán, 1973). Esta unidad es sobreyacida concordantemente por calizas gris oscuro de la Formación Nantoco.

El espesor total de la Formación Abundancia varía entre 205 m en la vecindad de la mina Abundancia y 223 m en la Quebrada Meléndez (Tilling, 1962). El equivalente metamórfico de esta formación, en la parte occidental del valle no posee variaciones importantes de potencias (Díaz, 1990).

C) Formación Nantoco (Biese, en Corvalán, 1974).

Esta unidad debe su nombre al pueblo de Nantoco ubicado al Sureste del cuadrángulo Las Pintadas y está constituido principalmente por calizas. Se apoya concordantemente sobre la Formación Abundancia y alcanza un espesor total de 877 m en la Quebrada Meléndez. El miembro inferior (en el sentido de Segerstrom 1960 y Segerstrom y Ruíz, 1962) de esta formación está constituido principalmente de una secuencia monótona regular de 752 m de calizas grises con abundantes y pequeñas concreciones piritosas limonitizadas. La serie calcárea de capas delgadas de areniscas tobáceas o limolitas calcáreas; la parte superior del miembro inferior aumentan en proporción estos últimos tipos de rocas.

El miembro superior está integrado por 125 m de calizas fétidas y numerosos lentes de yeso.

En base a las correlaciones estratigráficas y la fauna de ammonites se le asigna una edad Hauteriviano inferior-superior a esta formación, (Corvalán 1974).

D) Formación Totalillo (Biese-Nickel, 1942).

La Formación Totalillo consiste principalmente de limonitas calcáreas, marinas, calizas margosas. Se apoya concordantemente sobre el miembro superior de la Formación Nantoco y alcanza un espesor total de entre 120 y 180 m. Los fósiles de la arenisca calcárea indican una edad Hauteriviano superior. Se diferencia de la formación infrayacente por ser más clástica y contener abundantes capas de pedernal, siendo menos calcárea hacia el Sur.

E) Formación Pabellón (Biese-Nickel 1942).

Esta formación está constituida principalmente por rocas calcáreas y se distingue por la presencia de capas guías de pedernal negro. Se dispone concordantemente sobre la Formación Totalillo y su espesor varía desde 500 m hasta 2.100 m. Los fósiles encontrados indican una edad Barremiano superior.

Las últimas formaciones descritas se agrupan en el Grupo Chañarcillo, el que engrana al Norte y al oeste con la Formación Bandurrias.

F) Formación Bandurrias (Segestron, 1960).

La distribución de esta formación en el área de Paipote-Tierra Amarilla, es bastante menor que las demás unidades estratificadas, encontrándose los afloramientos dentro de la aureola metamórfica. Rocas inalteradas de esta formación afloran al Norte y Noreste del cuadrángulo Las Pintadas, en los cuadrángulos Quebrada Paipote y Llampos.

Esta unidad es el equivalente volcánico-clástico de las formaciones calcáreas Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón.

Litológicamente, en la Quebrada Bandurrias, cuadrángulo Quebrada Paipote, consiste principalmente de areniscas rojas, conglomerados y rocas volcánicas con intercalaciones de lentes de caliza, con un espesor aproximado de 2.000 m. Al Sur y Noroeste, los estratos de esta formación se interdigitan con las formaciones calcáreas neocomianas.

Los cambios laterales de facies observados en las rocas neocomianas, juegan un importante papel

en los fenómenos metamórficos vistos en la aureola de Tierra Amarilla al Suroeste del área de estudio.

G) Depósitos Aluviales Aterrazados.

Estos depósitos corresponden a gravas poco consolidadas constituidas en su mayor parte por bloques y rodados. Su selección es escasa a nula, aunque generalmente presenta un alto grado de redondeamiento; la matriz es de limo no consolidado, en parte cementada por calcita y arcilla. Debido a que esta unidad aflora en terrazas de hasta 70 m sobre el actual piso del valle Copiapó y en numerosos valles afluentes, se le designó inicialmente como "Depósitos de terrazas" (Segerstrom y Ruíz, 1962).

Por la extensión de estos depósitos y sus características, se le define como unidad formal, llamada "Formación Gravas de Atacama" (Mortimer, 1973). Su origen parece corresponder a abanicos aluviales calescentes y formados principalmente a partir de corrientes de barro.

Se han descrito dos terrazas, situada a aproximadamente 20 y 70 m sobre el piso del valle. En el sector de Mina Candelaria Subterránea, se observa claramente la más alta, mientras que la baja se halla en su mayor parte erosionada, según lo observado en el recorrido del río Copiapó. En esta área se reconocen 3 subunidades. La primera o superior, de 20 a 25 m de potencia corresponde a la más superficial, se caracteriza por escasa o nula cementación. Se compone de gravas de rodados polimícticos, de mala clasificación, en una matriz de arena gruesa. La subunidad dos, o intermedia, tiene un grado medio de compactación y cementación, siendo sus componentes clásticos más redondeados y con mayor grado de esfericidad que la subunidad anterior (transporte más prolongado). La matriz se compone por arena media a fina. La tercera subunidad, o inferior corresponde a un conglomerado muy cementado, principalmente por calcita, que le otorga el carácter de roca. Sus clastos de gran tamaño ($X = 10$ cm), poseen un alto grado de redondeamiento y están dispuestos en una matriz de limo y arcillas. Se intercalan lentes de arcillas amarilla a rojiza muy homogéneas. Esta subunidad no aflora en una gran extensión areal ni vertical, acuñándose en diferentes direcciones.

La edad exacta de estos depósitos no se conoce, sin embargo, Segerstrom (1960) le atribuye una

edad probable Pleistocena.

2.1.2 Rocas Intrusivas

Según Moscoso y otros (1982) las rocas intrusivas en la Región de Atacama entre los 28° y 30° Lat. Sur, se distribuyen principalmente en tres franjas (Occidental, Central y Oriental) de dirección Norte a Noreste constituidas por extensos plutones, cuyas edades varían desde el Jurásico al Terciario. La Franja Occidental o costera (Jurásico Superior-Cretácico Superior) está constituida por intrusivos, granodioríticos, tonalíticos y graníticos, que afloran preferentemente entre los 28° y 29°15' Lat. Sur. La Franja Central (Cretácico Superior) está compuesta por rocas ígneas de gran variedad petrográfica, incluyendo desde granitos a gabros. La Franja Oriental (Paleógeno) está constituida por numerosos stocks, graníticos a granodioríticos, y por un cuerpo granodiorítico de dimensiones batolíticas.

Las rocas intrusivas más antiguas corresponden a un sill de pórfido andesítico que corta las formaciones más jóvenes del grupo Chañarcillo, con una potencia del orden de 200 m se puede seguir en corrida por más de 40 km (Segerstron, 1960). Se ha asignado una edad Barremiano-Aptiano y aflora hacia el este de la Sierra Punta del Cobre (Moscoso y otros, 1982)

Cortando la Formación Bandurrias aparecen cuerpos de pórfido sianíticos de edad incierta, probablemente Cretácico Inferior.

Limitando la franja volcano-sedimentaria neocomiana por el Oeste aparecen los afloramientos de un batolito granítico granodiorítico. Tilling (1962) denominó como "Batolito Andino" a todas las rocas intrusivas asociadas con la Orogenia Andina de mediados del Cretácico. Más de la mitad del área de Paipote-Tierra Amarilla corresponde a rocas intrusivas. A una mayor escala, estas rocas plutónicas representan el margen oriental de una gran masa intrusiva la que se extiende desde Tierra Amarilla hasta el Océano Pacífico. El mismo autor agrupó estas rocas batolíticas en:

- Pórfido Hipobisal (Kg)
- Rocas Dioríticas (Kd y Kt)
- Adamelita y Granodiorita (Kap y Kpd)

- Rocas Graníticas (Kas)
- Cuerpos Intrusivos Menores (Kfi, Kt)

Según dataciones radiométricas realizadas por Zentilli (1974) tendría una edad en general Cretácico Inferior.

Tilling (1962 y 1976) en base a consideraciones estratigráficas y relaciones de intrusión con las unidades sedimentarias neocomianas, estimó que probablemente el batolito se emplazó a una profundidad de 8 km, lo que es equivalente a una presión litostática de 2,3 kilobars. Esta intrusión, de tipo forzada, origina una aureola de metamorfismo con rocas córneas, skarn calcosilicatados y metavolcanitas.

Hacia el flanco Este las rocas no presentan huellas de metamorfismo (Segerstrom y Ruiz, 1962; Tilling, 1962).

2.2 GEOLOGÍA DEL DISTRITO CANDELARIA-PUNTA DEL COBRE

El distrito Candelaria-Punta del Cobre es el más importante del tipo, en la franja IOCG de Chile con más de 13 millones de toneladas de cobre (Del Real, 2018). Este distrito está caracterizado por una secuencia de arco volcano-sedimentaria del Cretácico Inferior (~ 35-132 Ma), cubierta por el Grupo marino sedimentario Chañarillo, formado en una cuenca de trasarco extensional (~132-130 Ma). En el lado occidental del distrito se encuentra el batolito Copiapó, emplazado entre ~118 y 110 Ma durante el cambio de tectónica extensional a transpresional.

La mineralización se aloja principalmente en la parte superior del miembro Andesita Inferior y en los miembros volcano-sedimentarios y de Dacita que le sobreyacen, todos estos en la Formación Punta del Cobre. La extensión de la mineralización IOCG en el distrito Candelaria-Punta del Cobre refleja una combinación de factores que incluyen cambios en la cinemática regional y la arquitectura de fallas relacionada, múltiples eventos intrusivos, acceso de fluidos a litologías permeables y reactivas, cambios verticales en las condiciones redox y el papel potencial de múltiples fluidos.

Para este trabajo interesan 3 minas subterráneas del distrito: Candelaria, Santos y Alcaparrosa, explotadas por Lundin Mining Corporation (80%) y Sumitomo (20%). Santos y Alcaparrosa operan bajo la compañía Ojos del Salado, la cual trabaja con la Planta Concentradora Pedro Aguirre Cerda, ubicada en las instalaciones de Mina Santos. En Mina Candelaria se encuentra el rajo (open pit) y la subterránea (underground, UG).

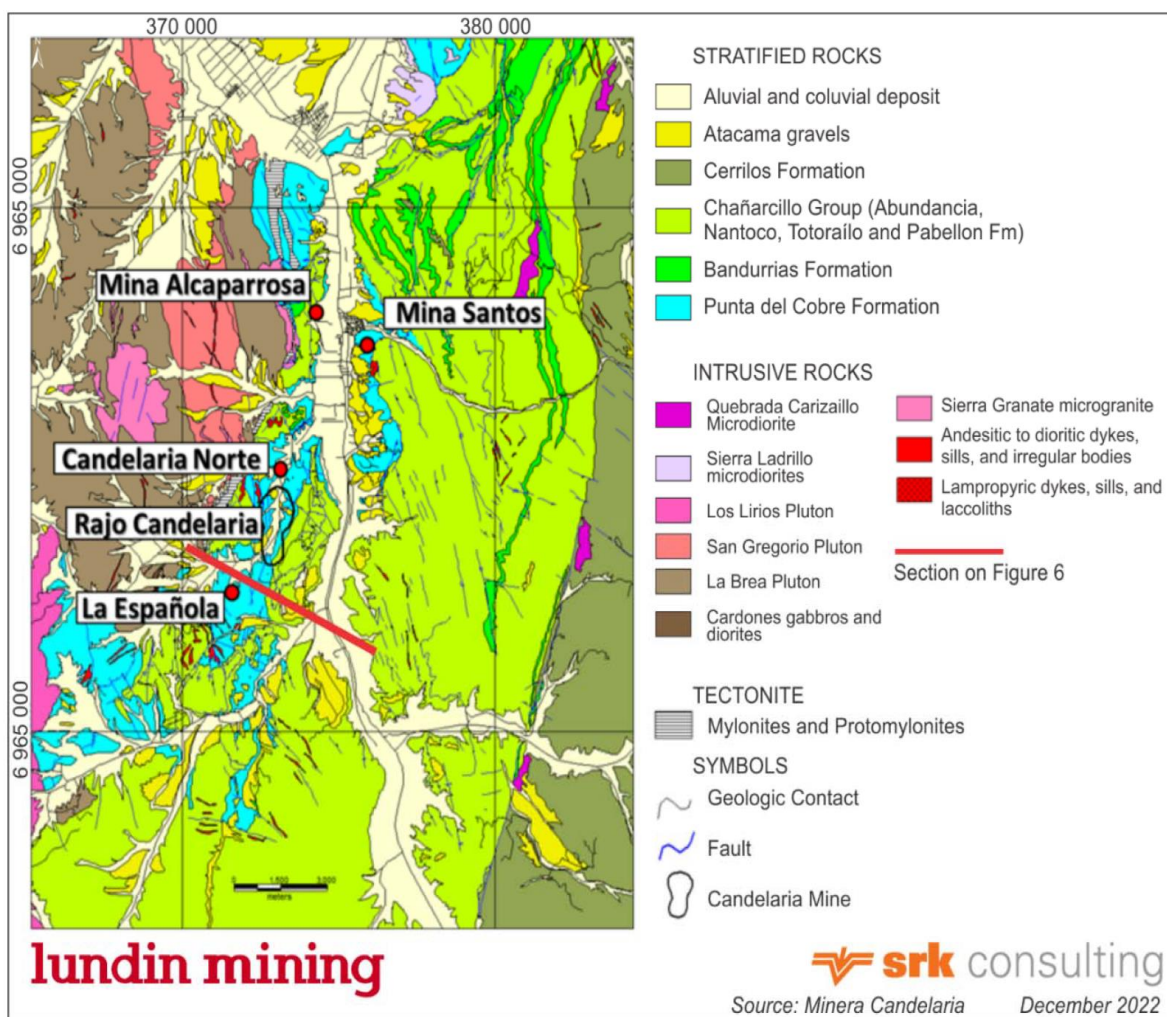


Figura 2.1. Esquema geológico y ubicación de las minas.

2.2.1 Litología

En Candelaria Norte predominan las siguientes Unidades Geológicas (UG-XX) desde base a techo:

- **Andesita Inferior (UG-61):** corresponde a una roca de color gris oscura de textura relicta porfídica, con moderada a fuerte alteración biotítica silíceo, donde ocasionalmente se encuentra

foliada.

- **Brecha Feldespato Potásico (UG-68):** corresponde a una roca de color rosada de textura brechosa con fuerte alteración de feldespato potásico en los clastos, en matriz o como halos de vetillas de sulfuros-magnetita-anfíbol. Localmente con mineralización de magnetita en matriz.
- **Brecha de Magnetita (UG-57):** corresponde a una roca con abundante magnetita en brecha, masiva, en vetillas y localmente bandeada, con mineralización de cuarzo y anfíbol asociado.
- **Tobas (UG-50):** constituida principalmente por una meta toba de biotita, a veces foliada, y localmente de aspecto brechoso con clastos de sílice deformados, con intercalaciones de magnetita y cuarzo bandeado con mineralización de sulfuros diseminado, y localmente Skarn de granate café y rosado.
- **Albitófiro (UG-77):** consiste principalmente en una roca de textura porfídica relictica con fenocristales de plagioclasa inmersos en una masa fundamental microcristalina fuertemente silicificada, con alteración de anfíbol en manchas y vetillas, con feldespato potásico y sílice asociado como halo de las vetillas, y en la matriz. Localmente se observan intercalaciones de mantos irregulares de baja potencia con magnetita masiva, bandeada y Skarn de granate rosado.
- **Diques (UG-72):** estos corresponden a cuerpos tabulares subvolcánicos que cortan a todas las unidades geológicas antes descritas, con potencias de hasta 2 m.

En general, los contactos litológicos no son tajantes, sino más bien transicionales. Por ejemplo, en la zona de contacto entre la Brecha Feldespato Potásico (UG-68) y Brecha de Magnetita (UG-57), es posible observar brechas de UG-68 con magnetita baja a moderada en matriz.

El contacto más notorio ocurre entre el techo de la UG-57 y piso de la UG-50, donde baja considerablemente la cantidad de magnetita y las estructuras de bajo ángulo (fallas y joint) aumentan, por lo tanto, adquieren relevancia desde el punto de vista geomecánico.

3. BASE DE DATOS

3.1 PRESENTACIÓN

Para la validación y actualización de dominios estructurales para Mina Candelaria Subterránea, fue necesario contar con una Base de Datos, mediante la confección de un programa, desarrollado por la empresa Hibring, a petición de Minera Candelaria desde el área de Geomecánica Subterránea, especialmente para responder a la problemática de la pérdida de tiempo e información en la extracción de los datos obtenidos en terreno, que pasan por distintos softwares posteriormente. Así se creó el software GeoRec.

3.2 DESCRIPCIÓN

Antes del software GeoRec, para mantener una base de datos que permitiera la actualización constante de las estructuras de las minas Candelaria UG, Santos y Alcaparrosa, se debía realizar un trabajo manual de obtención de la información desde los planos disponibles de las tres minas. Este procedimiento era lento y engorroso, ya que se debían revisar 76 planos. En estos planos se determinan 5 tipos de estructuras que son: diaclasas, fallas, diques, diaclasas subhorizontales y vetas.

Cada estructura se caracteriza por al menos 7 detalles; y en cada plano se pueden encontrar entre 20 a 2.000 unidades, teniendo normalmente un total de aproximadamente 34.000 elementos. Manualmente este trabajo suele demorar entre 2 a 5 minutos por elemento, lo que significa aproximadamente alrededor de 2.000 horas, por lo que se deben ocupar varias semanas en ser realizado. Esta demora produce una constante desactualización/actualización derivada del flujo regular de la información, que no se alcanza a procesar.

GeoRec logra capturar el detalle de todas las variables de las diferentes estructuras presentes en los planos, en un tiempo total aproximado de 5 minutos por plano, teniendo así la actualización de las estructuras con sus diferentes variables para una mina con 30 planos, en aproximadamente 2,5 horas, lo que produce un cambio radical, comparado con la demora de semanas del método manual.

3.3 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN ESTRUCTURAL

Para las tres minas subterráneas, se solicitó la actualización de los planos de trabajo, con el diseño de galerías y las estructuras levantadas en terreno. Candelaria UG tiene 30 planos, Mina Santos 21 planos y Mina Alcaparrosa 24 planos, lo que suma un total de 75 planos.

Al inicio, se trabaja con un *vlx* que se descarga desde la plataforma de GeoRec. Este *vlx* es un archivo ejecutable que se integra al AutoCAD.

Se abre el plano en el AutoCAD y, con Load Application, se carga el archivo *vlx*. Luego se hace correr el comando Cotas (Figura 3.1.), el cual permite extraer toda la información de las cotas disponibles en el plano.

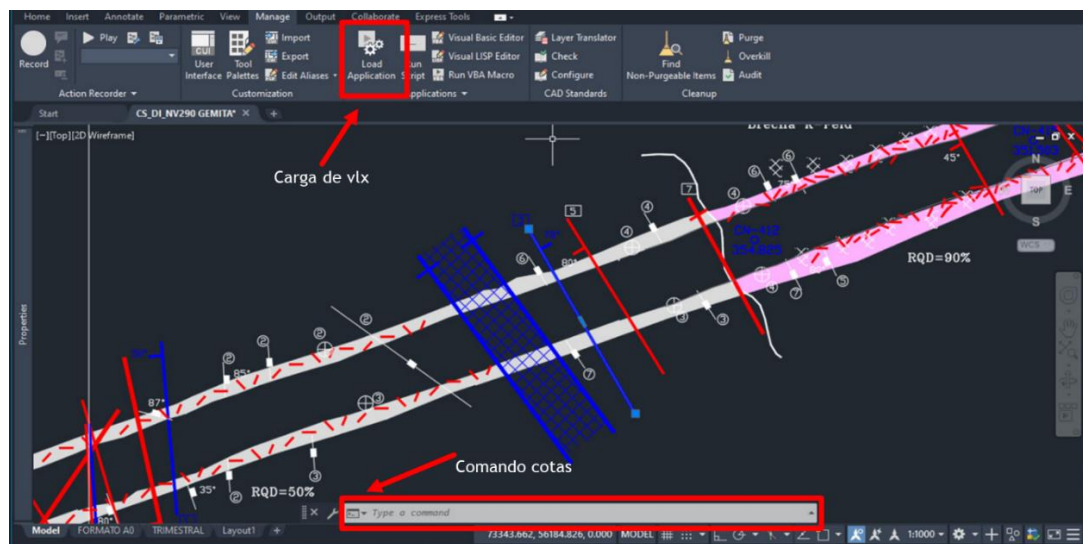


Figura 3.1 Ingreso comando Cotas en AutoCAD.

Automáticamente da origen a un archivo *.hib*, que identifica el nombre del plano con el sufijo *_cotas* y que se guarda en la misma carpeta donde está el plano.

Posteriormente, se ejecuta el comando *hib*, que permite seleccionar cualquier polígono o el plano completo, rescatando toda la información que contenga la selección (Figura 3.2.). Esto también crea de manera automática otro archivo *.hib*, que se identifica con el nombre del plano con la fecha y hora exacta en que se generó. Este tipo de archivo es de uso exclusivo para la plataforma de

GeoRec.

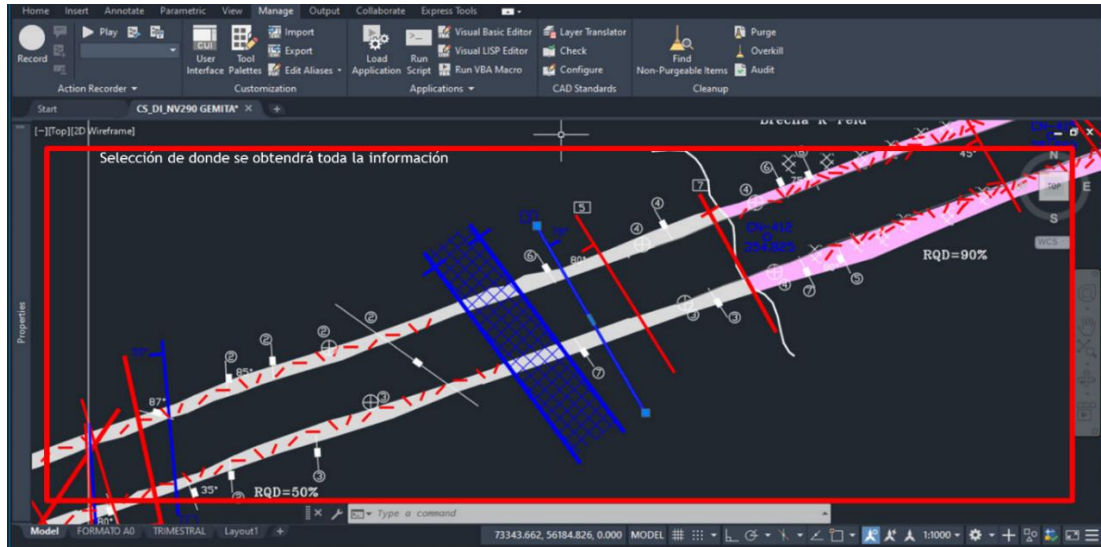


Figura 3.2. Todos los elementos de la selección serán identificados.

Con ambos archivos: el de cotas y el de la información, se comienza a trabajar en la plataforma. Primero se ingresa el archivo *.hib* de las cotas (Figura 3.3.), se sube y luego se hace lo mismo con el otro archivo *.hib* (Figura 3.4.).

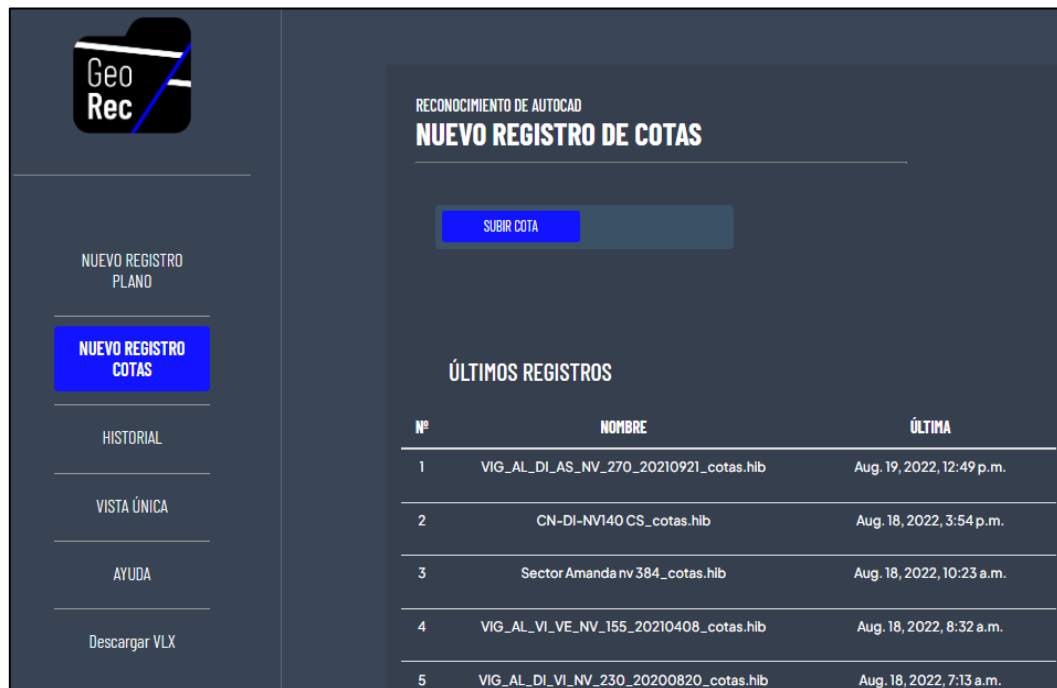


Figura 3.3. Visualización plataforma GeoRec para ingreso de cotas.

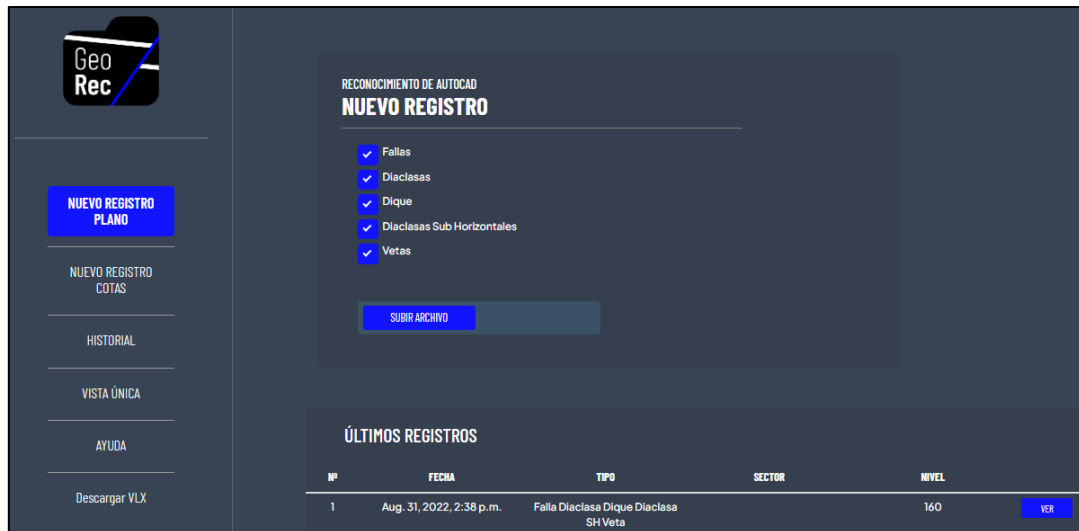


Figura 3.4. Visualización plataforma GeoRec para registro de plano.

Una vez que están cargados ambos archivos, la plataforma arroja el resultado en pantalla. Se revisa visualmente y se guarda, para que quede archivado en la plataforma (Figura 3.5.), con la posibilidad de descargar un archivo *.xls*, que contiene la caracterización de cada elemento: diaclasas, fallas, diques, diaclasas subhorizontales, vetas y sus detalles (Figura 3.6.).



Figura 3.5. Visualización plataforma GeoRec con el resultado del reconocimiento.

RECONOCIMIENTO DE AUTOCAD

CN-DI-NV160 CS_20220705.165514.hib

DESCARGAR EXCEL DESCARGAR IMAGEN ELIMINAR

LISTA DE DIACLASAS (617) LISTA DE FALLAS (258) LISTA DE DIQUES (6) LISTA DE DIACLASAS SH (108) LISTA DE VETAS (25)

LISTA DE DIACLASAS

Nº	x1	y1	x2	y2	x3	y3	azimut	frecuencia	DIP	DIPDIR	Cota
1	73777.70	58333.44	73778.02	58326.03	73777.86	58329.74	357.53	3	90	267.53	129.15
2	73780.85	58335.08	73786.63	58329.02	73783.74	58332.05	316.33	3	90	226.33	128.34
3	73772.96	58341.81	73773.52	58333.72	73773.24	58337.76	356.05	3	90	266.05	129.65
4	73776.43	58343.68	73783.36	58337.15	73779.89	58340.41	313.29	3	90	223.29	129.70
5	73769.29	58349.66	73769.33	58341.69	73769.31	58345.68	359.71	3	90	269.71	130.43

Figura 3.6. Visualización final del resultado arrojado por GeoRec.

El archivo *.xls* descargable contiene el mismo detalle de lo mostrado por la plataforma, con todos los elementos presentes. A partir de estos archivos se realiza el control.

4. METODOLOGÍA DOMINIOS ESTRUCTURALES

4.1 REVISIÓN DE DOMINIOS PRE-DEFINIDOS

Actualmente, en Minera Candelaria, los criterios para definir los dominios estructurales se basan principalmente en el análisis de fallas, las cuales son divididas en 3 grupos (Tabla 4.1.).

Tabla 4.1. Criterio para diferenciación de fallas

<u>Tipo de</u> <u>Discontinuidad</u>	<u>Continuidad</u> (m)	<u>Espesor Típico</u> (cm)	<u>Comentario</u>
<i>Mayores</i>	>100	>6	Continuidad no es cortada por fallas o discontinuidades intermedias ni menores
<i>Intermedias</i>	100-10	<5	Continuidad generalmente asociada a fallas o discontinuidades mayores
<i>Menores</i>	<10	<3	Continuidad generalmente asociada a fallas o discontinuidades intermedias

- **Fallas mayores:** que corresponden a fallas, planos de estratificación y diques con continuidad a escala de mina, mayor a 100 metros.
- **Fallas intermedias:** son las fallas, planos de estratificación y diques que tienen continuidad mayor a 10 m y menos a 100 m, o a lo menos a escala de una unidad de explotación reconocible como mínimo en 2 galerías.
- **Fallas menores o fracturas:** fallas, diaclasas y diques con continuidad a escala de galería menor a 10 m.

Así, existen dominios definidos para cada una de las tres minas subterráneas del distrito. Para Mina Alcaparrosa se han definido 5 sectores dominados por las fallas principales Rocío y Viviana (Figura 4.1.). Estos sectores (Figura 4.2.) se agrupan en 3 dominios principales, el primero incluye la Zona 1, 3 y 5 con predominio de estructuras con rumbo N20°W y manteos 70°SW; el segundo corresponde a la Zona 2 controlado por la falla Rocío con rumbo N10°W y manto 85°SW y el

tercero corresponde a la Zona 4 dominada por la falla Viviana con rumbo N10°W y manteo 70°SW.

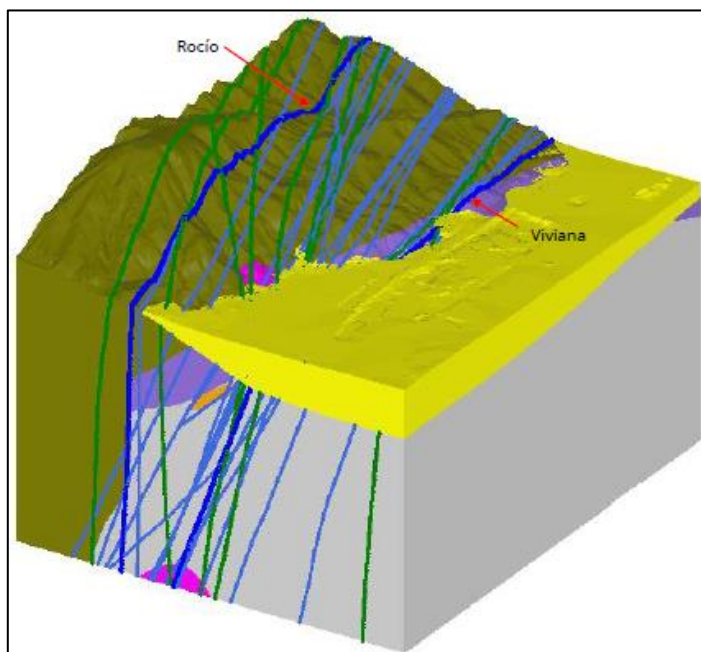


Figura 4.1. Fallas controladoras principales de Alcaparrosa.

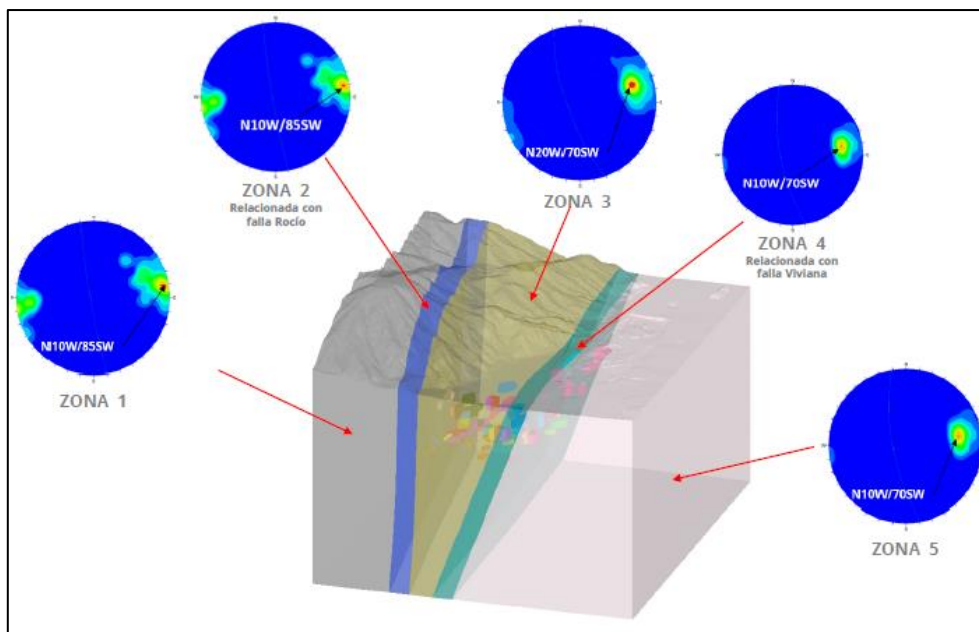


Figura 4.2. Zonas pertenecientes a los 3 dominios estructurales de Alcaparrosa.

En Mina Santos, asociados también a dos fallas controladoras principales, falla Isabel y falla Karen, se han definido 5 dominios (Figura 4.3.): Dominio Abundancia que está al Oeste de falla Isabel,

con rumbo N34°W y manteo 63°SW, Dominio Karen asociado a falla Karen, con rumbo N39°E y manteo 83°SE, Dominio Isabel asociado a falla Isabel, con rumbo N42°W y manteo 81°NW, Dominio Helena ubicado al este de falla Isabel, con rumbo N27°W y manteo 81°NE y Dominio Meléndez que se ubica al este del yacimiento, con rumbo N32°W y manteo 85°SW.

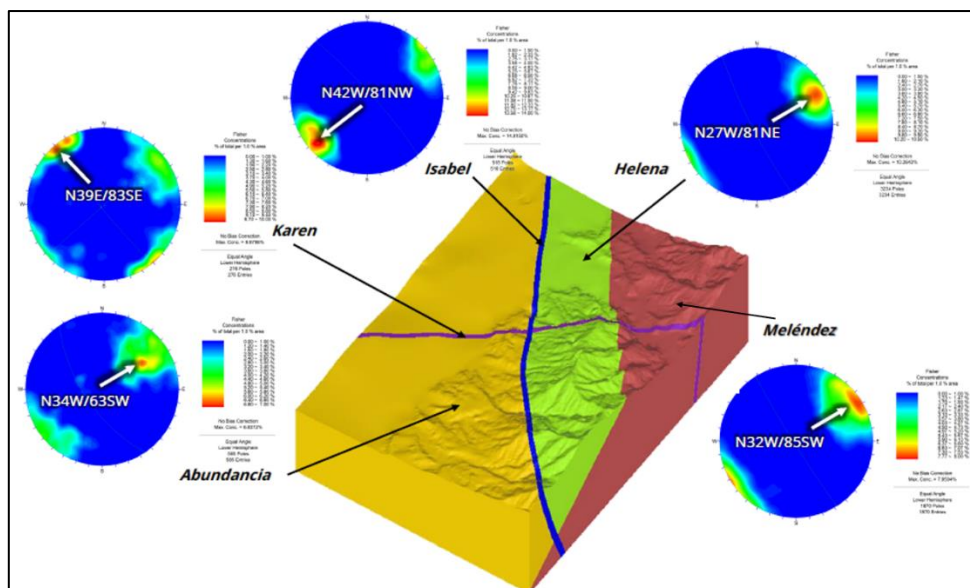


Figura 4.3. Zonas pertenecientes a los 3 dominios estructurales de Santos

En el caso de la Mina Candelaria UG, esta es subdividida en dos zonas, Candelaria Norte y Candelaria Sur. En Candelaria Norte se definen 3 dominios (Figura 4.4.): A, B Y C con tendencia a un menor manteo hacia el este. Esta definición de dominios se realiza a partir del análisis de 12 franjas de dirección Norte-Sur (Figura 4.5.).

El dominio A tiene un rumbo de N26°W y manteo de 90°SW; el dominio B tiene un rumbo de N31°W y manteo de 79°SW y el dominio C tiene dos tendencias principales, una con rumbo N32°W y manteo de 68°SW y la otra con rumbo N7°E y manteo de 69° NW.

En Candelaria Sur los dominios se definen por el control de la Falla Lar, teniendo 2 dominios (Figura 4.6.): Sector Oeste definido al oeste de la falla Lar con rumbo N5°W y manteo de 75°SW y el Sector Este definido al este de la falla Lar con rumbo N34°W y manteo 75°SW.

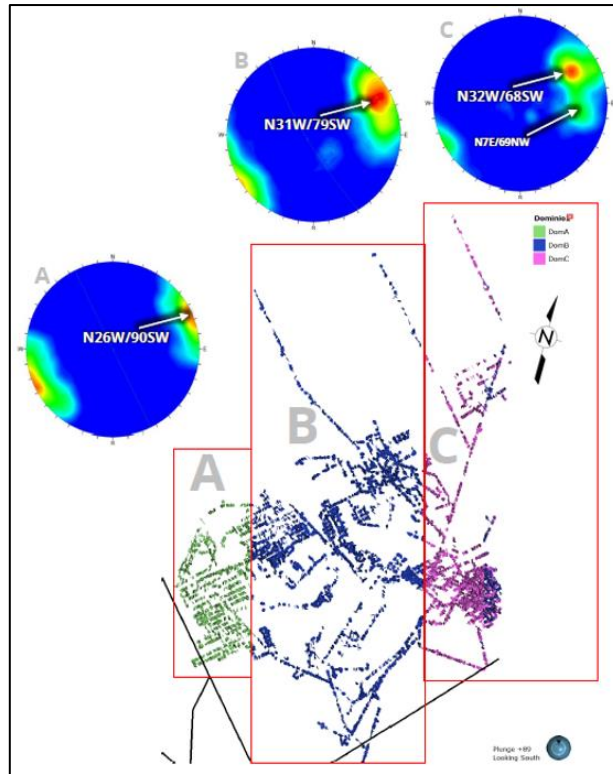


Figura 4.4. Zonas pertenecientes a los 3 dominios estructurales de Candalaria Norte.

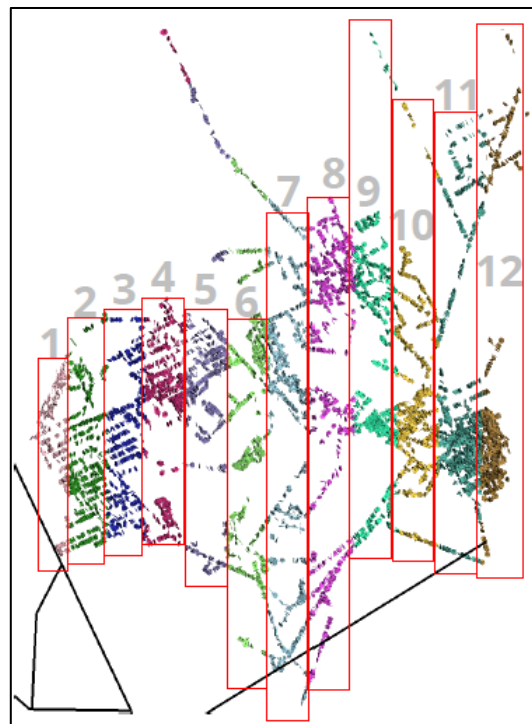


Figura 4.5. Franjas NS en Candalaria Norte.

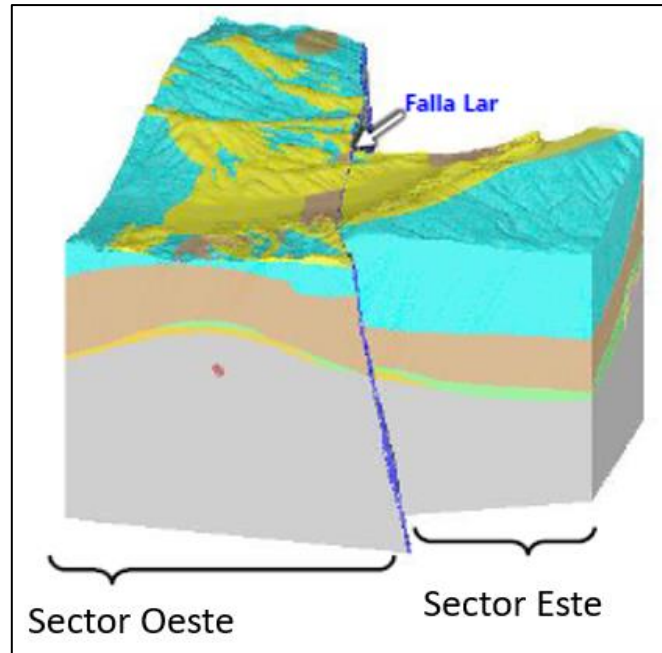


Figura 4.6. Dominios en Candelaria Sur.

Es importante destacar, que Candelaria Norte y Sur, se encuentran espacialmente dentro del rajo Candelaria (Figura 4.7.), por lo que también se deben tomar en consideración los dominios estructurales actuales, que ya se encuentran definidos en el rajo. Estos dominios son 9 y fueron definidos entre las principales fallas del rajo:

- Dom1: West Bronce
- Dom2: Bronce-Granate
- Dom3: Granate-Lar,
- Dom4: Lar
- Dom5: Lar-Roja
- Dom6: Roja-Este
- Dom7: Este-Venado
- Dom8: Venado-Santa Gemita
- Dom9: Santa Gemita al Este.

De todos ellos, los que intervienen en Candelaria Norte UG son el Dom7: Este-Venado, Dom8: Venado-Santa Gemita y Dom9: Santa Gemita al Este.

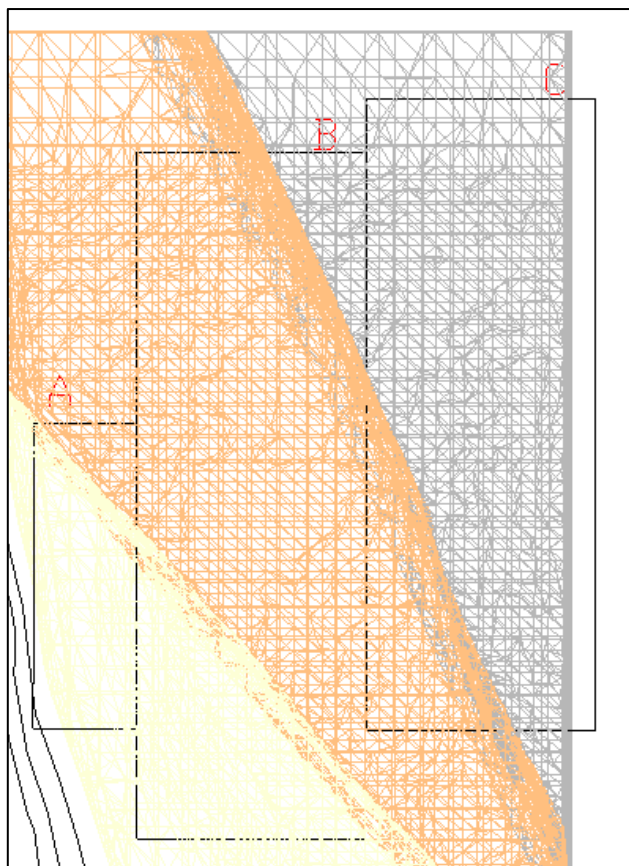


Figura 4.7. Dominios 7, 8 y 9 del rajo, sobre Dominios de Candalaria Norte UG.

Otros antecedentes considerados son los diagramas de polos para cada Unidad Geológica que se encuentra definida en la mina, dividida al Este de Falla Lar y al Oeste de ésta.

Las Unidades Geológicas son 7:

- UG30: corresponde a metasedimentos, skarn granate escapolita-piroxeno.
- UG40: metavolcanoclásticos indiferenciados.
- UG50: son las Tobas.
- UG61: metandesita de biotita.
- UG67: es la Brecha/skarn de magnetita.
- UG68: constituida por la Brecha KFeld
- UG70: de Diques/Sills indiferenciados.

4.2 NUEVOS ANTECEDENTES DE GEOREC Y TEÓRICOS

Con la base de datos actualizada, se realiza una revisión de los dominios estructurales actuales (anteriormente mencionados), para ver si con los nuevos antecedentes se mantienen o es necesario redefinirlos.

Con la revisión de trabajos relacionados (Carrizo, 2013; Herrera, 2016 y 2017; Godoy, 2019), además de conversaciones con expertos del tema (Andrea Russo, SRK Consulting), se concluye que no existe una metodología establecida para la definición de dominios estructurales en el sector de la industria minera. Probablemente esto se deba a las diferencias de trabajo de cada faena, así como también, al reciente acceso a cantidades de datos fiables para la realización de esto.

Por este motivo se decide, para la aplicación en Candelaria Norte UnderGround, realizar un cruce de las diferentes fuentes de información, con el objetivo de considerar la mayor cantidad de antecedentes para la actualización/revisión de los dominios estructurales.

Para lo anterior, se toman como antecedentes de los dominios ya definidos, la información de las orientaciones preferenciales por cada Unidad Geológica establecida para la mina, la base de datos creada en GeoRec y dos nuevas funciones del software que son: el informe estructural y la grilla de rosetas, las cuales se desarrollaron en una actualización del mismo.

4.2.1. Actualización GeoRec

De acuerdo con lo conversado con Andrea Russo (septiembre 2022), una forma es dividir la mina, o en este caso los planos, en cuadrantes iguales. Así se desarrolla la herramienta de la Grilla de Rosetas.

Esta herramienta entrega rosetas con la orientación principal, en una grilla de 10x10, ya sea de diaclasas o fallas, dependiendo del input, así como la información de la cantidad de elementos en cada cuadrante de la grilla, esto de acuerdo con la intensidad del color de fondo de cada cuadrante (Figura 4.8.).

Se determina una grilla de 10x10 cuadrantes, de acuerdo con el tamaño de la mina, considerando

que se obtiene una suficiente cantidad de información, fallas y diaclasas, en cada sector o cuadrante. Con esta herramienta, se realiza un análisis para cada uno de los 23 planos de Candelaria Norte.

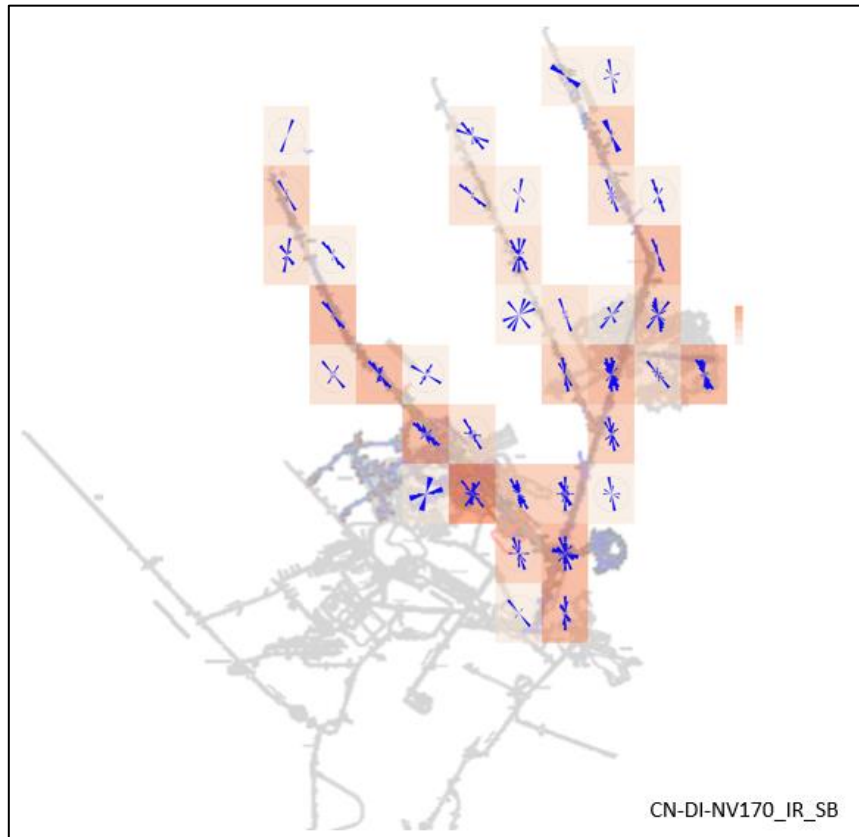


Figura 4.8. Grilla de Rosetas.

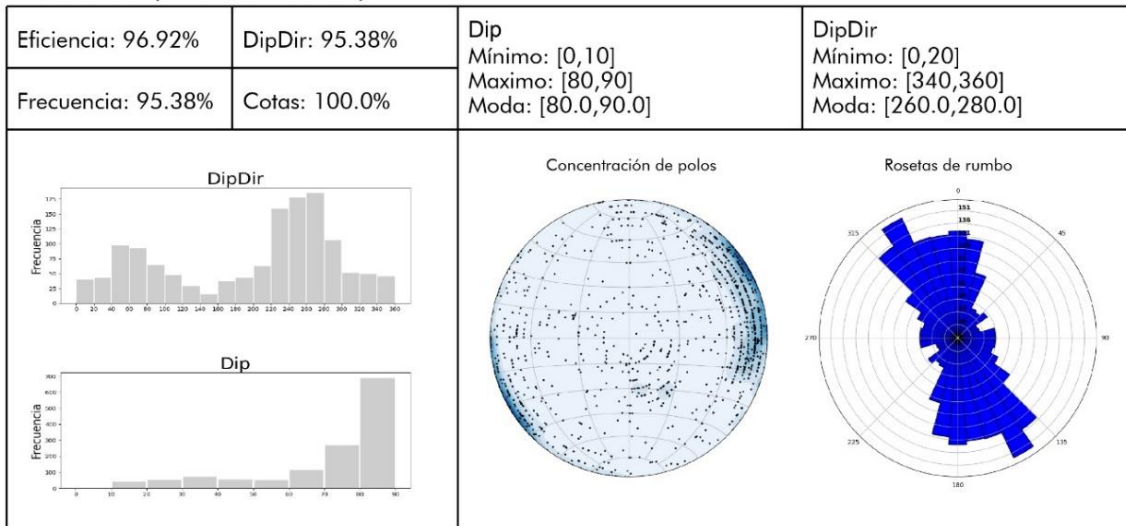
Con todo lo anterior, se inicia el trabajo con el informe levantamiento estructural, que es otra actualización realizada en GeoRec, el cual tiene la ventaja sobre la grilla, que puede abarcar diferentes niveles, tomando información en la vertical con diferentes planos. El informe levantamiento estructural entrega información más global respecto a cada plano, y se puede configurar para que tome en cuenta solo una cota, un rango de éstas dentro de un mismo plano, o todas las cotas con información disponible (información vertical antes mencionada).

Como se observa en la Figura 4.9. el informe levantamiento estructural entrega información sobre el dip y dipdir máximo, mínimo y la moda, además de histogramas que muestran la frecuencia de los valores de dip y dipdir. También se obtiene una roseta y un diagrama de polos del área analizada.

Informe Levantamiento Estructural

Plano: CN-DI-NV150-190 LI-CR-IR	Coord1 x: 73082.22	Coord2 x: 73661.3
Cotas Min: 150.16 Max: 201.54	Coord1 y: 58278.47	Coord2 y: 57145.06
	Fecha: 2 - 12 - 2022	Usuario: lucia.diaz

Diaclasas(1406 en total)



Fallas(878 en total)

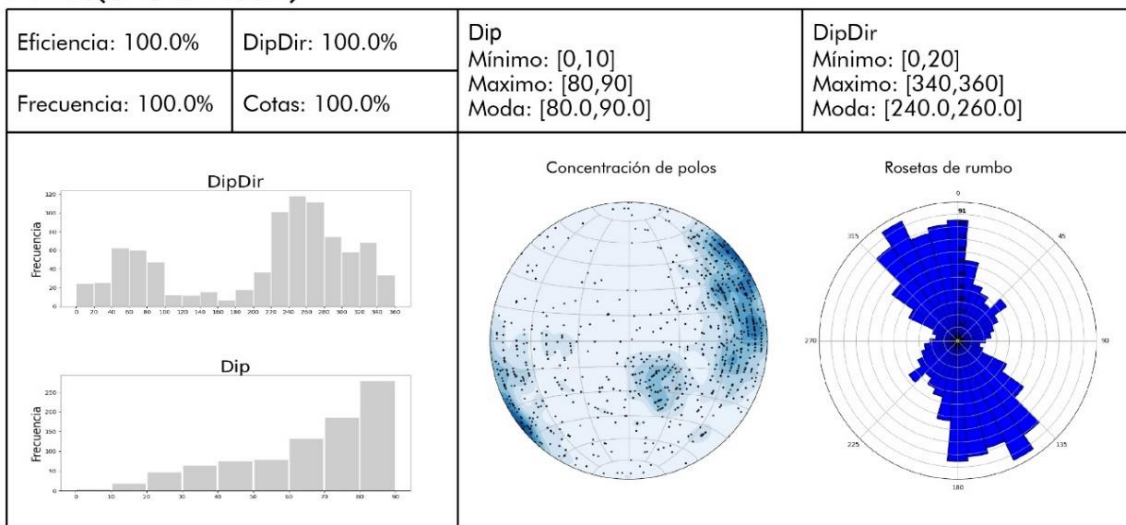


Figura 4.9. Informe Levantamiento Estructural.

Para cada área que se somete al análisis con este informe, nos entrega la cantidad de Diaclasas y la cantidad de Fallas que se utilizaron, además de los porcentajes de elementos que cumplen con tener todos los datos necesarios, frecuencia, dipdir, cotas, etc.

Con estas dos actualizaciones realizadas a GeoRec, más toda la información ya disponible, se procede a hacer el cruce de información mencionado anteriormente.

4.3 METODOLOGÍA PARA ACTUALIZACIÓN DE DOMINIOS

Con la validación del software, se decide crear una metodología que permita realizar una actualización de los dominios estructurales.

Es importante mencionar que esta metodología se aplicó en la mina Candelaria Norte UG, ya que debido a temas internos de la compañía, la revisión para Candelaria Sur, Santos y Alcaparrosa, quedó a cargo de otra área.

En una primera etapa, se recopila toda la información a través de los mapas actualizados para cada nivel, junto con los dominios definidos en años anteriores y los dominios existentes en el rajo Candelaria.

En la siguiente etapa, se crea y revisa la base de datos, la cual, como se mencionó en capítulos anteriores, se hace a través del software GeoRec, subiendo todos los planos y obteniendo los archivos .xls de cada uno.

En una tercera etapa, se obtiene la grilla de rosetas para cada plano, realizando un primer análisis visual, donde sobre cada plano con su grilla de roseta sobrepuesta, se identifican y encierran las zonas que tienen tendencias similares, como se observa en la Figura 4.10, separando estas secciones para luego poder analizarlas con más detalle.

En paralelo, se revisa en conjunto los planos más la litología presente en la mina, para identificar si realmente había alguna influencia importante de ésta sobre las estructuras (Figura 4.11), pudiendo determinar que por la cantidad de datos y el nivel de detalle que se utiliza en la mina, no

existe una influencia litológica digna de ser considerada en la actualización de los nuevos dominios.

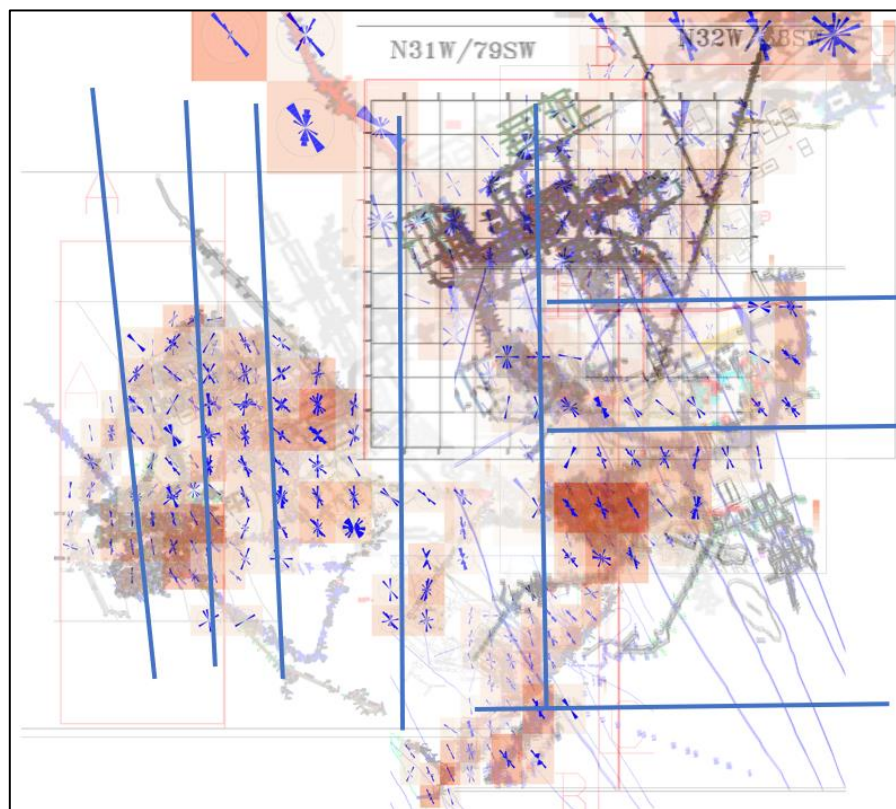


Figura 4.10. Ejemplo de trabajo visual.

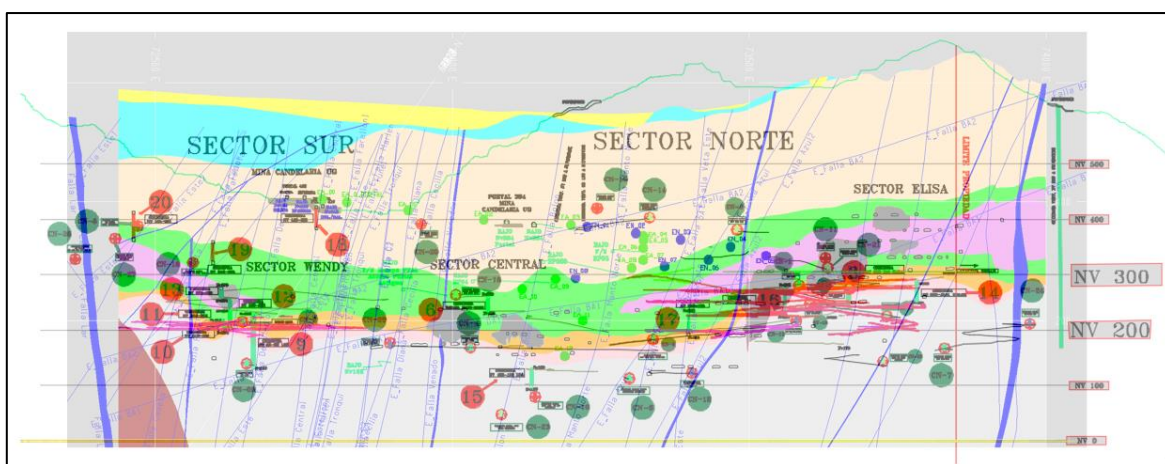


Figura 4.11. Resumen del análisis en vertical para observar influencia de la litología.

Luego se avanza a una siguiente etapa, en la cual se tienen las zonas separadas por sus tendencias y se superponen a estas los dominios estructurales antiguos de la mina subterránea, así como

también los dominios estructurales del rajo, en la zona que se encuentra sobre Candelaria Norte UG, como se ve ejemplificado en la Figura 4.12.

Una vez separadas las zonas, de acuerdo a las tendencias analizadas visualmente, se comienza otra etapa, donde volvemos a utilizar la herramienta de GeoRec, esta vez para tener un Informe de Levantamiento Estructural de cada zona que separamos de forma visual, obteniendo así un resultado cuantitativo de lo anterior, para poder agrupar o separar zonas dentro de los planos, y luego dentro de toda la mina, que en la grilla de rosetas nos pudiesen haber parecido similares o distintas.

Llegando así finalmente, a la obtención de los nuevos dominios estructurales geotécnicos (Figura 4.13), trabajando con toda la data disponible más las herramientas entregadas por GeoRec.

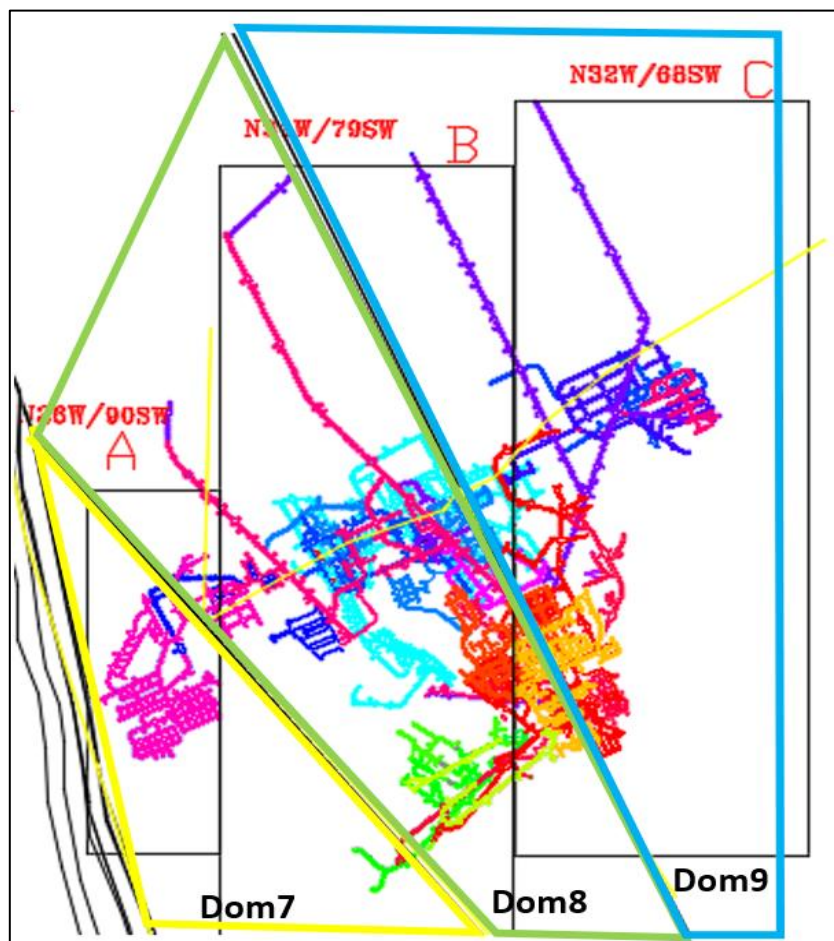


Figura 4.12. Dominios del Rajo con Dominios Candelaria Norte UG.

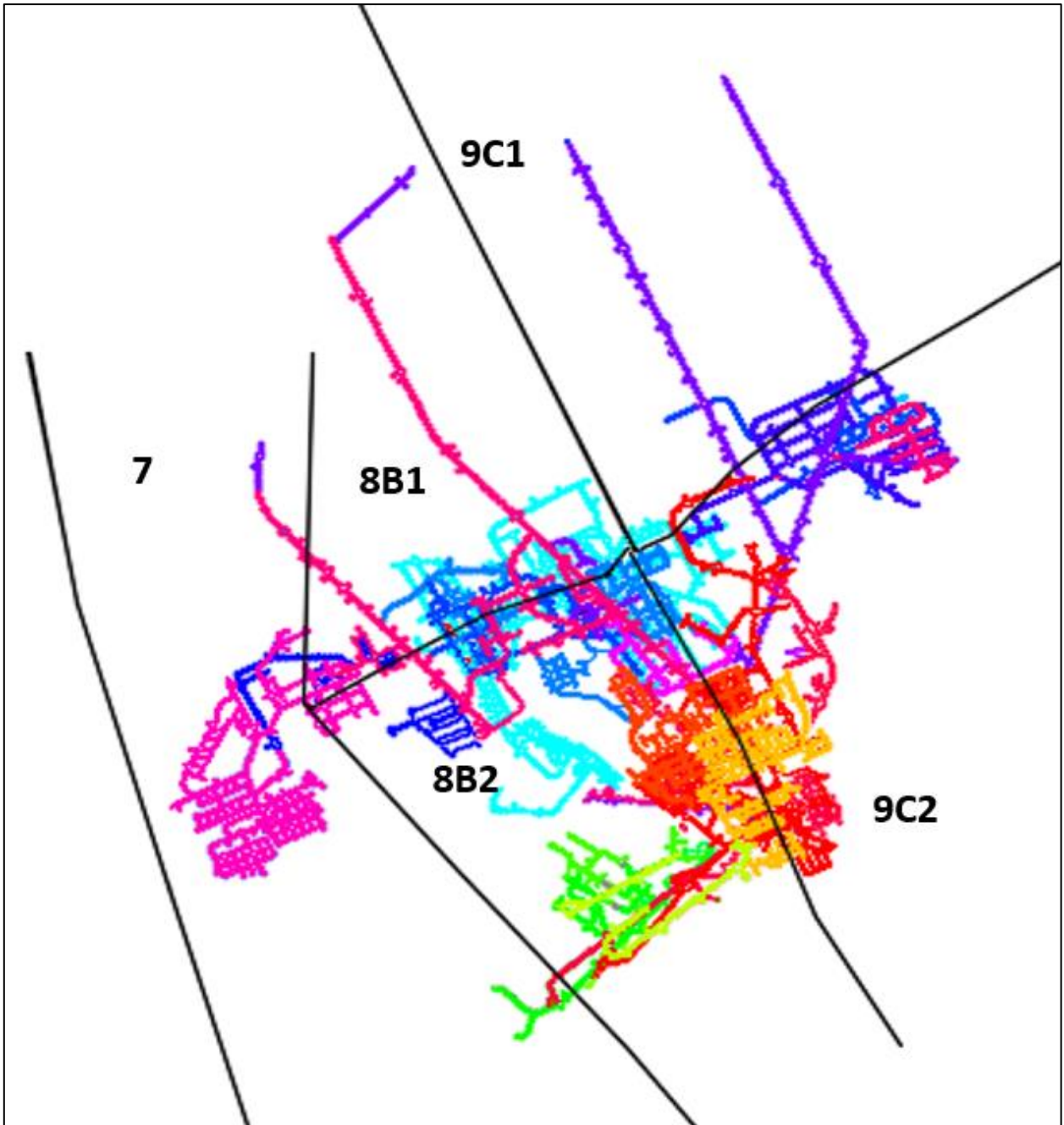


Figura 4.13. Nuevos dominios estructurales geotécnicos.

5. RESULTADOS

Del trabajo realizado, se obtuvo como resultado:

- Una base de datos de estructuras de las 3 minas subterráneas
- Dominios estructurales geotécnicos y la metodología para su realización
- Validación del software GeoRec para su uso en Lundinmining

5.1. BASE DE DATOS

Al término del presente trabajo con GeoRec, se obtuvo una base de datos de estructuras para las 3 minas subterráneas con un total de 93.765 elementos (fallas, diaclasas, vetas, diques) considerando 72 planos analizados (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Resumen planos y elementos de la base de datos, por mina.

MINA	PLANO	FALLA	DIACLASA	TOTAL DE ELEMENTOS
Candelaria UG	30	10.558	20.951	43.029
Santos	21	5.096	16.265	24.294
Alcaparrosa	21	9.063	21.992	35.438
Total	72	24.717	59.208	93.765

Antes de formar esta base de datos con GeoRec, los dominios estructurales se encontraban definidos con análisis de 3.324 elementos entre diaclasas y fallas, lo que corresponde solamente al 19% de la data total.

Luego del trabajo con el software se obtuvo un aumento importante en el número total de datos a 21.714, de los cuales son utilizados 17.571, lo que corresponde al 81% de la data total (Tabla 5.2).

5.2 DOMINIOS ESTRUCTURALES GEOTÉCNICOS

Aplicada la metodología descrita anteriormente, se tiene como resultado la actualización de los dominios estructurales geotécnicos, con 5 dominios nombrados Dom7, Dom8B1, Dom8B2, Dom9C1, Dom9C2, creando estos nombres por ser una actualización basada en los dominios A, B y C ya definidos en Candelaria Norte UG, y los dominios 7, 8 y 9 ya definidos en el Rajo

Candelaria.

Tabla 5.2. Elementos utilizables para análisis en Candelaria Norte UG.

CANDELARIA NORTE				
	Diaclasas (J)	Fallas (F)	Total	Porcentaje
Cantidad total	13.066	8.648	21.714	100
Cantidad total con cotas y dipdir.	10.054	7.517	17.571	81
	En este trabajo		Actualmente en CCMC	
Cantidad total	21.714		desconocido	
Cantidad total con cotas y dipdir.	17.571		3.324	

Como se indica en la metodología, se realizó el análisis para cada dominio, en fallas (Figura 5.1) y diaclasas (Figura 5.2), obteniendo como resultado lo siguiente (Tabla 5.3 y 5.4)

Tabla 5.3. Resumen información de dominios para Diaclasas.

DIACLASAS					
	Dom 7	Dom 8B1	Dom 8B2	Dom 9C1	Dom 9C2
Cantidad de planos	6	7	20	4	13
Cantidad de datos	745	957	4544	354	2352
Tendencia/orientación preferencial	N40W a N45W	N45W	NS a N40W	N30W	NS a N40W

En la Figura 5.3 se tiene un resumen gráfico de los dominios con su ubicación y orientaciones preferenciales en las diaclasas.

Tabla 5.4. Resumen información de dominios para Fallas.

FALLAS					
	Dom 7	Dom 8B1	Dom 8B2	Dom 9C1	Dom 9C2
Cantidad de planos	6	7	20	4	13
Cantidad de datos	918	554	3214	107	1297
Tendencia/orientación preferencial	N20W a N40W	N40W	N40W	N30W	N40W

En la Figura 5.4 se tiene un resumen gráfico de los dominios con su ubicación y orientaciones preferenciales en las fallas.

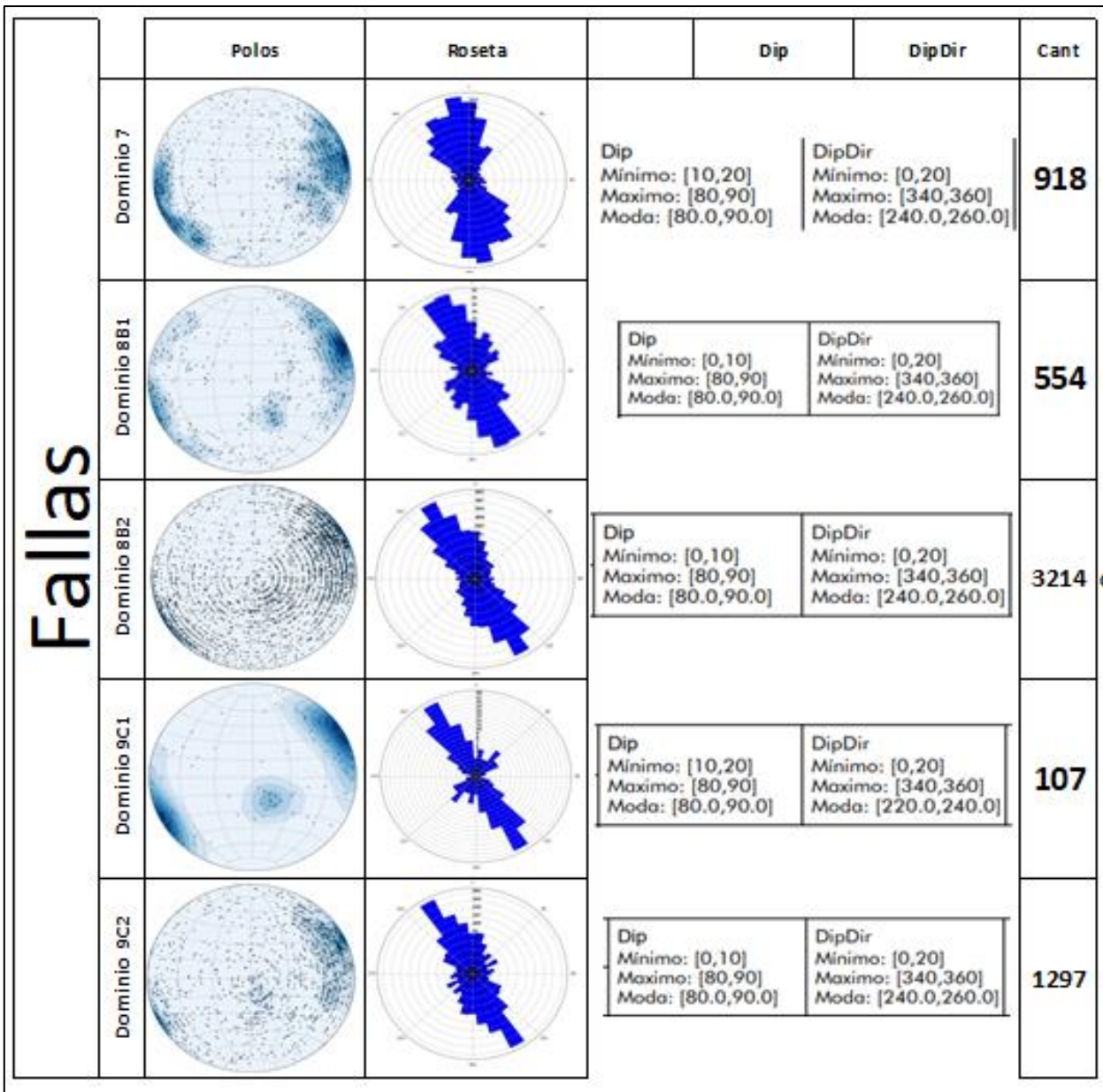


Figura 5.1. Información de fallas para cada dominio estructural.

5.3. VALIDACIÓN SOFTWARE

Durante el desarrollo del software, se trabajó en conjunto de manera continua con Hibring, pudiendo realizar la validación de este (que los datos que entrega son reales, completos y útiles), a través del trabajo de la base de datos. El área de geotecnia UG solicitó que los datos tuvieran un porcentaje de certeza de al menos 80%, es decir, que al menos el 80% de los datos que entrega el software esté identificado con todas sus variables (dip, dipdir, cota, coordenadas, frecuencia, entre otras). Esto se logró al 85% inicialmente, dando por validado el software para su uso en

lundinmining.


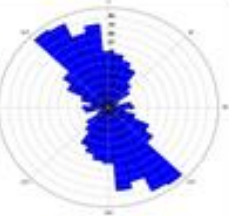

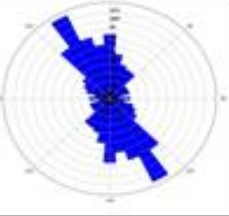

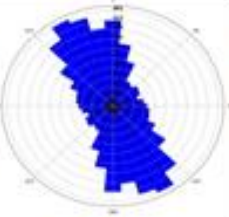

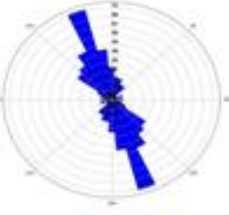

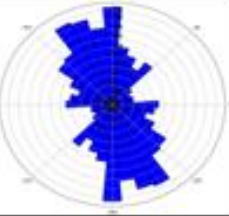
		Polos	Roseta		Dip	DipDir	Cant
		Diaclasas				6 planos	Dip Mínimo: [10,20] Máximo: [80,90] Moda: [80.0,90.0]
				7 planos	Dip Mínimo: [0,10] Máximo: [80,90] Moda: [80.0,90.0]	DipDir Mínimo: [0,20] Máximo: [340,360] Moda: [240.0,260.0]	957
				20 planos	Dip Mínimo: [0,10] Máximo: [80,90] Moda: [80.0,90.0]	DipDir Mínimo: [0,20] Máximo: [340,360] Moda: [240.0,260.0]	4544
				4 planos	Dip Mínimo: [10,20] Máximo: [80,90] Moda: [80.0,90.0]	DipDir Mínimo: [0,20] Máximo: [340,360] Moda: [240.0,260.0]	354
				13 planos	Dip Mínimo: [0,10] Máximo: [80,90] Moda: [80.0,90.0]	DipDir Mínimo: [0,20] Máximo: [340,360] Moda: [260.0,280.0]	2352

Figura 5.2. Información de fallas para cada dominio estructural.

Es importante mencionar, que la incapacidad de contar con toda la información para cada dato, se debe no a errores del software, si no que se producen por el mal ingreso de los datos en la etapa inicial, lo que desemboca en problema de lectura de los planos de autocad, los cuales son el insumo base del software GeoRec, principalmente en el tipeo erroneo de los nombres de las capas utilizadas para guardar los lementos o por dibujo deficiente.

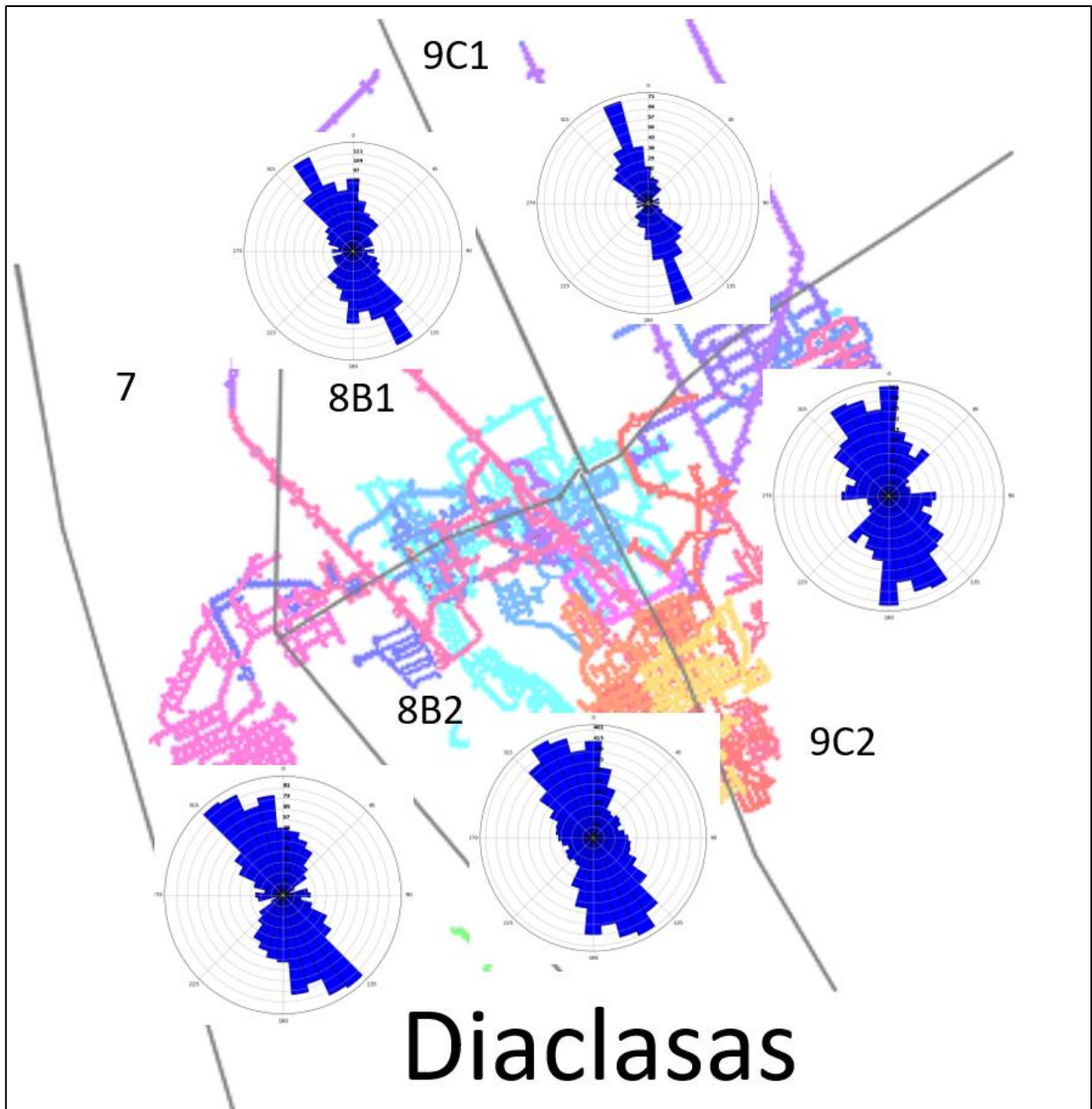


Figura 5.3. Resumen gráfico de los dominios con su ubicación y orientaciones preferenciales en las diaclasas

Junto con la validación del software, se obtuvo nuevas funcionalidades del mismo, como el Informe Levantamiento Estructural y la Grilla de Rosetas, lo cual aportó en aumentar la validez y confiabilidad del mismo.

Posterior al término de este trabajo, la subgerencia de Geotecnia continuó su trabajo con Hibring, obteniendo un 95% de eficiencia en la recuperación de los datos desde planos de AutoCad en Mayo

de 2024, además, con la base de datos ya realizada, comenzaron el estudio de orientaciones preferenciales para el diseño geotécnico de galerías y caserones.

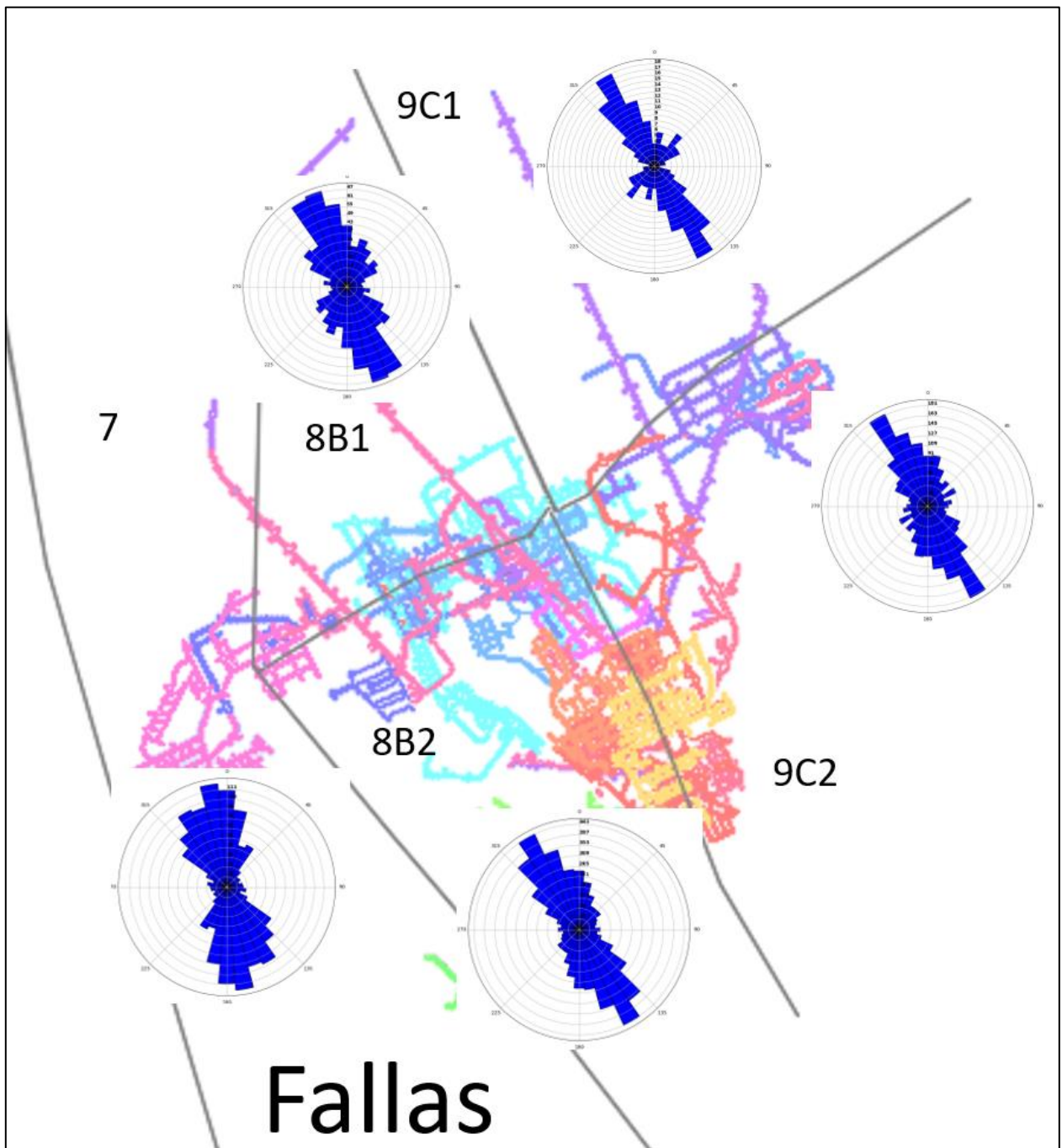


Figura 5.4. Resumen gráfico de los dominios con su ubicación y orientaciones preferenciales en las fallas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez realizado la revisión de los dominios actuales, se determina que, de acuerdo con la data disponible, se encuentran bien enfocados. Pero es necesario realizar la actualización, sobre todo para el área de Geotecnia subterránea, con la nueva inyección de datos que se obtiene con el software GeoRec.

Aun cuando las orientaciones tienen tendencia similar, es importante realizar las subdivisiones dentro del plano general de la mina, para poder enfocar de mejor manera el trabajo, sobre todo de fortificación, que es necesario en este tipo de faenas.

El software es validado como una herramienta útil para la compañía, por lo que se da el visto bueno a su compra e implementación final, siendo utilizado para generar la base de datos y la revisión de los modelos estructurales de las otras minas subterráneas del distrito (Alcaparrosa y Santos).

También se comienza a desarrollar una herramienta accesoria dentro del software que permita el análisis de estructuras del rajo, se recomienda continuar el desarrollo de esta para complementar ambas bases de datos.

Se recomienda realizar mejoras en la estandarización del mapeo y del posterior traspaso a AutoCAD, ya que el cambio en una letra mayúscula a minúscula, o la misma palabra con o sin tilde, genera confusiones en los softwares en general.

También se menciona que es importante mantener en actualización constante la base de datos, ya que con GeoRec el proceso se reduce de semanas de trabajo a horas, por lo que se puede mantener la información casi de manera inmediata cuando es entregado el dibujo en AutoCAD.

Es importante poder utilizar esta revisión de dominios para su aplicación en el diseño de galerías, y así determinar la orientación preferencial de estas, lo cual ayudaría a evitar la potencial formación de cuñas o sobreexcavaciones dentro de los caserones y galerías.

7. REFERENCIAS

ARAYA, R.; SILVA, L. & ORTIZ, F. 1970. Informe geológico y geofísico sobre un programa de cuatro sondajes de exploración realizados en el distrito minero de Punta del Cobre entre Tierra Amarilla y Quebrada Meléndez. Provincia de Atacama. IIG Instituto de Investigaciones Geológicas (inédito): 71 pp. Santiago.

BIESE-NICKEL, W. 1942. La distribución del Cretácico Inferior al Sur de Copiapó-Vallenar. Primer Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología. Tomo II: 429-469 p. Santiago.

CARRIZO, D. & ESPINOZA, R. 2013. Validación y actualización del modelo estructural de la mina Esperanza: reconocimiento de fallas intermedias. Informe interno (inédito): 56 pp. Santiago.

CORVALÁN J. 1974. Estratigrafía del Neocomiano marino de la región al sur de Copiapó, Provincia de Atacama. Revista Geológica de Chile, N° 1: 13-36 p. Santiago.

DEL REAL, I.; THOMPSON, J. & CARRIEDO, J. 2018. Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. Ore Geology Reviews:102 pp.

DÍAZ, R. 1990. Evolución metasomática del área del depósito tipo skarn de Fe, Cu, Au el Bronce, Tierra Amarilla, III Región, Chile., Memoria de Título, Universidad Católica del Norte (inédito): 181 pp. Antofagasta.

GODOY, F. 2019. Actualización y calibración de dominios estructurales del Yacimiento Esperanza, Minera Centinela, Región de Antofagasta, Chile. Informe interno (inédito): 12 pp. Sierra Gorda.

HERRERA, R. 2016. Caracterización geotécnica-estructural, Rajo Esperanza. Informe interno (inédito): 64 pp. Santiago.

HERRERA, R. 2017. Actualización dominios estructurales. Rajo Esperanza. Informe interno (inédito): 5 pp. Santiago

MORTIMER, C. 1970. The Cenozoic history of the southern Atacama desert, Chile. Geological Society of London, Journal Vol 129: 505-526 p. Londres.

MOSCOSO, R; NASI, C & SALINAS, P. 1982. Geología de la hoja Vallenar y parte norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. IIG Instituto de Investigaciones Geológicas. Carta Geológica de Chile N° 55. Santiago.

PASKOFF, R., 1979. Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del norte grande de Chile. Revista de Geografía Norte Grande, Vol 6: 7-22 p. Santiago.

SEGERSTROM, K & RUIZ, C. 1962. Geología del Cuadrángulo de Copiapó, Provincia de Atacama. Escala 1:50.000. IIG Instituto de Investigaciones Geológicas. Carta Geológica de Chile, Vol. 3, N° 1, 115 pp. Santiago.

SEGERSTROM, K; LEVI, B & EHECH, S. 1960. Cuadrángulo Chamonate. Provincia de Atacama. Escala 1:50.000. IIG Instituto de Investigaciones Geológicas. Carta Geológica de Chile N° 3. Santiago.

TILLING, R., 1962. Batholith emplacement and contact metamorphism in the Paipote-Tierra Amarilla area, Atacama Province, Chile. Tesis doctoral (inédito): 195 p. Yale University, Newhaven, Connecticut.

TILLING, R., 1976. El Batolito Andino cerca de Copiapó, Provincia de Atacama. Geología y Petrología. Revista Geológica de Chile N° 3: 1-24 p. Santiago.

ZENTILLI, M. 1974. Geological evolution and metallogenetic relationships in the Andes of Northern Chile between 26° and 29° S. Tesis doctoral (inédito): 394 pp. Queen's University, Kingston, Ontario.