



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ACTUALIZACIÓN DE LOS DOMINIOS  
ESTRUCTURALES PARA EL RAJO DE  
MINERA LOS PELAMBRES**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Geóloga.

Profesor Guía: Gonzalo Bouldres Vargas

Annia Estefanía Andrea Arias Wolf

Copiapó, Chile 2023

*A mi familia y a las mujeres que están en mi entorno más cercano (tías, abuelas, madre, hermana y Elena) que a través de su ejemplo me han enseñado que toda acción que se hace con dedicación y amor, prevalece en el tiempo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a mis tutores Cesar Contreras y Marcelo Gallardo, a las personas que integran el área de geotecnia de MLP por la oportunidad, la confianza y el desafío brindado. A la universidad, por el conocimiento entregado, a mi profesor guía Gonzalo Bouldres por atreverse a innovar, al desarrollar el primer trabajo de titulación que une e integra las carreras de Geología e Ingeniería en Minas en la universidad y a mi familia, por su constante apoyo; en especial a mi padre, por darme siempre la libertad y la confianza para elegir mi propio camino.

A Juan Ignacio R. S., el hombre más guapo, inteligente, respetuoso y auténtico que estos ojos y oídos han tenido la dicha de ver y escuchar, con quien compartí mi vida universitaria de principio a fin. Que, con ilusión, apoyo mutuo, constancia, paciencia, confianza y amor durante el camino recorrido, hoy puedo escribir el término de esta etapa.

Agradezco también a las amistades que establecí durante mi paso por Copiapó y a los profesores de los departamentos de Geología, Ingenierías, Matemáticas y Ciencias Naturales, quienes realizan su labor con dedicación y vocación, transmitiendo esa energía a su entorno.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1.    Objetivo general .....	3
1.2.    Objetivos específicos.....	3
1.3.    Hipótesis .....	3
1.4.    Área de estudio .....	4
1.5.    Antecedentes .....	6
1.5.1.    Minera Los Pelambres (MLP).....	6
1.5.2.    Dominios estructurales del rajo de MLP .....	7
<b>2. MARCO GEOLÓGICO DE LA REGIÓN DE LOS PELAMBRES .....</b>	<b>9</b>
2.1.    Tectónica regional y estratigrafía.....	9
2.2.    Formaciones (Fm).....	12
2.2.1.    Formación Los Pelambres .....	12
2.2.2.    Formación Pachón.....	14
2.3.    Entorno tectomagmático.....	14
2.4.    Alteración y mineralización de Minera Los Pelambres (MLP).....	15
2.4.1.    Stock en Minera Los Pelambres.....	18
2.4.2.    Vetillas en Minera Los Pelambres.....	19
2.4.3.    Brecha hidrotermal (BH).....	21
2.4.4.    Brecha magmática hidrotermal (BMH).....	21
2.5.    Geología estructural .....	21
2.5.1.    Regional.....	21
2.5.2.    Minera Los Pelambres (MLP).....	23
<b>3. UNIDADES GEOTÉCNICAS DE MINERA LOS PELAMBRES .....</b>	<b>25</b>
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>29</b>
4.1.    Análisis de la base de datos de mapeo de bancos.....	30
4.2.    Determinación de las familias estructurales y sus límites geológicos .....	34
4.3.    Contraste de la información estructural de superficie con la del subsuelo.....	35
4.4.    Agrupación de la información de superficie y subsuelo.....	39
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
5.1.    Tamaño de celda para la grilla sistemática .....	43
5.2.    Familias estructurales con información de superficie .....	49
5.3.    Límites geológicos.....	53

5.4.	Estereogramas de sondaje .....	55
5.5.	Validación de las familias estructurales y sus límites .....	56
5.6.	Estereogramas sintéticos.....	57
5.7.	Redefinición de dominios estructurales 2023 de MLP .....	59
6.	<b>DISCUSIONES.....</b>	<b>64</b>
6.1.	Modelo de los dominios estructurales .....	64
6.2.	Direcciones estructurales con mayor densidad en el rajo .....	64
6.3.	Importancia de la corrección de Terzaghi .....	67
6.4.	Relación entre el modelo de los dominios estructurales y las unidades geotécnicas.....	67
7.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
8.	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Ubicación área de estudio, rajo de MLP.....	4
<b>Figura 1.2:</b> Rajo de MLP y sus fases. ....	5
<b>Figura 1.3:</b> Evolución cronológica de los dominios estructurales del rajo de MLP .....	7
<b>Figura 1.4:</b> Dominios estructurales actuales del rajo de MLP .....	8
<b>Figura 2.1:</b> Mapa geológico simplificado del área de Los Pelambres-Frontera.....	11
<b>Figura 2.2:</b> Sección transversal geológica a través de la Fm. Los Pelambres en un área de 25 km al sur de la mina Los Pelambres. ....	13
<b>Figura 2.3:</b> A) Cierre de Pliegue antiformal en Fm Los Pelambres al sur de la mina. Vista mirando al norte. B) Relaciones transversales de lecho (S0) y foliación (F1) para la rama oeste antiforma cerca del taller de camiones en MLP. La foliación corta tanto la Fm Los Pelambres como el Pórfido de Cuarzo Feldespato (PQF). El recuadro muestra un detalle de la foliación (F1) cortando la estratificación (S0) a casi 90 grados .....	13
<b>Figura 2.4:</b> Mapa geológico simplificado del área de Los Pelambres que contiene las secciones transversales B-B' y A-A' .....	17
<b>Figura 2.5:</b> Secciones transversales geológicas de las fases intrusivas del pórfido de cobre-molibdeno de Los Pelambres. (a) Perfil este-oeste. (b) Perfil noroeste-sureste. (c) diorita del stock Los Pelambres. (d) Pórfido B. (e) Pórfido A. ....	18
<b>Figura 2.6:</b> Vista en planta de la distribución de arsénico que refleja el último evento deformacional en el rajo. ....	20
<b>Figura 2.7:</b> Tipos de rocas de fallas definidas por la cohesión, índice ISRM, porcentaje de matriz y tamaño de grano. ....	24
<b>Figura 3.1:</b> Modelo en 3D de UGT del rajo de Minera Los Pelambres. ....	28
<b>Figura 4.1:</b> Mapa de calor en donde la variación de colores, indica la cantidad de datos que existen. ....	31
<b>Figura 4.2:</b> Elementos estructurales (verde) de la base de datos de mapeo de bancos sobre la topografía actual del rajo. ....	32
<b>Figura 4.3:</b> Estereogramas de cada celda. (a) Celda de 100 x 100 m en el rajo, que contiene elementos estructurales. (b) Estereogramas generados con información de elementos estructurales en celdas de 100x100. ....	33
<b>Figura 4.4:</b> División del rajo en diferentes áreas (números de color negro) y Plantillas de tamaño 5x5 usadas para identificar las familias estructurales del rajo de MLP.....	34
<b>Figura 4.5:</b> a) perfil de sondajes (líneas azules) y topografía actual del rajo interceptada por 2 elementos geológicos: mineralización secundaria (amarillo) y primaria (verde). b) perfil de sondajes (líneas azules) y topografía bajada 150m de su elevación actual elevación.....	36

<b>Figura 4.6:</b> Ejemplo de un área del rajo donde un estereograma de sondaje tiene y no tiene corrección de Terzaghi. ....	37
<b>Figura 4.7:</b> Estereogramas de una misma área del rajo en superficie y subsuelo. ....	38
<b>Figura 4.8:</b> Planilla de Rocscience para generar los estereogramas sintéticos.....	42
<b>Figura 5.1:</b> Histogramas de las 4 fases del rajo de MLP, para observar la dispersión de los datos (distancias).....	44
<b>Figura 5.2 a:</b> Histogramas de la fase 7 y 9, a una distancia menor o igual de 300 metros del rajo de MLP .....	45
<b>Figura 5.2 b:</b> Histogramas de la fase 10 y 11, a una distancia menor o igual de 300 metros del rajo de MLP .....	46
<b>Figura 5.3:</b> Estadísticas descriptiva de las 4 fases del rajo de MLP.....	47
<b>Figura 5.4:</b> Diagramas de Boxplot de las 4 fases del rajo de MLP, para observar la dispersión de los datos (distancias) .....	48
<b>Figura 5.5:</b> Orientaciones de las familias principales estructurales y sus áreas en el rajo de MLP .....	49
<b>Figura 5.6:</b> Áreas estructurales con familias principales del rajo de MLP .....	51
<b>Figura 5.7:</b> Áreas estructurales con información de superficie del rajo de MLP.....	52
<b>Figura 5.8:</b> Límites de elementos geológicos que calzan con las áreas estructurales en diferentes vistas. (a) Vista de perfil. (b) Vista en planta .....	53
<b>Figura 5.9:</b> Elementos geológicos y áreas estructurales en el rajo de MLP. (a) Límites de elementos geológicos que calzan con las áreas estructurales. (b) áreas estructurales. (c) límites de geológicos más los límites de las áreas estructurales.....	54
<b>Figura 5.10:</b> Estereogramas de subsuelo de cada área con y sin corrección de Terzaghi. ....	55
<b>Figura 5.11:</b> Diagramas de roseta de superficie y subsuelo de cada área estructural que muestra las direcciones (línea roja) familias principales de superficie. ....	56
<b>Figura 5.12:</b> Estereogramas sintéticos de cada área estructural. ....	58
<b>Figura 5.13:</b> Dominios estructurales de MLP para el año 2023.....	60
<b>Figura 6.1:</b> Elementos estructurales con mayor densidad en el rajo, superpuestos a dos rocas andesita y diorita .....	65
<b>Figura 6.2:</b> Mapa de calor, en el cual se genera un estereograma con la familia con mayor densidad de datos estructurales (50-70°/120-140°).....	66
<b>Figura 6.3:</b> Unidades geotécnicas (UGT) en los diferentes dominios estructurales.....	69

## ÍNDICE DE DIAGRAMA Y TABLAS

<b>Diagrama 4.1:</b> Metodología que se utilizó en este trabajo.....	29
<b>Tabla 4.1:</b> Datos de las familias estructurales de los estereogramas de superficie (SUP) y sondaje (SOND) por área estructural.....	40
<b>Tabla 5.1:</b> Detalle de las familias estructurales que contienen los dominios estructurales de MLP .....	63

## **RESUMEN**

En la presente memoria se realizó una actualización los dominios estructurales para el rajo de Minera Los Pelambres (MLP), para esto se ocuparon 2 tipos de información, para superficie se utilizó bases de datos de mapeo de bancos y para la del subsuelo se ocupó la de sondajes geotécnicos. Con esta información se obtuvo las orientaciones de las estructuras presentes en el rajo de MLP. Donde en primer lugar, se divide la información estructural superficie en una grilla sistemática y en cada celda se generó un estereograma ocupando el software DIPS, esto se realizó hasta cubrir el rajo por completo. Luego se buscaron en los estereogramas las familias estructurales más representativas y con esto se generaron áreas estructurales en el rajo. Los límites de estas se correlacionaron con elementos geológicos a través del modelo LAM (litología, alteración y Mineralogía) todo esto se realizó con el software Vulcan. Estas áreas estructurales de superficie se validaron con la información de subsuelo y finalmente se definieron los 9 dominios estructurales el rajo de MLP, el cual contiene en todos los estereogramas la familia estructural NE que presenta el último evento deformacional en el rajo de MLP. Los Dominios estructurales tienen como finalidad un uso operacional, en el área de perforación y tronadura, se ocupan para definir la orientación de la secuencia de iniciación; en el área de Geotecnia se usa para calcular el ancho de berma y para análisis de estabilidad del talud. Por lo que es relevante al momento de establecerlos considerar las pequeñas variaciones estructurales que se encuentran en el rajo, ya que dependiendo en la zona espacial que se encuentren pueden ser las que ocasionen la mayor inestabilidad en el talud y esto afecta directamente a la operación en el rajo de MLP.

**Palabras clave:** Dominios estructurales, estereogramas, Dip, Dip direction, Mapeo de bancos, rajo de MLP.

## **SUMMARY**

In this report, an update was carried out on the structural domains for the Los Pelambres mining pit (MLP). For this, 2 types of information were used: for the surface, bank mapping databases were used and for the subsoil, the of geotechnical drilling. With this information, the orientations of the structures present in the pit were obtained MLP. Where first the surface structural information is divided into a systematic grid and in each cell a stereogram was generated using the DIPS software, this was done until the pit was completely covered. Then the most representative structural families were searched in the stereograms and with this structural areas were generated in the pit. The limits of these were correlated with geological elements through the LAM model (lithology, alteration and Mineralogy). All this was done with the Vulcan software. These surface structural areas were validated with subsurface information and finally the 9 structural domains of the MLP pit were defined, which contain in all stereograms the NE structural family that presents the last deformational event in the MLP pit. The structural Domains are intended for operational use, in the drilling and blasting area, they are used to define the orientation of the drilling mesh; In the Geotechnics area it is used to calculate the berm width and for slope stability analysis. Therefore, it is relevant when establishing them to consider the small structural variations found in the pit, since depending on the spatial area they are found, they may be the ones that cause the greatest instability in the slope and this directly affects the operation in the pit of MLP.

**Keywords:** Structural domains, stereograms, Dip, Dip direction, Bank mapping, MLP pit.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realizó una actualización de los dominios estructurales para el rajo de Minera Los Pelambres (MLP), el cual se debe hacer cada cuatro años aproximadamente, esto se debe que a medida que avanza la operación en el rajo, este se va modificando en extensión y área de trabajo, lo que conlleva que se tomen en cuenta nuevas estructuras y otras dejen de pertenecer al rajo, esto último trae como consecuencia una modificación de los dominios estructurales. Estos son de gran importancia, ya que se utilizan en diversas áreas entre ellas geotecnia, para el análisis a escala de banco e inter-rampa, como también para el área de perforación y tronadura, para la planificación del diseño de tronadura.

Como objetivo general del presente trabajo es generar la actualización de los dominios estructurales para el rajo de Minera Los Pelambres (MLP), considerando la información a partir del año 2014 de elementos geológicos levantados en superficie y subsuelo, esto se realizó en primer lugar por medio de un análisis de la base datos de mapeos de bancos, con la información que contiene se generó un mapa de calor, estadística descriptiva, histogramas y diagramas de Boxplot que son útiles para la visualizar la dispersión de datos, con este análisis se eligió un tamaño de celda correcto que cubrirá la totalidad del rajo, con los datos desagrupados según el tamaño de celda escogida, se crean estereogramas por medio del software DIPS v 7.0 en cada celda hasta cubrir la totalidad del rajo, luego se procedió a buscar las familias estructurales más representativas de este, con el objetivo de definir áreas en el rajo que contengan a cada una de ellas. Estas áreas se digitalizaron en el software Vulcan, para contrastarlas con la información de elementos geológicos existentes en el rajo los cuales son litologías, alteraciones, mineralización y estructuras para buscar si existe alguna correlación entre los límites de las familias estructurales con los límites de cada elemento geológico. Una vez definidos estos límites, se contrasta la información de superficie con la base de datos del subsuelo, por medio de bases de datos de sondajes que datan del año 2018 hasta la actualidad. Para seleccionar la parte del largo del sondaje que considerara para el estudio, se tomó como criterio bajar la topografía actual 150 metros en el software Vulcan, esto se realizó con el fin de tomar en

cuenta la parte del largo del sondaje que esta entre la topografía bajada y los elementos geológicos anteriormente interceptadas con la topografía.

Una vez definidos los largos de los sondajes se evalúa que sondaje pertenece a cada área estructural, para luego desagrupar la base de datos de los sondajes según las áreas estructurales a las cuales pertenece, ya separadas estas bases de datos se utilizó las traversas en DIPS de cada una de las familias estructurales identificadas anteriormente. Con estas traversas, se hace la corrección de Terzaghi que ayudo a eliminar el sesgo presente en la información y generar los estereogramas del subsuelo. Con estos estereogramas se valida o se rechaza, si la información estructural de superficie posee una similitud con la del subsuelo. Al ser validada, se procede a unir la información estructural de subsuelo con la superficie de cada área igualando sus soportes, para esto se crean estereogramas sintéticos con la información de las familias estructurales de sondaje, igualando el soporte con las familias estructurales que son semejantes en superficie y que pertenecen a la misma área, finalmente esta información de superficie y subsuelo se unió para así establecer los estereogramas representativos de cada dominio estructural para el rajo de Minera Los Pelambres.

### **1.1. Objetivo general**

Actualizar los dominios estructurales para el rajo de Minera Los Pelambres (MLP), incorporando información a partir del año 2014 de elementos geológicos que se encuentran levantados en superficie y en el subsuelo.

### **1.2. Objetivos específicos**

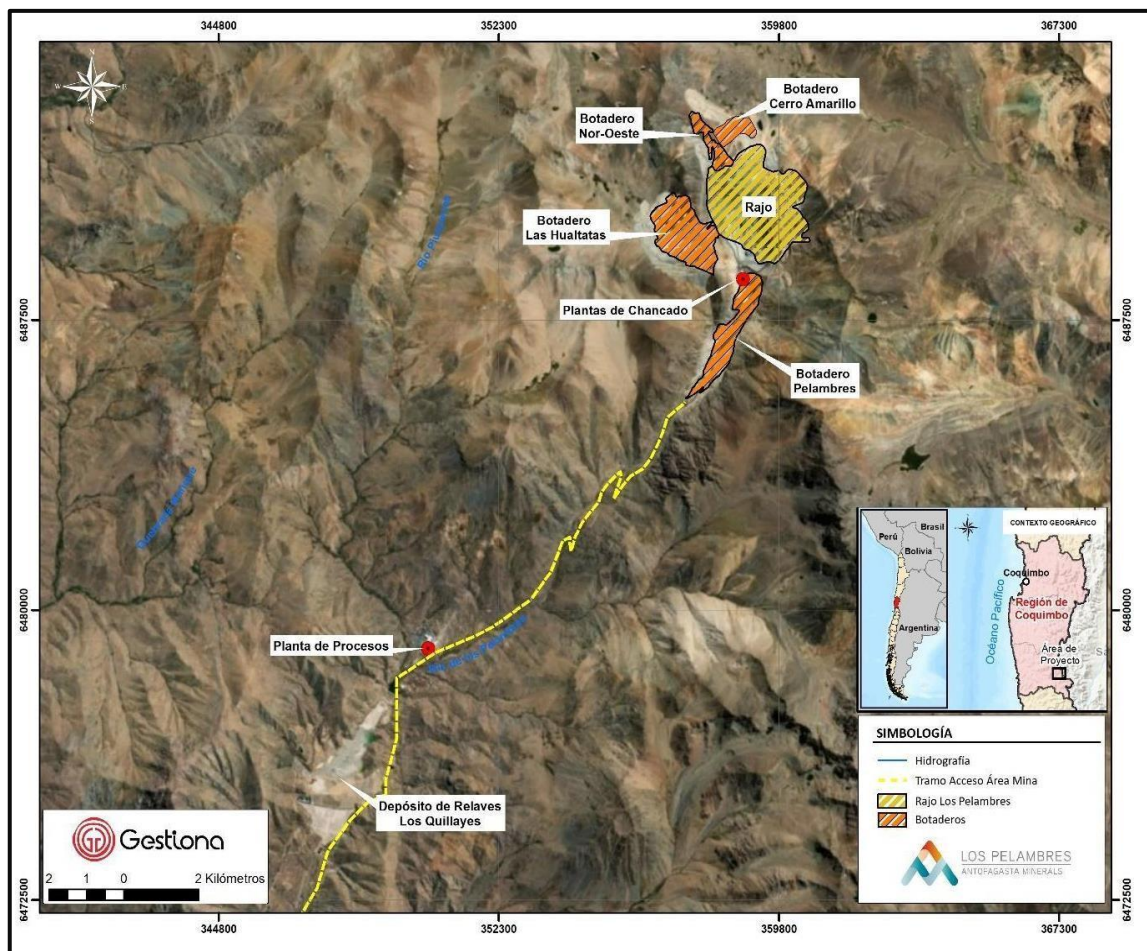
- Analizar la información de tipo estructural de la base de Mapeo de bancos de MLP.
- Determinar los patrones de orientación de las estructuras geológicas existentes en el rajo generando así familias estructurales.
- Establecer una zonificación dentro del rajo a partir de las familias estructurales.
- Correlacionar la información estructural con la información de elementos geológicos del rajo para definir los límites de los dominios.
- Contrastar la información de sondaje con la de superficie (Mapeo de bancos).
- Establecer los dominios estructurales de MLP 2023.

### **1.3. Hipótesis**

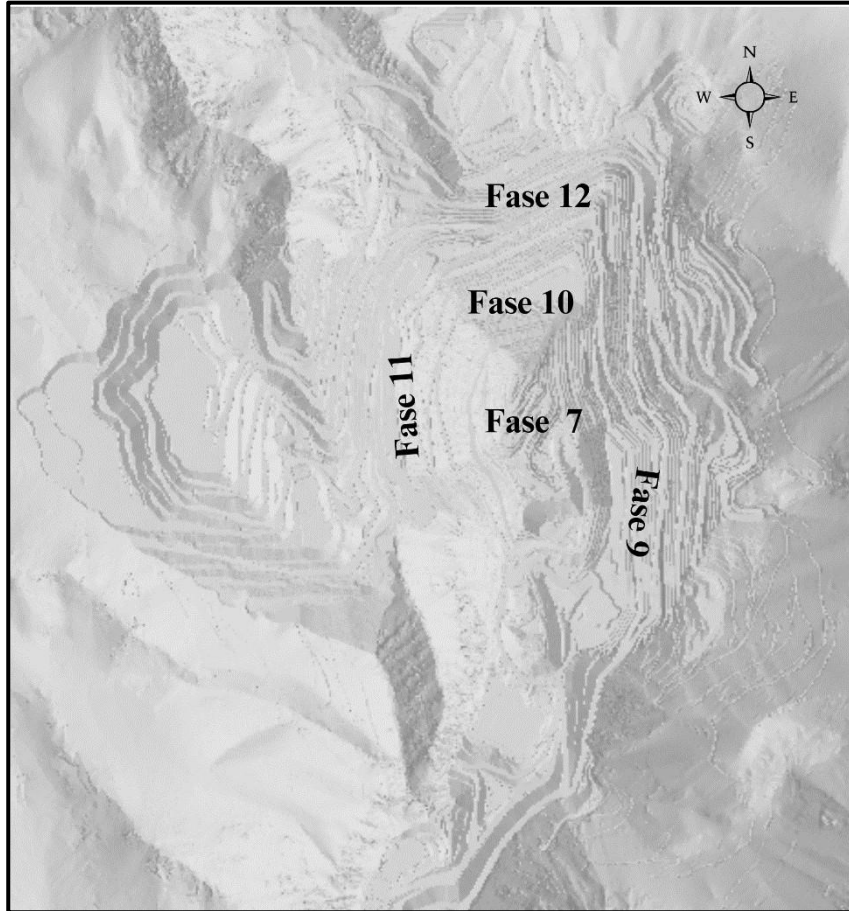
Al extrapolar la información de las orientaciones de las estructuras geológicas de superficie (Mapeo de bancos) con la de sondajes, se establece una relación con la geología estructural y/o elementos geológicos existentes en el rajo.

## 1.4. Área de estudio

Minera Los Pelambres posee un método de explotación a cielo abierto y se encuentra ubicada en la localidad de Salamanca, Región de Coquimbo, Chile a elevaciones entre 3200 y 3600 m s.n.m. Es un yacimiento tipo pórfido de Cu y Mo, donde el lugar de estudio de este trabajo se centra en el rajo de MLP, que se encuentra específicamente en las coordenadas UTM E 355681.71 m, S 6492121.19 m; E 360292.37 m, S 6492332.18; E 356130.99 m, S 6486427.9 m y E 360952.39, S 6486827.81 m (Figura 1.1). El rajo de MLP actualmente está dividido en 5 fases (Figura 1.2), que son fase 7, 9, 10, 11 y 12 el orden de estas fases es según su ocurrencia y sirven para poder ubicarse espacialmente dentro del rajo.



**Figura 1.1:** Ubicación área de estudio, rajo de MLP. De Gajardo, 2019.



**Figura 1.2:** Rajo de MLP y sus fases. Elaboración propia

## **1.5. Antecedentes**

### **1.5.1. Minera Los Pelambres (MLP)**

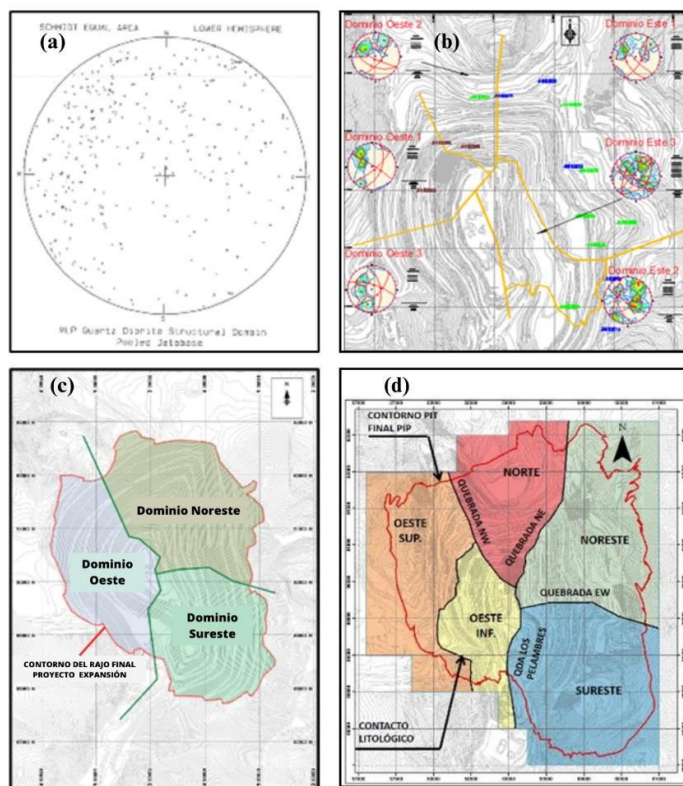
Minera Los Pelambres es una compañía de Antofagasta Minerals que pertenece al Grupo Antofagasta plc y es uno de los diez mayores productores de cobre del mundo (Antofagasta Minerals, 2022).

La propiedad de la compañía de Minera Los Pelambres corresponde en un 60% a Antofagasta Minerals y un 40% a un consorcio de empresas japonesas, que está compuesto por un 25% por Nippon LP Investment y un 15% a Marubeni & Mitsubishi LP Holding BV. Esta compañía posee un yacimiento del tipo porfido de cobre y molibdeno en el cual su método de explotación es cielo abierto extrayendo principalmente sulfuros y oro como subproducto del cobre. Su yacimiento posee una ley promedio de 0,51% Cu, dedicada a la producción de concentrado de cobre que contiene como subproducto principal oro y concentrado de molibdeno, esto se obtiene mediante un proceso de molienda y flotación. Las instalaciones de la compañía recorren 120 Km de cordillera a mar pasando por las comunas de Salamanca, Illapel y Los Vilos donde se encuentra su puerto de embarque en el sector de Punta Chungo (Antofagasta Minerals, 2022).

En el año 2022, Minera Los Pelambres produjo 275.000 toneladas de concentrado de cobre. De esta manera, mantiene el liderazgo entre las cuatro operaciones del Grupo Antofagasta Minerals en Chile con un poco más de 50% de la producción anual en Chile. Los principales mercados a los que va destinada la producción de cobre de Antofagasta Minerals son Japón (35%); China (29%); resto de Asia (19%) y Europa (12%) (Antofagasta Minerals, 2022).

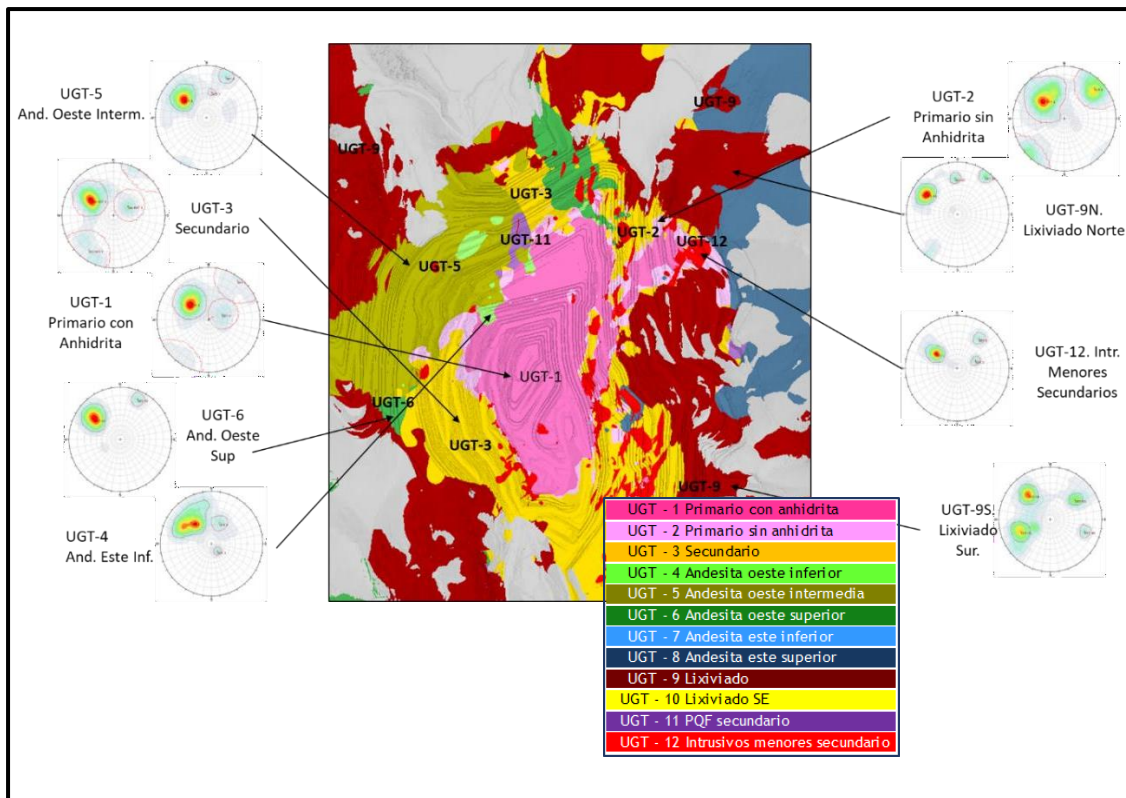
### 1.5.2. Dominios estructurales del rajo de MLP

La historia de los dominios estructurales en MLP parte del año 1999 a cargo de Call & Nicholas (C&N) el cual estableció un solo dominio estructural para el rajo de MLP representado en una red de Smith, luego en el 2012 a cargo de MLP en cual sus límites se definieron usando la geomorfología y geología que contenía el rajo en ese momento, en el 2013 estuvo a cargo de E-Minining Technology (EMT) donde sus límites son geomorfológicos y este tenía como objetivo desarrollar un estudio de prefactibilidad Proyecto Expansión, 2015 a cargo de EMT donde sus límites son geomorfológicos y litológicos, este se realizó para un Proyecto Integrado Pelambres (PIP) y la que está actualmente desde del año 2018 a cargo de Geo Control. Los dominios estructurales (Figura 1.3) se han definido a lo largo de su historia a través de rasgos morfológicos (quebradas), contactos litológicos, unidades geotécnicas y elementos estructurales a escala mina durante la historia de la Minera (Contreras, 2022).



**Figura 1.3:** Evolución cronológica de los dominios estructurales del rajo de MLP. C&N- 1999. (b) MLP-2012. (c) EMT 2013. (d) EMT 2015.

Los dominios estructurales actuales de MLP que datan del 2018 (Figura 1.4) estuvieron a cargo de Geo Control, están asociados a las distintas unidades geotécnicas, estos fueron construidos a partir de información de superficie y de sondajes geotécnicos, considerando las variaciones que tiene el sistema estructural principal NE dentro del rajo (GEOCONTROL, 2018).



**Figura 1.4:** Dominios estructurales actuales del rajo de MLP. De GEOCONTROL, 2018.

## 2. MARCO GEOLÓGICO DE LA REGIÓN DE LOS PELAMBRES

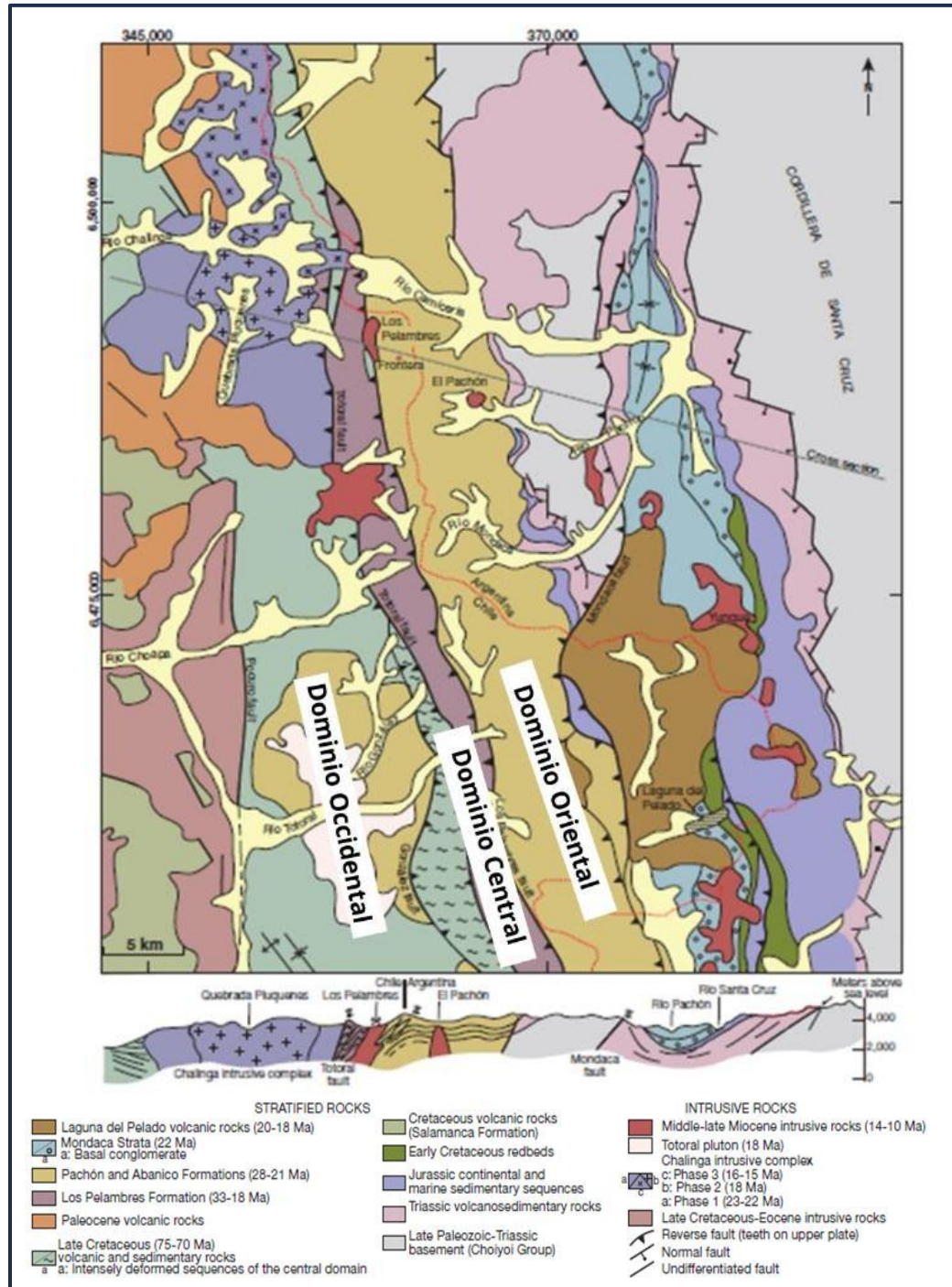
### 2.1. Tectónica regional y estratigrafía

La Minera Los Pelambres se ubica en la localidad de Salamanca, Región de Coquimbo, Chile entre 3200 y 3600 m sobre el nivel del mar. Es un yacimiento tipo pórfido de Cu y Mo, que se explota por el método de explotación a cielo abierto. Se encuentra en la Faja Mioceno al Plioceno temprano de Chile central, que se ubicado específicamente en la región Los Pelambres, esta región se divide en tres dominios tectónicos (Figura 2.1) que están limitados por fallas inversas de alto ángulo de dirección N a NO que son la falla Los Pelambres con vergencia E, falla Totoral con vergencia W y falla Gonzáles con vergencia E (Perelló et al., 2012).

- **Dominio oriental:** Al este de la falla inversa Los Pelambres con vergencia E, existe un gran bloque de basamento de la Cordillera de Santa Cruz, compuesto por riolita del Paleozoico tardío y toba félsica junto con granitoides (Álvarez, 1996). En el lado chileno de la frontera, en la Laguna del Pelado, estos estratos están discordantemente cubiertos por >400 m de flujos de lava andesítica subhorizontal con hornblenda, que proporcionan edades en circón U-Pb entre  $21,3 \pm 0,4/-0,3$  y  $18,3 \pm 0,4$  Ma (Perelló et al., 2009). Estos flujos de lavas andesíticos y basálticos forman un cinturón bien definido que contiene piroxeno  $\pm$  olivino e intercalaciones menores de toba félsica la cual se extiende continuamente a lo largo de la gran región de Los Pelambres durante ~60 km y constituye la Fm. Pachón (Fernández et al., 1974; Lencinas y Tonel, 1993). Cerca de Los Pelambres, así como al este de la frontera internacional, esta unidad arroja edades U-Pb en circón entre  $21.69 \pm 0.26$  y  $22.7 \pm 0.2$  Ma y, en el rajo Los Pelambres, está intruida por dacita de edad de circón U-Pb de  $21,36 \pm 0,80$  Ma (Perelló et al., 2009). La Fm. Pachón es la unidad más occidental del dominio oriental, y en toda el área está delimitada hacia el oeste por la falla Los Pelambres (Perelló et al., 2012).

- **Dominio central:** Se extiende a ambos lados de la frontera internacional y corresponde a una zona de ~5 km de ancho, delimitada por la falla Los Pelambres al W y falla Gonzáles/Total al E, de flujos de lava y tobas andesíticas a basálticas fuertemente deformadas, estratos epiclásticos fluviales y caliza lacustre local de La Fm. Pelambres (Rivano y Sepúlveda, 1991), así como astillas tectónicas de rocas volcánicas del Cretácico. El dominio definido y delimitado por las fallas Los Pelambres y Total con vergencia al E y González con vergencia al W, está intensamente deformado, como lo indican los estratos verticales y volcados, los lentes tectónicos, delimitadas por cabalgamientos, y los pliegues subisoclinales. Las edades en circón U-Pb recién obtenidas para la Fm. Los Pelambres, van desde  $33,4 \pm 0,5$  hasta  $18,0 \pm 0,4$  Ma (Perelló et al., 2012).
- **Dominio occidental:** Al W de las fallas Total y González, el dominio occidental comprende una secuencia de >2 km de espesor, con buzamiento suave hacia el E, de rocas continentales volcánicas, volcansedimentarias y sedimentarias de edad Cretácico, incluida la Fm. Salamanca (Rivano y Sepúlveda, 1991) y otras unidades indiferenciadas. La falla de Pocuro con buzamiento pronunciado, definida por primera vez más al sur en el centro de Chile, constituye el contacto tectónico entre la Fm. Salamanca al W y las otras unidades volcánicas más al E, que se deforman más intensamente al acercarse al centro del dominio. La cuña tectónica de rocas volcánicas del Cretácico entre las fallas Total y González es un ejemplo de deformación intensa. Las rocas volcánicas expuestas al este de la falla Pocuro arrojan edades en circón U-Pb entre 75 y 70 Ma, similar a la edad de  $70,10 \pm 1,50$  Ma obtenida de la toba riolítica en Los Pelambres. Las rocas volcánicas del Cretácico del dominio occidental están cubiertas discordantemente al noroeste de Los Pelambres por secuencias volcánicas andesíticas del Paleoceno y en Río Total, por rocas similares del Oligoceno tardío al Mioceno temprano. Inmediatamente al sur del área cubierta, posee rocas de edades en circón U-Pb de  $24,9 \pm 0,5$  y  $22,2 \pm 0,4$  Ma (Perelló et al., 2012) y están correlacionadas más al

norte de la Fm. Abanico, ampliamente distribuidas más al sur (Charrier et al., 2002).



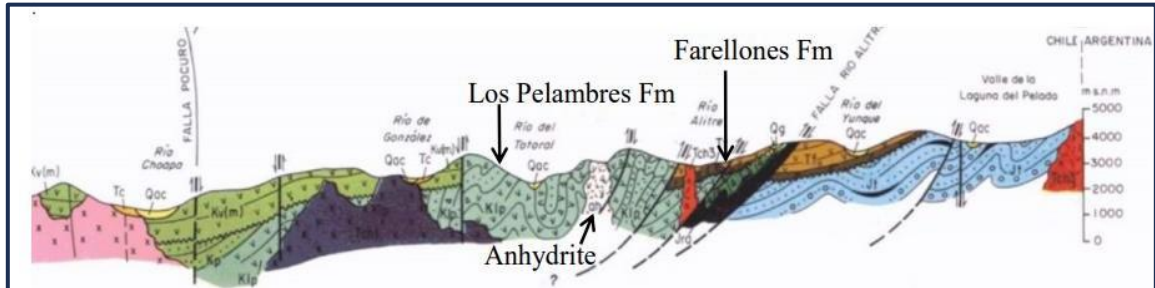
**Figura 2.1:** Mapa geológico simplificado del área de Los Pelambres-Frontera. De Perelló et al., 2012.

## **2.2. Formaciones (Fm)**

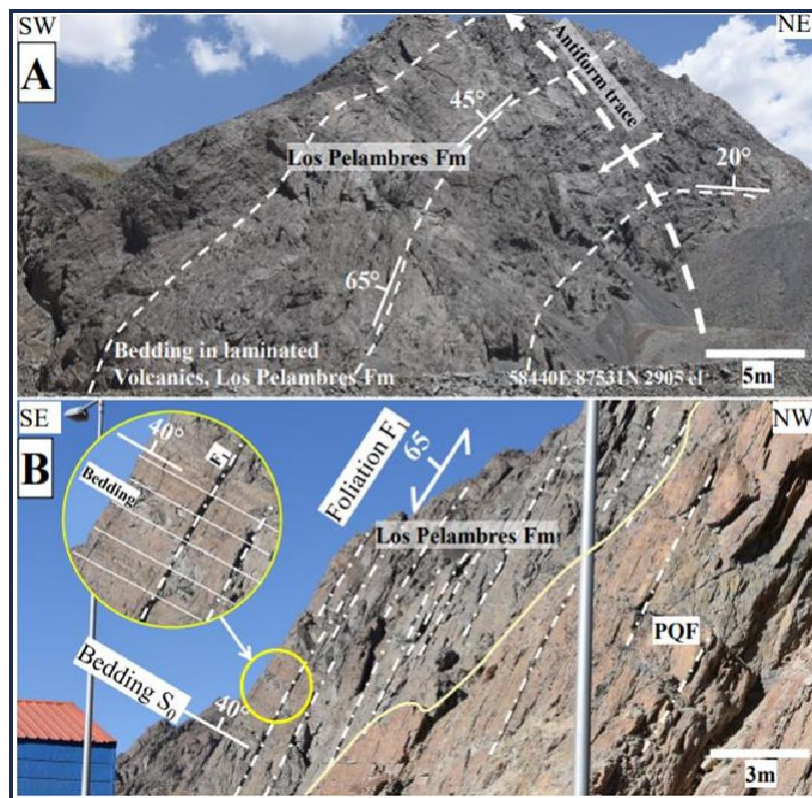
### **2.2.1. Formación Los Pelambres**

La Fm Los Pelambres es una de las formaciones más antiguas dentro del rajo MLP de edad de 33-18 Ma, (Oligoceno a Mioceno) se encuentra al oeste de la mina y consiste en rocas estratificadas que poseen un miembro superior volcánico y uno inferior sedimentario, estos tienen una actitud monoclinas de rumbo N-S y con manteos subverticales de 80° a 85° y 45° a 50° al oeste. Su miembro superior son lutitas y areniscas finas con intercalaciones de lavas y brechas andesíticas, con estratificación bien definidas en bancos. Su miembro inferior es una secuencia de sedimentitas finas y gruesas, con estratificación definida en capas centimétricas a métricas. Este paquete de rocas se depositó en un entorno de cuenca extensional. El cual sufrió un periodo deformacional por un acoplamiento compresional E-W entre 18-14 Ma, esto último generó un plegamiento N-S y posiblemente algunas fallas, un segundo episodio de deformación extensional E-W parece ser coetáneo con la intrusión del stock de Pelambres (diorita) de 14-10 Ma (Fedorowich, 2021). Esta deformación progresiva dio como resultado una serie de cizallamiento y zonas de foliación predominantemente hacia el SE que sobreimpusieron las rocas intrusivas antes de su cristalización desarrollándose así fallas en el borde este de la Fm Los Pelambres, la cual posee un movimiento inverso y diaclasas frágiles a semi-frágiles en una etapa tardía de la deformación, en parte reutilizando dominios donde ya se había desarrollado una foliación intensa y creando así una sección transversal (Rivano y Sepúlveda, 1986), que contiene complicados pliegues volcados dentro de la Fm. Los Pelambres (Rivano y Sepúlveda, 1991), que se describe como una sección intensamente plegada cerca del Río del Totoral, y han se ha interpretado una discordancia angular de la Fm. Los Pelambres, que es cortada por un domo de monzodiorita de la Unidad Río Cerro Blanco de 15,4 Ma (Figura 2.2). Esta formación queda expuesta en la pared rocosa al oeste de las oficinas de la mina y el taller de camiones, donde se observan pliegues con buzamiento al oeste que continuaría unos 600 m hacia el oeste se detecta plegamiento dentro de la Fm. Los Pelambres al sur y oeste de la mina, y también al NE (Figura 2.3). En cuanto a la falla los Pelambres, es una estructura

discontinua que no pasa en absoluto dentro del rajo y no corta la andesita de la Fm Los Pelambres en el rajo (Fedorowich, 2021).



**Figura 2.2:** Sección transversal geológica a través de la Fm. Los Pelambres en un área de 25 km al sur de la mina Los Pelambres. De Rivano y Sepúlveda, 1986.



**Figura 2.3:** A) Cierre de Pliegue antiforme en Fm Los Pelambres al sur de la mina. Vista mirando al norte. B) Relaciones transversales de lecho (S<sub>0</sub>) y foliación (F<sub>1</sub>) para la rama oeste antiforma cerca del taller de camiones en MLP. La foliación corta tanto la Fm Los Pelambres como el Pórfido de Cuarzo Feldespato (PQF). El recuadro muestra un detalle de la foliación (F<sub>1</sub>) cortando la estratificación (S<sub>0</sub>) a casi 90 grados. De Fedorowich, 2021.

### **2.2.2. Formación Pachón**

Es un cinturón bien definido de flujos de lava basáltica a andesítica porfírica de grano fino con edad en circón U-Pb  $22.7 \pm 0.2$  Ma, andesítica afanítica con edad en circón U-Pb de  $21.69 \pm 0.26$  Ma, con contenido de piroxeno  $\pm$  olivino e intercalaciones. Es un cinturón bien definido de flujos de lava basáltica a andesítica porfírica de grano fino con edad en circón U-Pb  $22.7 \pm 0.2$  Ma, andesítica afanítica con edad en circón U-Pb de  $21.69 \pm 0.26$  Ma, con contenido de piroxeno  $\pm$  olivino e intercalaciones menores de toba félsica se extiende continuamente a lo largo de la gran región de Los Pelambres durante ~60 km y constituye la Fm. Pachón de edad 23- 21 Ma (Fernández et al., 1974). Esta formación es la unidad más occidental del dominio oriental, y toda el área está delimitada hacia el W por la falla Los Pelambres, donde estructuralmente existen anticlinales de flujos andesíticos masivos y brechas de flujo tienen buzamiento suave a abrupto ( $20^{\circ}$ – $70^{\circ}$ O), mientras que rocas epiclásticas con buzamiento moderado a abrupto ( $50^{\circ}$ – $80^{\circ}$ O) (Perelló et al., 2012) (Figura 2.1).

### **2.3. Entorno tectomagmático**

El magmatismo intrusivo del Meso-Cenozoico está abundantemente desarrollado en el dominio occidental donde los plutones del Cretácico Superior, Paleoceno, Eoceno, Oligoceno y stocks de generalmente intermedia invaden las secuencias volcánicas y volcanosedimentarias. Sin embargo, la actividad intrusiva es notablemente menos abundante más al este (Perelló et al., 2012). Al sur de Los Pelambres, en el río Totoral, el gran plutón monzogranítico Totoral, aislado y con contenido de piroxeno, con una sola edad en circonio U-Pb de  $18.5 \pm 0.4$  Ma (Figura 2.1) y restringe efectivamente la edad del vulcanismo de la Fm. Pachón. De manera similar, inmediatamente al W de Los Pelambres, el gran complejo intrusivo Chalinga parcialmente anidado, multifásico de  $25 \times 15$  km se inició con fases de piroxeno diorita y granodiorita, seguidas por olivino gabro y diorita. Las intrusiones tempranas tienen edades de U-Pb en circón entre  $23,3 \pm 0,2$  y  $21,6 \pm 0,6$  Ma, mientras que las posteriores presentan edades de U-Pb en circón de  $18,6 \pm 0,4$  y  $18,1 \pm 0,5$  Ma. Una tercera fase de monzodiorita forma la parte norte del complejo intrusivo

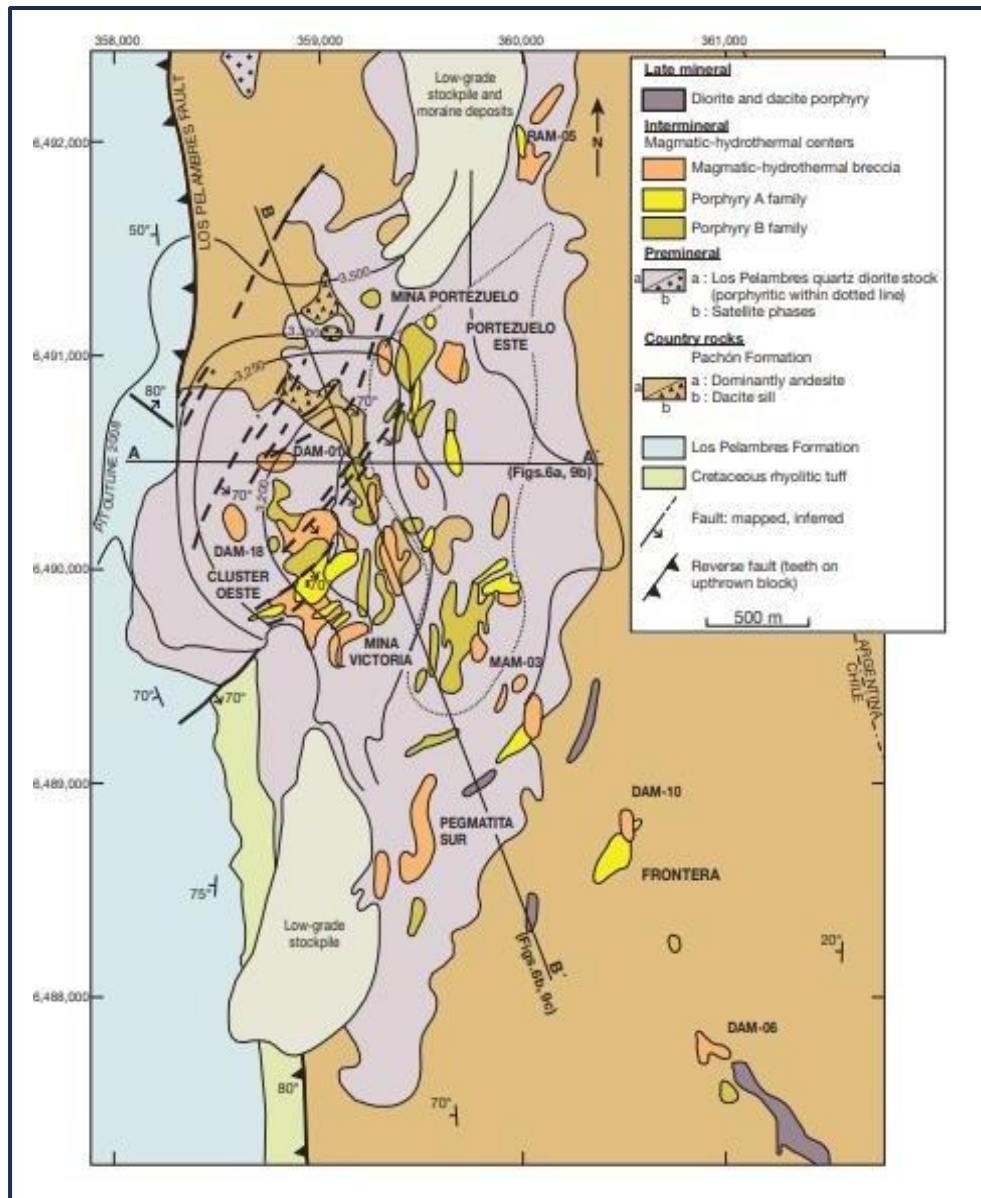
Chalinga, cuyo lóbulo sureste corta la falla Totoral en el borde occidental del dominio central. Esta tercera fase arroja edades U-Pb en circón de  $16.5 +0.3/-0.2$  y  $15.1 \pm 0.6$  Ma, proporcionando así una edad mínima para la falla inversa Totoral en esta latitud. Un cinturón de dacita y diorita con contenido de hornblenda, equigranulares a porfídicas, se extiende hacia el sureste durante unos 70 km desde la fase más joven del complejo intrusivo Chalinga hasta más allá de la frontera internacional (Figura 2.1) e incluye, entre otros, los centros de pórfido de cobre. Las intrusiones fechadas de esta tendencia intrusiva transversal producen nuevas edades de circonio U-Pb de  $15,4 \pm 0,4$  y  $15,0 \pm 0,3$  Ma. La intrusión más al noroeste en esta tendencia es el stock y los cuerpos satélite de Los Pelambres, para los cuales se informaron edades de circonio U-Pb de  $13,92 \pm 0,15$  y  $12,51 \pm 0,17$  Ma. Estas intrusiones fueron controladas y selladas por la falla inversa Los Pelambres durante las etapas menguantes del emplazamiento del complejo intrusivo Chalinga, de acuerdo con el momento de la falla Totoral informado anteriormente (Perelló et al., 2012).

#### **2.4. Alteración y mineralización de Minera Los Pelambres (MLP)**

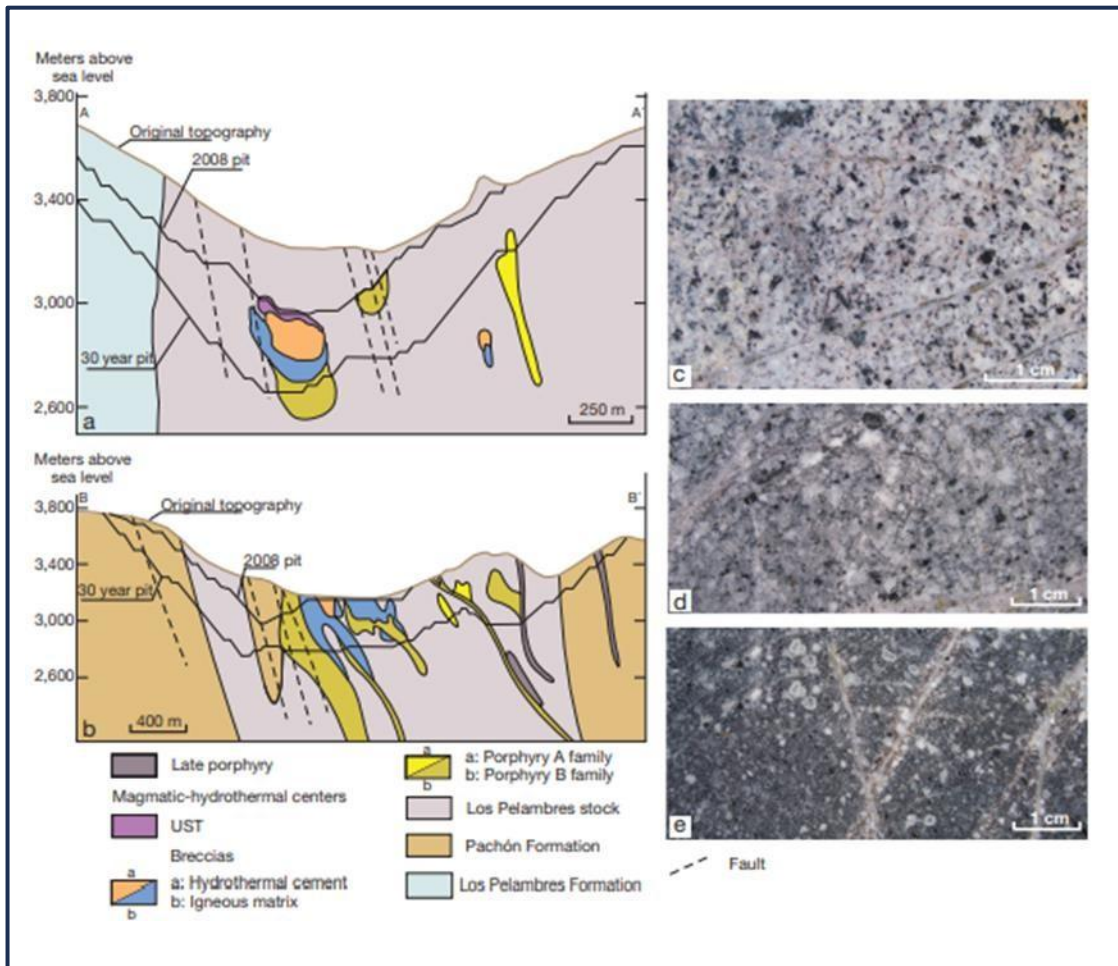
La mineralización primaria en Los Pelambres ocurre en vetillas, brechas y stockworks; en las fases interminerales de los pórfidos que están presente en Los Pelambres, los cuales se agrupan en dos familias principales pórfido A y B; como también brechas magmáticas e hidrotermales principalmente (Figura 2.4), donde al menos 20 centros intrusivos discretos forman el grupo central de pórfido A y pórfido B, los más grandes alcanzan 250 m de diámetro y 500 m de longitud donde tienen forma de dique (Figura 2.5). Tanto la familia del pórfido A como la del pórfido B constan de múltiples fases, muchas de las cuales no se pueden correlacionar sin ambigüedades sobre una base de pozo a pozo. El pórfido B, consta de diques y cuerpos coalescentes que se caracterizan por texturas porfídicas, de grano medio, con una composición general dacítica (Figura 2.5 d), mientras que en el pórfido A son de grano más fino, de color marrón y de composición predominantemente andesítica (Figura 2.5 e). Los fenocristales de plagioclasa y biotita orientados imparten una textura en bandas característica y fácilmente identificable (Perelló et al., 2012). Tanto el pórfido A como B son los responsables de la mineralización primaria de sulfuros, que

está compuesta por calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) presente en vetillas y filones pequeños dentro de rocas intrusivas y volcánicas. La Unidad Geológica primaria, ocurre en elevaciones más altas del sistema, las cuales fueron sometidas a lixiviación por aguas meteóricas, como también por la formación de la capa supérgena durante finales del Terciario, dando lugar a la presencia de extensos conjuntos de sulfuros “secundarios” de calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y covelina ( $\text{CuS}$ ). Por debajo de la zona freática, la anhidrita llena todos los huecos y así sella la roca, evitando un mayor paso descendente del agua meteórica (Gajardo, 2019).

Las vetillas tipo 4 contienen molibdenita relativamente menor en comparación con las otras vetillas, pero está ampliamente distribuida en Los Pelambres, las vetillas B representan al menos el 60% del total de molibdenita; el oro está alojado en las vetillas tipo 4 y A principalmente (Perelló et al., 2012).



**Figura 2.4:** Mapa geológico simplificado del área de Los Pelambres que contiene las secciones transversales B-B' y A-A'. De Perelló et al., 2012.



**Figura 2.5:** Secciones transversales geológicas de las fases intrusivas del pórfido de cobre-molibdeno de Los Pelambres. (a) Perfil este-oeste. (b) Perfil noroeste-sureste. (c) diorita del stock Los Pelambres. (d) Pórfido B. (e) Pórfido A. De Perelló et al., 2012

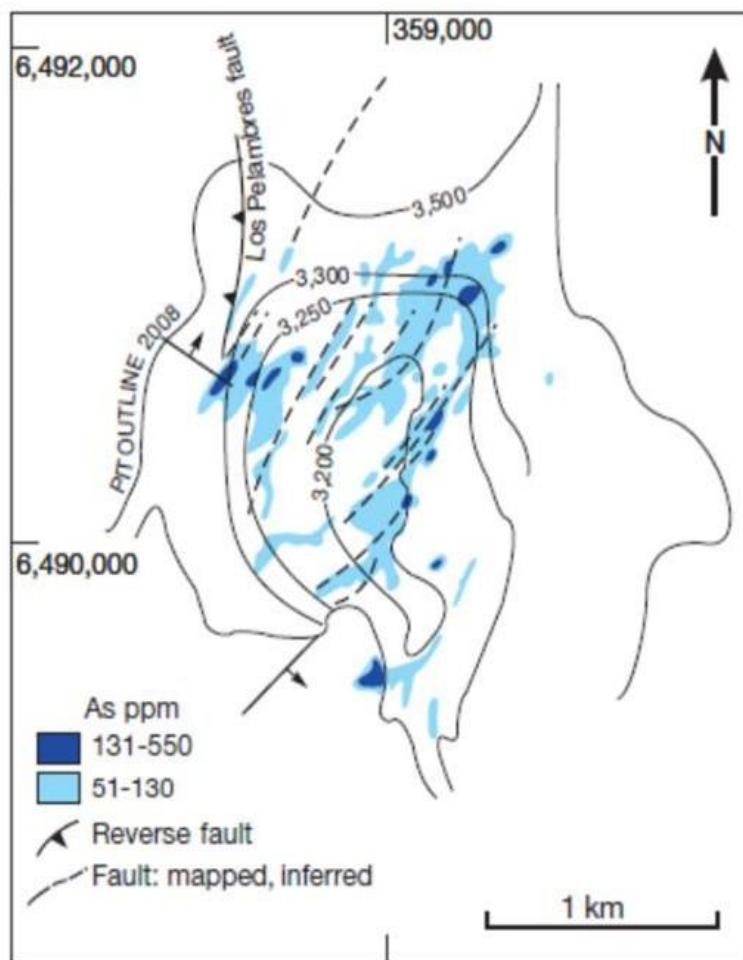
### 2.4.1. Stock en Minera Los Pelambres

El stock de Los Pelambres del Mioceno tardío es una intrusión de  $4,5 \times 2,5$  km con tendencia N (Figuras 2.4 y 2.5). El stock se compone de varias fases discretas, que incluyen variedades equigranulares y porfídicas de grano medio y fino. La mayor parte del stock es de composición diorítica equigranular, subequigranular a hipidiomórfica de color gris claro a medio (tonalita de Sillitoe, 1973, siguiendo la clasificación IUGS [Streckeisen, 1973]). El cuarzo menor y el feldespato K se encuentran intersticialmente en las fases equigranulares, y la masa fundamental aplítica es común en las fases porfídicas. La diorita porfídica ocupa un volumen importante en la parte centro-este del

stock Los Pelambres (Perelló et al., 2012). En el centro del yacimiento, se expone una zona de alteración potásico-silíceo, siendo la de mayor importancia económica dado que aloja casi toda la mineralización de Cu y Mo. Está rodeada por alteración filica que está de forma de halo de aproximadamente 500 m. Hacia los bordes aparece una zona de alteración propilítica subordinada a la roca caja del stock diorítico (Fm. Pelambres y Fm. Pachón) (Gajardo, 2019).

#### **2.4.2. Vetillas en Minera Los Pelambres**

En el yacimiento Los Pelambres, se reconocen 4 familias de vetillas principales asociadas a la mineralización. La primera corresponde a las vetillas T4, esta familia de vetillas más temprana del sistema y poseen la fuente de mineralización más importante en el depósito, con promedio de 0,3 % CuT y 0,1 g/t Oro; la segunda son las vetillas A y B que se encuentran en el depósito distribuidas generalmente en halos en torno a los centros hidrotermales más importantes del yacimiento con frecuencias entre 11 y sobre 30 vetillas cada 2 m (Gajardo, 2019). Se encuentran concentrados principalmente en el sector central y SE, y por último las vetillas D que son el registro del último evento deformacional que hay en el rajo, estas son de cuarzo granular fino, con escasos sulfuros de cobre de calcopirita, abundante pirita y molibdenita, poseen granos aislados de feldespatos potásicos, trazas de anhidrita, en ocasiones existe turmalina (Gajardo, 2019). Estas vetillas se encuentran en el cuadrante NE de Los Pelambres y están definidas por un corredor estructural NE que posee tennantita y trazas de arsénico de valores <550 ppm (Figura 2.6) (Perelló et al., 2012).



**Figura 2.6:** Vista en planta de la distribución de arsénico que refleja el último evento deformacional en el rajo. De Perelló et al., 2012.

### **2.4.3. Brecha hidrotermal (BH)**

Esta brecha (Figura 2.5) es mayoritariamente clasto soportada y en menor grado matriz soportada. Los clastos angulosos a subredondeados, incluyen los tipos litológicos de diorita, pórfidos A, B y andesitas. Las brechas hidrotermales están cementadas por turmalina, anhidrita y biotita. Cabe señalar, que se ha identificado otro tipo de brecha de carácter freático (brecha oquerosa) (Gajardo, 2019).

### **2.4.4. Brecha magmática hidrotermal (BMH)**

Roca compuesta por una matriz ígnea conformada principalmente por pórfido A o B y clastos de roca encajante, además de restos de vetillas tipo T4, A y D. Los clastos líticos tienen bordes difusos, mientras que los clastos de vetillas muestran bordes angulosos. (Gajardo, 2019).

## **2.5. Geología estructural**

### **2.5.1. Regional**

Desde el punto de vista estructural, el dominio oriental que está dentro del territorio chileno se caracteriza por una deformación de piel gruesa que corresponde a un evento más joven que dio lugar a la falla Mondaquita (esta falla se localiza en Argentina, por lo tanto, se escapa de la zona de estudio, y se nombra solo para contextualizar) que emplaza a lavas de la Fm. Pachón sobre el Complejo Volcánico Laguna del Pelado (18 Ma) mientras que la falla Santa Cruz (esta falla se localiza en Argentina, por lo tanto, se escapa de la zona de estudio, y se nombra solo para contextualizar) transporta hacia el E a granitos del Paleozoico sobre conglomerados y areniscas, en cuya base se encuentran un delgado nivel de lavas del Mioceno inferior (Figura 2.1). Al aproximarse a la falla Los Pelambres, las lavas de la Fm. Pachón están involucradas, en un angosta faja plegada y corrida de piel delgada (Mpodozis et al., 2009).

El dominio occidental presenta el estilo estructural típico de la Cordillera de la Costa (Figura 2.1) que es un gran bloque, sin deformación (salvo la que afecta al Cretácico superior al sur de Cuncumén) formado por secuencias con suave y monótona ( $< 25^\circ$ ) inclinación al W. Este dominio contiene las fallas Pocuro, Gonzáles y Totoral (Mpodozis et al., 2009). Donde la falla Pocuro posee un manteo de  $50$  a  $60^\circ$  hacia el E (Castelli, 2006) y deja en contacto tectónico a la Fm. Salamanca y Abanico al E; y al intrusivo Paleoceno hacia el W que aumenta la deformación al aproximarse al dominio central (Perelló et al., 2006; 2012). Esta estructura se interpreta existente durante el emplazamiento del intrusivo Paleoceno, dado que los intrusivos “siguen” su traza en superficie y subsuelo (Castelli, 2006). En cuanto a la falla Totoral tiene un manteo entre  $60$  a  $80^\circ$  al W, junto con la falla Gonzáles, generan una intensa deformación de rocas volcánicas cretácicas de la Fm. Salamanca y rocas del complejo intrusivo Chalinga (Perelló et al., 2012), alzando estas unidades sobre las Formaciones Los Pelambres y Pachón. Por relaciones de contacto esta falla habría emplazado sintectónicamente al Plutón Hualtatas, ayudando a la actividad de la falla (Castelli, 2006). Los afloramientos de la Fm. Pelambres están entre las fallas Los Pelambres y Totoral que corresponde al dominio central muestran una deformación extrema, con capas subverticales, o con fuerte inclinación hacia el W, lentes tectónicos desgarrados limitados por fallas inversas anastomosadas, e incluso, sobre la traza de la falla Los Pelambres, en el valle del Río Totoral, pliegues subisoclinales propios de una zona afectada por deformación dúctil de relativamente elevada temperatura. Esta zona de intensa concentración de la deformación representaría una zona mecánicamente débil (cuenca extensional, o depresión volcano-tectónica del Oligoceno superior-Mioceno inferior) que colapsó debido a la colisión entre los bloques rígidos fuertemente desacoplados de la Cordillera Frontal, al E, y la Cordillera de la Costa al W, de manera similar a la descrita en recientes modelos experimentales. Este episodio de deformación, durante la cual el bloque de la Cordillera de la Costa habría sido transportado hacia el E sobre el núcleo rígido de la Cordillera Frontal en el Mioceno inferior como lo indican las edades de  $21.7 \pm 0.4$  y  $18.5 \pm 0.4$  Ma obtenidas en intrusivos granodioríticos sin a post-tectónicos emplazados en la falla Totoral (Mpodozis et al., 2009).

## 2.5.2. Minera Los Pelambres (MLP)

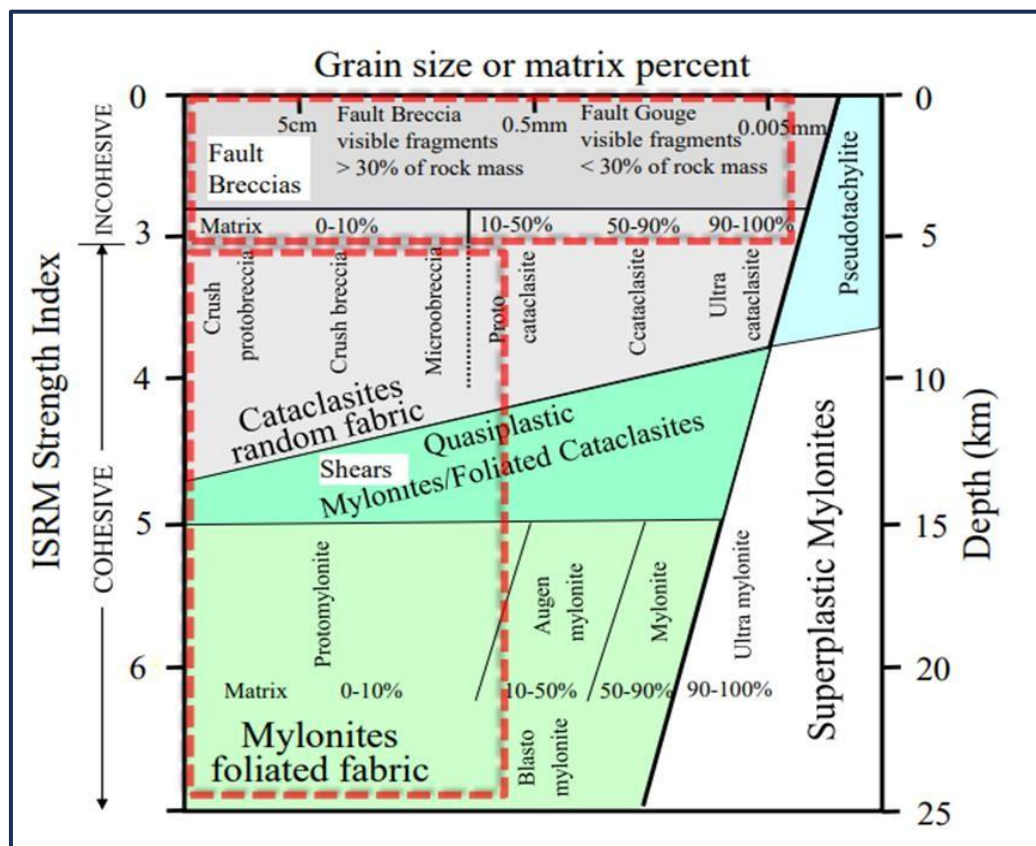
La interpretación actual del Departamento de Geología de Los Pelambres describe la falla de Los Pelambres como un límite tectónico entre la Fm. Los Pelambres y la Fm. Pachón. Donde esta falla en el rajo no se observa y se interpreta que fue utilizada como zona de debilidad durante la intrusión de 10-14 Ma de pórfido y cuarzo monzonita/diorita (Fedorowich, 2021).

Las estructuras discretas que se encuentran en el rajo de MLP poseen comportamiento semi- frágil son de ambiente cohesivo y no cohesivo, (Figura 2.7) donde que se forme una o la otra dependerá de la profundidad y el índice de fuerza ISRM en las cuales encontramos (Fedorowich, 2021):

- **Brecha de falla:** es roca de falla dominada por >30% de fragmentos angulares a subredondeados que tienen >0,5 mm en su dimensión más larga (Figura 2.7). Los fragmentos están sostenidos por una matriz de grano más fino compuesta por partículas de roca triturada <0,5 mm, que generalmente forman <30% del macizo rocoso. El grado de cohesión está influenciado por el porcentaje de cemento, que comprende minerales precipitados que sueldan la matriz y los fragmentos. Las zonas de brecha de falla generalmente forman el núcleo de la falla, y las zonas dañadas de roca fracturada forman un halo de espesor e intensidad variables.
- **Salbanda de falla:** es una cataclasita incohesiva, rica en arcilla, de grano fino a ultrafino, que puede poseer una esquistosidad. Generalmente contiene <30% de fragmentos visibles (Figura 2.7). La salbanda tiene un rango de tamaño de partícula de matriz de 0,005 a 0,5 mm. Por lo tanto, la salbanda de arena y la salbanda de arcilla son miembros finales, con todas las mezclas posibles.
- **Zonas de foliación:** son intervalos pronunciados de intensa foliación y roca laminar donde la evidencia de cizallamiento es local. En la muestra manual y la escala microscópica, estos se definen por el aplanamiento del grano Mineral y la

orientación preferida de los minerales laminares como la clorita, la biotita y la sericita. Las zonas de foliación tienen contactos graduales con rocas masivas adyacentes.

- **Zonas de cizalle:** son zonas de intensa foliación de cizalla. Están dominados por roca intacta cohesiva con poblaciones de fracturas por corte y diaclasas. El núcleo de una cizalla tiene la mayor intensidad de foliación de cizalla y es mapeable. Una zona de daño que contiene foliación de corte menos intensa y fracturas puede persistir de centímetros a metros fuera del núcleo.
- **Estratificación:** Niveles de estratificación en paquetes volcano – sedimentarios.



**Figura 2.7:** Tipos de rocas de fallas definidas por la cohesión, índice ISRM, porcentaje de matriz y tamaño de grano. De Fedorowich, 2021.

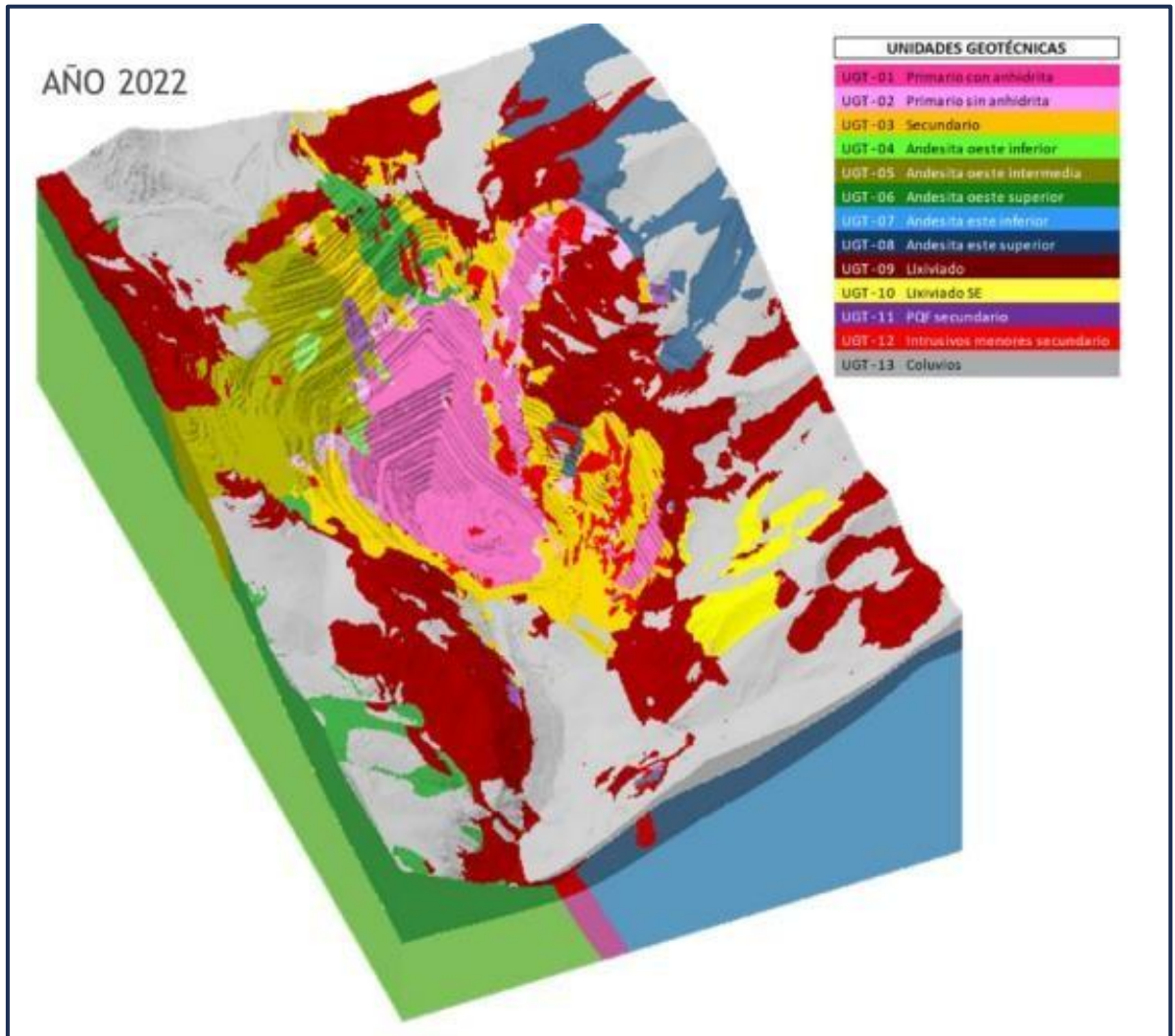
### 3. UNIDADES GEOTÉCNICAS DE MINERA LOS PELAMBRES

Las Unidades Geotécnicas del rajo Los Pelambres (Figura 3.1) se han definido en base las propiedades de resistencia y deformación (UCS, cohesión, Angulo de fricción, módulo de Young y razón de Poisson) que posee la litología, alteración y zona mineralizada del rajo, como también se consideró la ubicación relativa frente al nivel de anhidrita y componente estructural del rajo. Donde se realizó una caracterización del macizo rocoso que compone el rajo usando la clasificación Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski '89), Geological Strength Index (GSI), Rock Quality Designation (RQD) y Frecuencia de fracturas (FF). Una vez hecho los estudios anteriormente mencionados se logró definir doce Unidades Geotécnicas (UGT) (Gajardo, 2019).

- **UGT-1 Primario Con Anhidrita:** Esta unidad está compuesta principalmente por diorita, correspondiendo a la zona de mineralización hipógena, ubicada bajo el límite del techo de Anhidrita. Presenta un RQD promedio de 98 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica.
- **UGT-2 Primario Sin Anhidrita:** al igual que la UGT-1, esta unidad está compuesta principalmente por diorita, corresponde a la zona de mineralización hipógena, ubicada sobre el límite del techo de Anhidrita. Presenta un RQD promedio de 84 y un RMR promedio de 64, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica.
- **UGT-3 Secundario:** Esta unidad está compuesta litológicamente por diorita, brechas y pórfidos, corresponde a una zona de mineralización supérgena, ubicada sobre el techo de Anhidrita. Presenta un RQD promedio de 81 y un RMR promedio de 60, caracterizando esta unidad como una zona de buena a regular calidad geotécnica.

- **UGT-4 Andesita Marginal Oeste Inferior:** Esta unidad está compuesta litológicamente por rocas volcánicas, principalmente andesitas, ubicadas al sector Oeste del rajo Los Pelambres, bajo el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 95 y un RMR promedio de 76, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica.
- **UGT-5 Andesita Marginal Oeste Intermedia:** Esta unidad está compuesta litológicamente por rocas volcano-sedimentarias, ubicada en la parte oeste del rajo Los Pelambres; esta unidad se presenta bajo y sobre el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 27 y un RMR promedio de 42, caracterizando esta unidad como una zona de mala calidad geotécnica.
- **UGT-6 Andesita Marginal Oeste Superior:** Esta unidad está compuesta litológicamente por rocas volcánicas principalmente andesitas, ubicadas al sector Oeste del rajo Los Pelambres, sobre el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 51 y un RMR promedio de 53, caracterizando esta unidad como una zona de regular calidad geotécnica.
- **UGT-7 Andesita Marginal Este Inferior:** Esta unidad está compuesta litológicamente por rocas volcánicas principalmente andesitas, ubicadas al sector Este del rajo Los Pelambres, bajo el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 100 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica.
- **UGT-8 Andesita Marginal Este Superior:** Esta unidad está compuesta litológicamente por rocas volcánicas principalmente andesitas, ubicadas al sector Este del rajo Los Pelambres, sobre el límite del techo de anhidrita. Presenta un RQD promedio de 56 y un RMR promedio de 50, caracterizando esta unidad como una zona de regular calidad geotécnica.

- **UGT-9 Lixiviado:** Esta unidad incluye todas las litologías (andesitas, diorita, brechas y pórfidos), presente en la zona superior de todo el rajo, bajo la zona de coluvio. Presenta un RQD promedio de 77 y un RMR promedio de 54, caracterizando esta unidad como una zona de regular calidad geotécnica.
- **UGT-10 Lixiviado Sureste:** Esta unidad corresponde a la zona Lixiviada de andesitas ubicada en la parte sureste del rajo, con un espesor promedio de 50 metros. Presenta un RQD promedio de 41 y un RMR promedio de 42, caracterizando esta unidad como una zona de mala a regular calidad geotécnica.
- **UGT-11 PQF Secundario:** Unidad compuesta por pórfidos cuarzo feldespáticos, presentes sobre el límite del techo de anhidrita, distribuidos espacialmente en la zona Norte y Este del rajo. Presenta un RQD promedio de 82 y un RMR promedio de 63, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica.
- **UGT-12 Intrusivos Menores Secundario:** Corresponde a pórfidos de composición andesítica y dacítica y brechas hidrotermales. Se encuentran ubicados en las paredes Este, Norte y Sur del rajo, y en menor proporción en la pared Oeste. Presenta un RQD promedio de 83 y un RMR promedio de 57, caracterizando esta unidad como una zona de regular calidad geotécnica.
- **UGT-13 Coluvio:** Material estéril correspondiente a sedimentos no consolidados, que cubren gran parte de la superficie del área, con un espesor promedio de 50 metros.

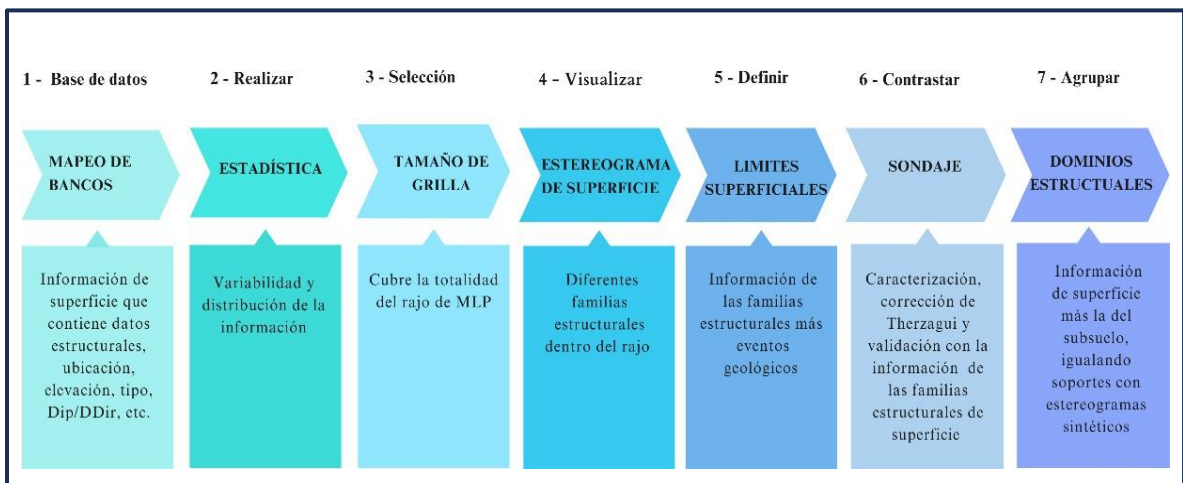


**Figura 3.1:** Modelo en 3D de UGT del rajo de Minera Los Pelambres. De Ferrada, 2022.

## 4. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo (Diagrama 4.1), se basó en cuatro etapas fundamentales: i) un análisis de variabilidad (datos estructurales) y de distribución de los datos para luego elegir un tamaño de grilla correcto que cubra todo el rajo de MLP; ii) determinación de las familias estructurales que se encuentran en superficie y correlación con la geología del rajo iii) contraste y validación de la información estructural de superficie con la de subsuelo iv) generación de estereogramas sintéticos por medio de la información de sondaje que servirá para redefinir los dominios estructurales del rajo de MLP.

**Diagrama 4.1:** Metodología que se utilizó en este trabajo.

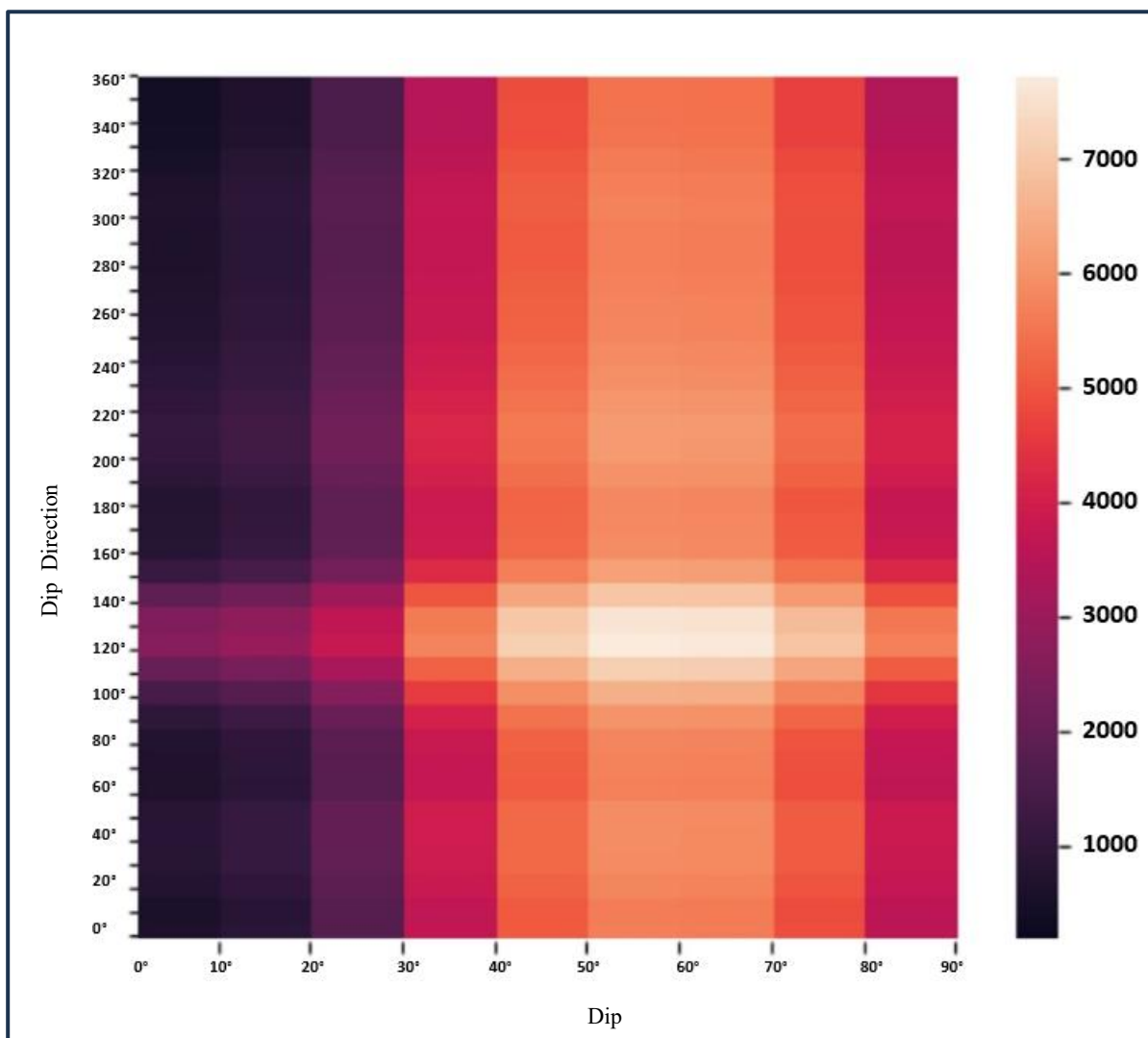


#### 4.1. Análisis de la base de datos de mapeo de bancos

La base de datos consta de un total de 23.928 datos que se encuentran Tabulados en Excel y datan del año 2014 hasta enero del 2023. Estos contienen información del área donde se obtuvo el dato estructural, SITEID, coordenadas norte y este, elevación, fase, Dip y Dip direction, tipo de estructura, largo, rugosidad, relleno y si contiene o no agua. Esta base de datos en un comienzo se filtró para eliminar datos estructurales erróneos, como también datos que se encontraran fuera del área del rajo actual. Una vez realizado esto, se procedió a separar los datos en diferentes fases que fueron la fase 7, 9, 10 y 11. Luego de separar los datos por fase, se calcularon las distancias que existían entre datos, ocupando la metodología de cálculo de distancia Euclidiana (Ec. 1)

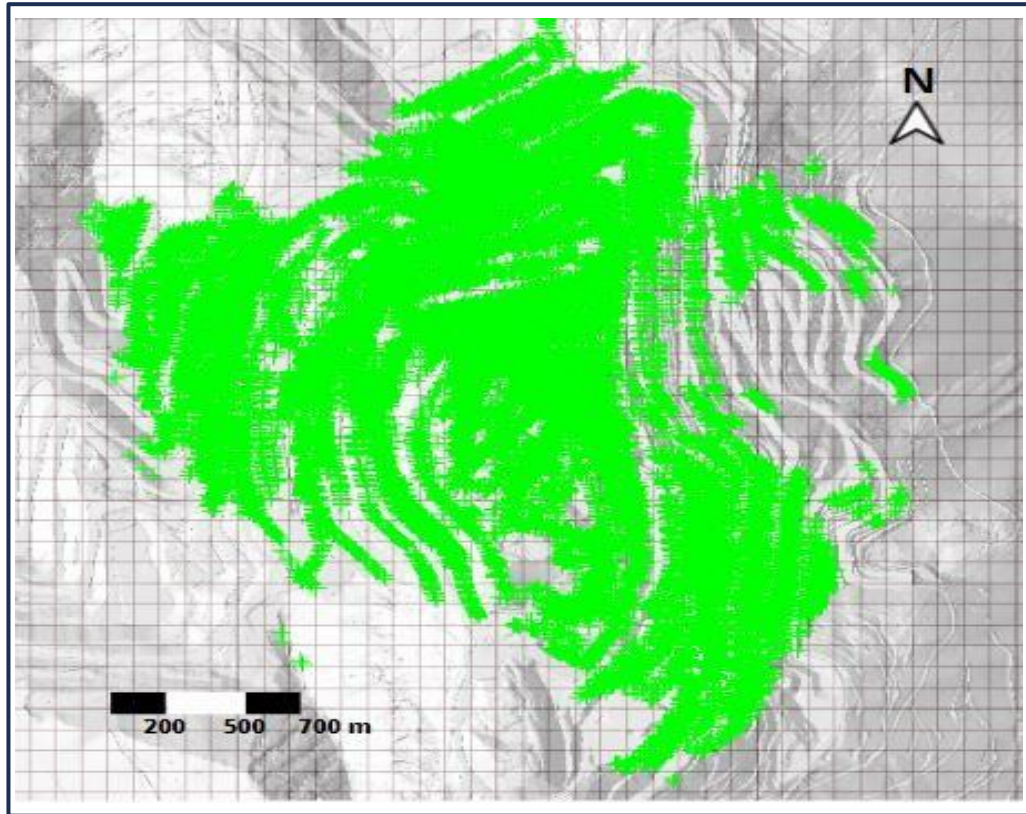
$$DISTANCIA = \sqrt{\text{coordenada } N^2 + \text{coordernada } E^2 + \text{Elevación}^2} \quad (\text{Ec.1})$$

Con esto se generaron histogramas y diagramas de Boxplot para ver la dispersión de los datos a través de su frecuencia. Para observar la variabilidad de los datos de superficie, se generó un mapa de calor (Figura 4.1), que muestra las diferentes concentraciones de los datos analizados (Dip y Dip direction) esto se realizó a través de Júpiter Notebook con códigos de Phyton v 3.10.



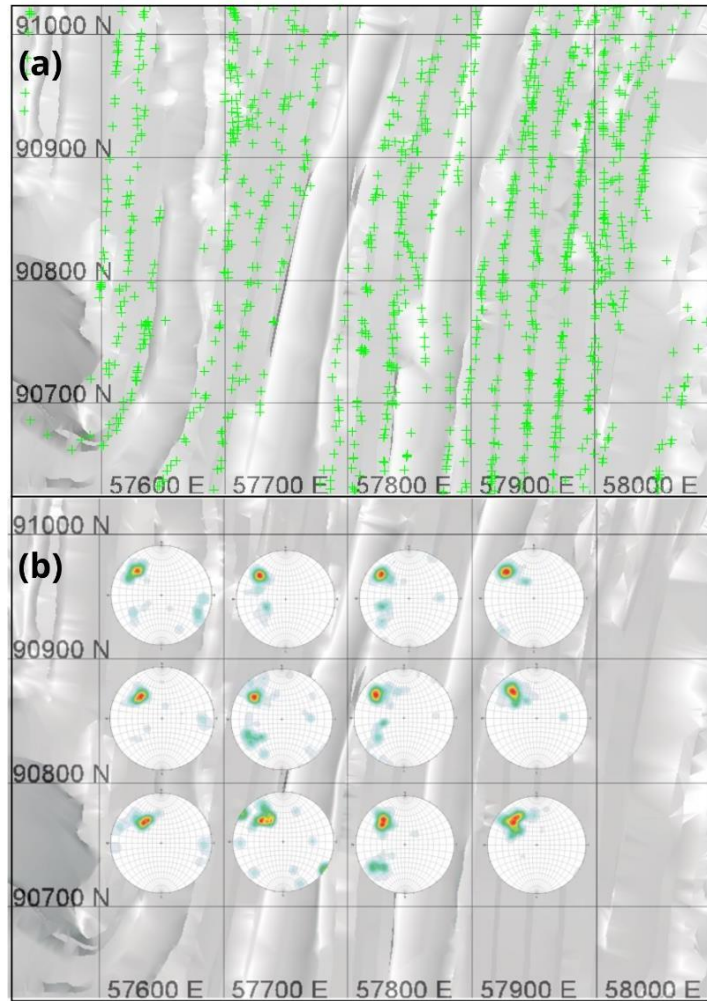
**Figura 4.1:** Mapa de calor en donde la variación de colores, indica la cantidad de datos que existen.  
Elaboración propia.

Una vez elegido el tamaño de celda adecuado se importaron los datos de Excel de cada uno de los elementos estructurales a Vulcan con sus coordenadas y elevaciones correspondientes (Figura 4.2), para luego sobreponer la grilla y la topografía actual del rajo al tamaño de celda seleccionado, esto último se realizó para tener una primera visualización de los datos.



**Figura 4.2:** Elementos estructurales (verde) de la base de datos de mapeo de bancos sobre la topografía actual del rajo. Elaboración propia.

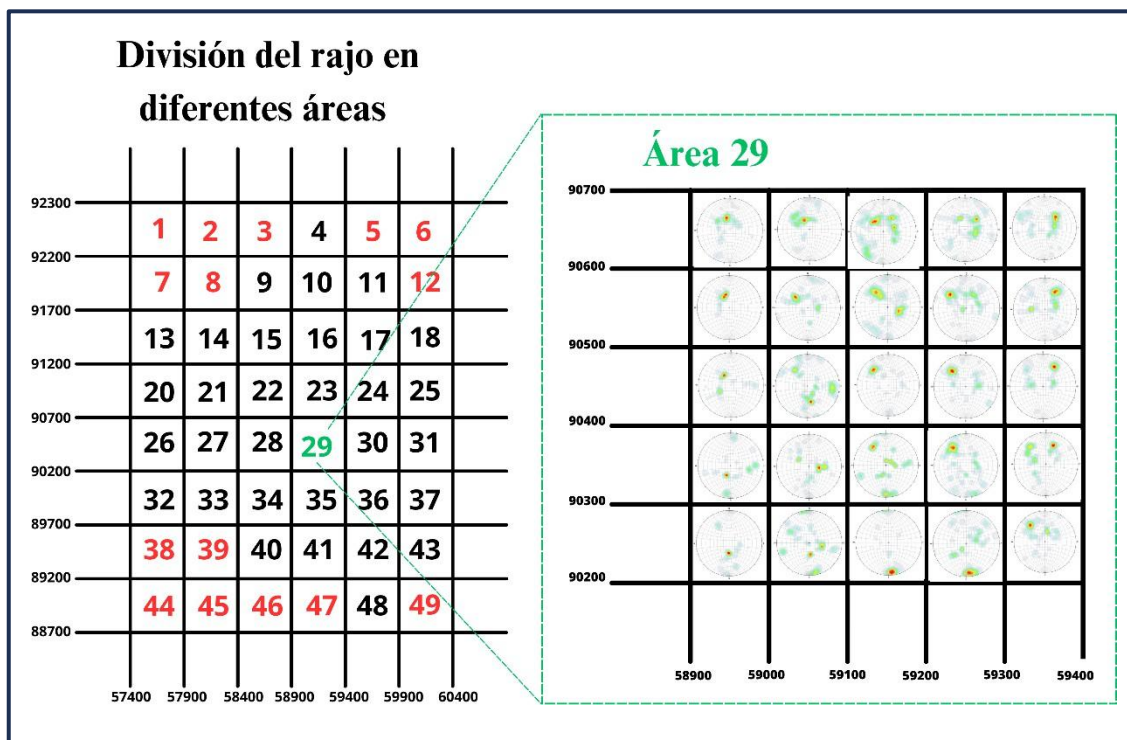
Luego estos datos se filtraron en Excel, utilizando las coordenadas correspondientes al tamaño de celda determinado (100 x 100 m), con el objetivo de dividir la información estructural de toda la base de datos al tamaño de celda seleccionado anteriormente (Figura 4.3 a), para ocupar esta información estructural en el programa DIPS, generando así estereogramas por cada celda (Figura 4.3 b), este procedimiento se realizó hasta cubrir todo el rajo.



**Figura 4.3:** Estereogramas de cada celda. (a) Celda de 100 x 100 m en el rajo, que contiene elementos estructurales. (b) Estereogramas generados con información de elementos estructurales en celdas de 100x100. Elaboración propia.

## 4.2. Determinación de las familias estructurales y sus límites geológicos

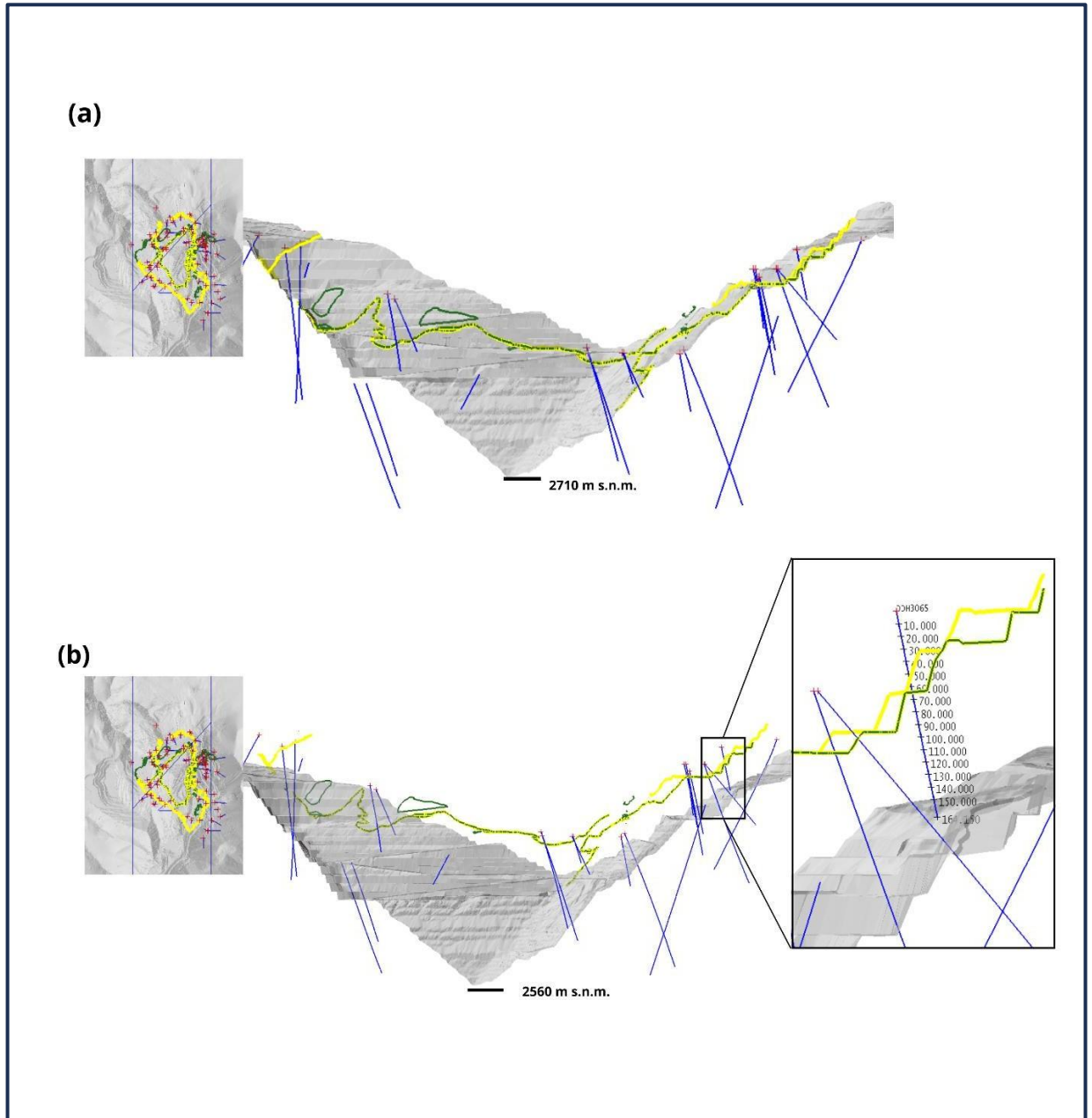
Para ello se crearon distintas plantillas en Adobe Illustrator con un tamaño de grilla de 5x5 con coordenadas propias del rajo de MLP cuyo tamaño de celda era de 100 x100 m, que a su vez contenía 25 estereogramas (Figura 4.4). Una vez que se generaron todos los estereogramas del rajo, se procedió a plotear cada una de estas plantillas para luego unir las según sus coordenadas, de esta manera se identificaron y se ubicaron espacialmente las familias estructurales más representativas del rajo. Esta información se traspasó a Vulcan para poder correlacionar los límites de esta área con los límites de diferentes elementos geológicos (litologías, mineralización, alteración y estructuras), donde estos últimos se interceptaron a la topografía para lograr visualizar la ubicación exacta en el rajo. Una vez encontrado estos límites, se buscó validar la información de superficies correlacionándola con la de los sondajes.



**Figura 4.4:** División del rajo en diferentes áreas (números de color negro) y Plantillas de tamaño 5x5 usadas para identificar las familias estructurales del rajo de MLP. Elaboración propia.

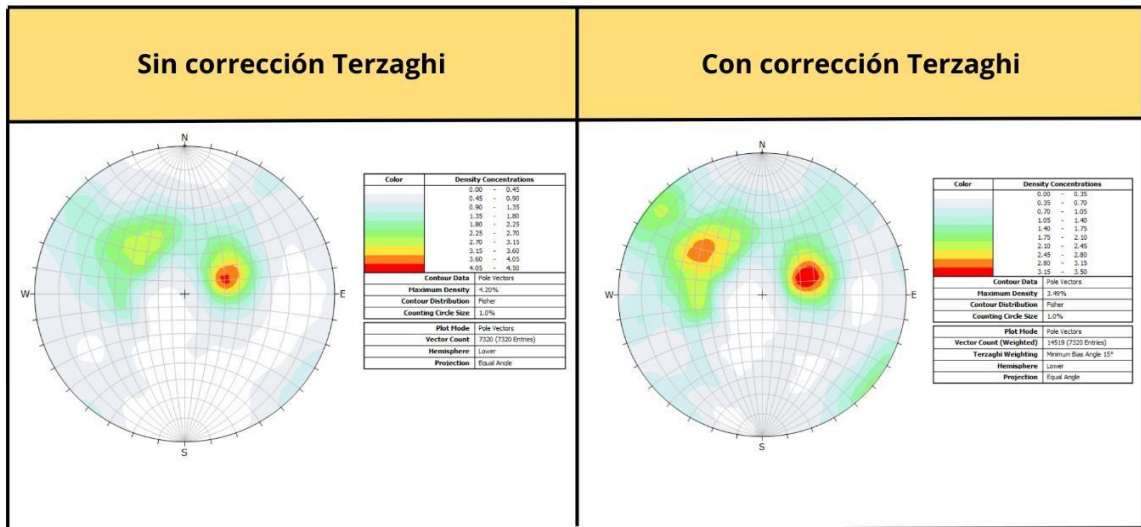
### **4.3. Contraste de la información estructural de superficie con la del subsuelo**

Para contrastar la información de superficie con la del subsuelo, se procedió a unificar las diferentes bases de datos de sondajes geotécnicos que van desde el año 2018 hasta febrero 2023 en una única base de datos en Excel, luego se revisó para eliminar mediciones erróneas que posteriormente pudieran afectar el resultado. Cuando estaba revisada y unificada, se fueron generando las diferentes traversas con los datos de certificado direccional del pozo final de cada sondaje, con la información ya tratada se traspasó a Vulcan para observar en que área estructural se encontraba cada sondaje. Ya visualizado los sondajes que hay en cada área, se agregó a la base de datos unificada una columna donde se anotó el área donde se encontraba cada sondaje. Para seleccionar los datos de sondaje que se traspasaron a los estereogramas, se tomó en cuenta solo una parte del largo de los sondajes que era la que se encontraba dentro de los 150 metros de altura, desde los elementos geológicos interceptados con la topografía actual (Figura 4.5 a) y esta misma topografía bajada 150 metros de elevación (Figura 4.5 b), para hacer esto se ocupó el programa Vulcan. El objetivo de esto es que hay sondajes que datan del año 2018, por lo que en algunos casos la superficie donde empezó ese sondaje (collar) ya no existe en la actualidad en él rajo, también para poder correlacionar de forma adecuada con los datos de superficie y, por último, porque a mayor profundidad los datos estructurales suelen comportarse más erráticos, lo que no permitiría correlacionarla de buena manera con los datos de superficie.



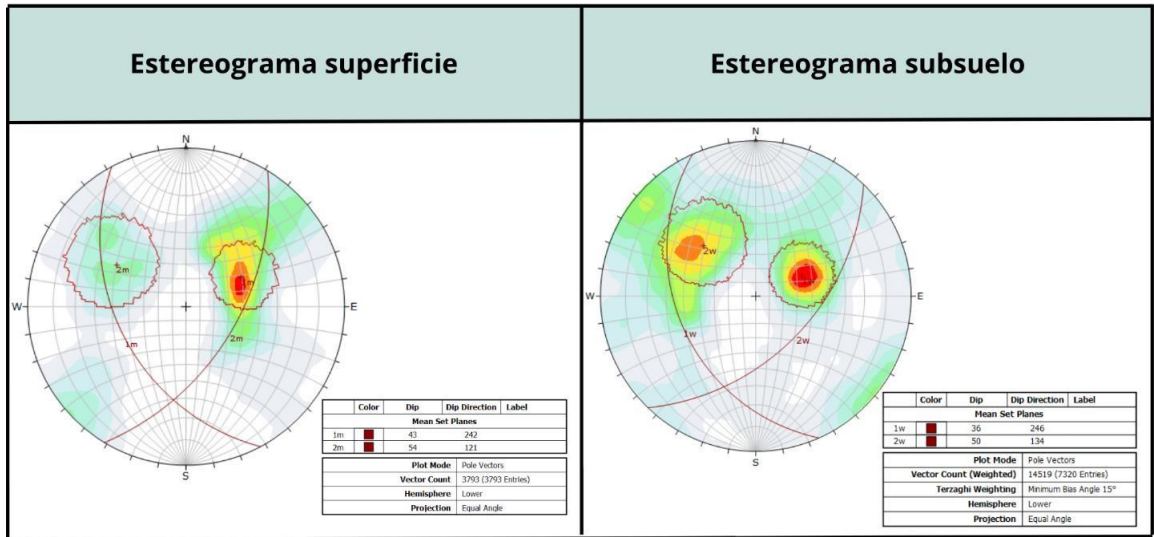
**Figura 4.5:** a) perfil de sondajes (líneas azules) y topografía actual del rajo interceptada por 2 elementos geológicos: mineralización secundaria (amarillo) y primaria (verde). b) perfil de sondajes (líneas azules) y topografía bajada 150m de su elevación actual elevación. Elaboración propia.

Una vez identificado el largo del sondaje, se extrae la información estructural de esa distancia para visualizarla en DIPS, aplicando la corrección de Terzaghi el cual tiene el fin de eliminar el sesgo que pueden tener los datos estructurales. Esto se realizó ocupando la información de las travesas de cada sondaje (Figura 4.6).



**Figura 4.6:** Ejemplo de un área del rajo donde un estereograma de sondaje tiene y no tiene corrección de Terzaghi. Elaboración propia.

Luego de aplicar las correcciones de Terzaghi, a todas las áreas de sondajes del rajo, se procedió a contrastar y/o validar esta información con la de superficie (Figura 4.7).



**Figura 4.7:** Estereogramas de una misma área del rajo en superficie y subsuelo. Elaboración propia.

#### **4.4. Agrupación de la información de superficie y subsuelo**

Una vez validada la información se generaron estereogramas sintéticos con la información de superficie y del subsuelo de cada área, con la finalidad de igualar el soporte de la información de sondaje con la de superficie, para que no se pierda información estructural en los estereogramas. Para generar los estereogramas sintéticos, se revisó la Info Viewer en DIPS de los del subsuelo y de superficie, esta información se tabuló en Excel tomando en consideración que al nombrar las familias en DIPS esta sea correlacionable o parecida a la familia de superficie dentro de la misma área (tabla 4.1)

**Tabla 4.1:** Datos de las familias estructurales de los estereogramas de superficie (SUP) y sondaje (SOND) por área estructural.

Familias estructurales	Dip	Dip Direction	N° de polos	Entradas	Fisher's K	Área estructural
1 SUP	64°	138°	578	578	43	ROJO
2 SUP	63°	57°	143	143	40	ROJO
1 SOND	56°	149°	522	195	57	ROJO
1 SUP	70°	136°	322	322	68	GRIS
2 SUP	41°	136°	281	281	77	GRIS
1 SOND	69°	131°	1303	813	47	GRIS
1 SUP	71°	123°	243	243	58	NARANJO
2 SUP	28°	135°	65	65	51	NARANJO
3 SUP	82°	190°	96	96	42	NARANJO
1 SOND	74°	122°	5377	2341	69	NARANJO
1 SUP	60°	123°	2502	2502	42	AMARILLO
2 SUP	86°	204°	660	660	40	AMARILLO
1 SOND	64°	133	10881	5341	32	AMARILLO
1 SUP	53°	133°	2080	2080	36	MORADO
2 SUP	87°	204°	612	612	34	MORADO
1 SOND	53°	143°	3465	2781	33	MORADO
2 SOND	89°	55°	443	133	35	MORADO
1 SUP	67°	119°	221	221	36	AZUL MARINO
2 SUP	44°	315°	146	146	72	AZUL MARINO
3 SUP	67°	226°	131	131	54	AZUL MARINO
1 SOND	60°	139°	9724	4427	21	AZUL MARINO
2 SOND	36°	331°	2507	1843	52	AZUL MARINO
3 SOND	39°	232°	2284	1469	49	AZUL MARINO
1 SUP	47°	138°	151	151	43	CELESTE
2 SUP	83°	37°	139	139	38	CELESTE
3 SUP	37°	315°	116	116	58	CELESTE
4 SUP	36°	251°	128	128	57	CELESTE
1 SOND	49°	120°	940	500	37	CELESTE
2 SOND	87°	203°	279	79	58	CELESTE
1 SUP	59°	147°	78	78	73	AZUL
2 SUP	48°	106°	75	75	78	AZUL
3 SUP	59°	72°	91	91	62	AZUL
4 SUP	70°	17°	72	72	64	AZUL
1 SOND	57°	145°	2569	1542	58	AZUL
1 SUP	43°	244°	800	800	38	VERDE
2 SUP	53°	119°	642	642	26	VERDE
1 SOND	36°	246°	2412	1422	35	VERDE
2 SOND	50°	134°	3002	1595	24	VERDE

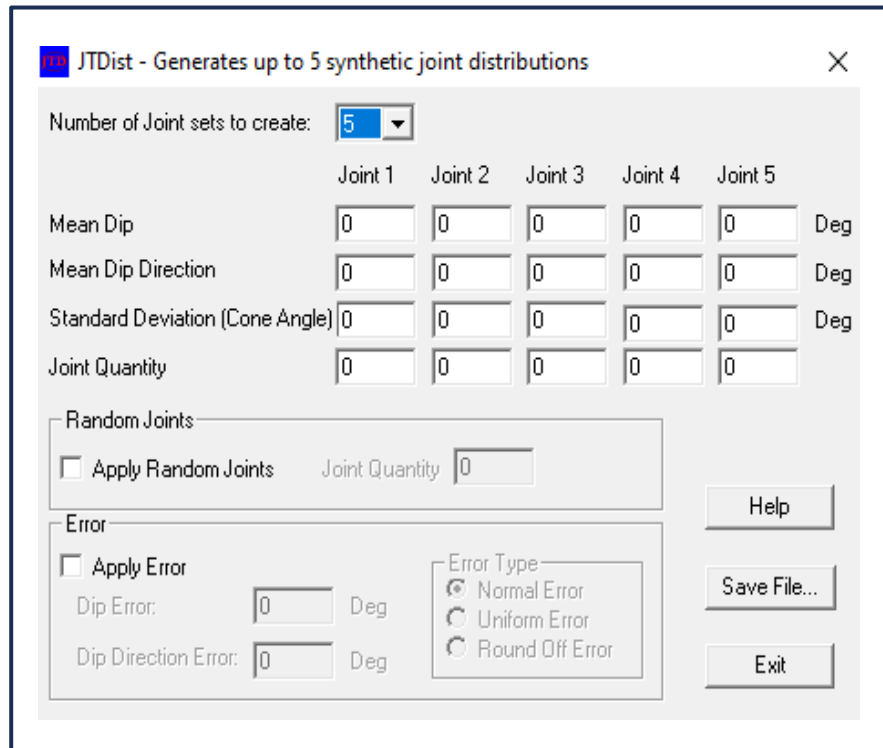
Con la información ya tabulada se usó la planilla de Rocscience (Figura 4.8) que es donde se agregó la información para realizar los estereogramas sintéticos. En ellos se anotó lo siguiente:

1. En el Dip y Dip direction se anotó cada familia de los sondajes por área estructural.
2. Para la desviación estándar se usó la fórmula de Butler 1992 (Ec. 2), donde el Fisher's K a utilizar es de la misma familia usada en paso 1.

$$\sigma = \frac{81}{\sqrt{Fisher's K_{sondaje}}} \quad (Ec.2)$$

3. Para la cantidad de juntas (Joint Quantity) se anotó el número de polos de la misma familia y área, pero de superficie. Este paso es el que iguala los soportes de subsuelo con los de superficie de las familias que son similares estructuralmente.

Para las familias secundarias que solo están en superficie, se realizaron los 3 pasos anteriormente mencionados ocupando solo la información de esta familia, ya que no se encontraba una familia similar en el subsuelo. Esto se realizó para aumentar el soporte de la información de esta familia y que no se pierda al momento de generar los estereogramas de los dominios.



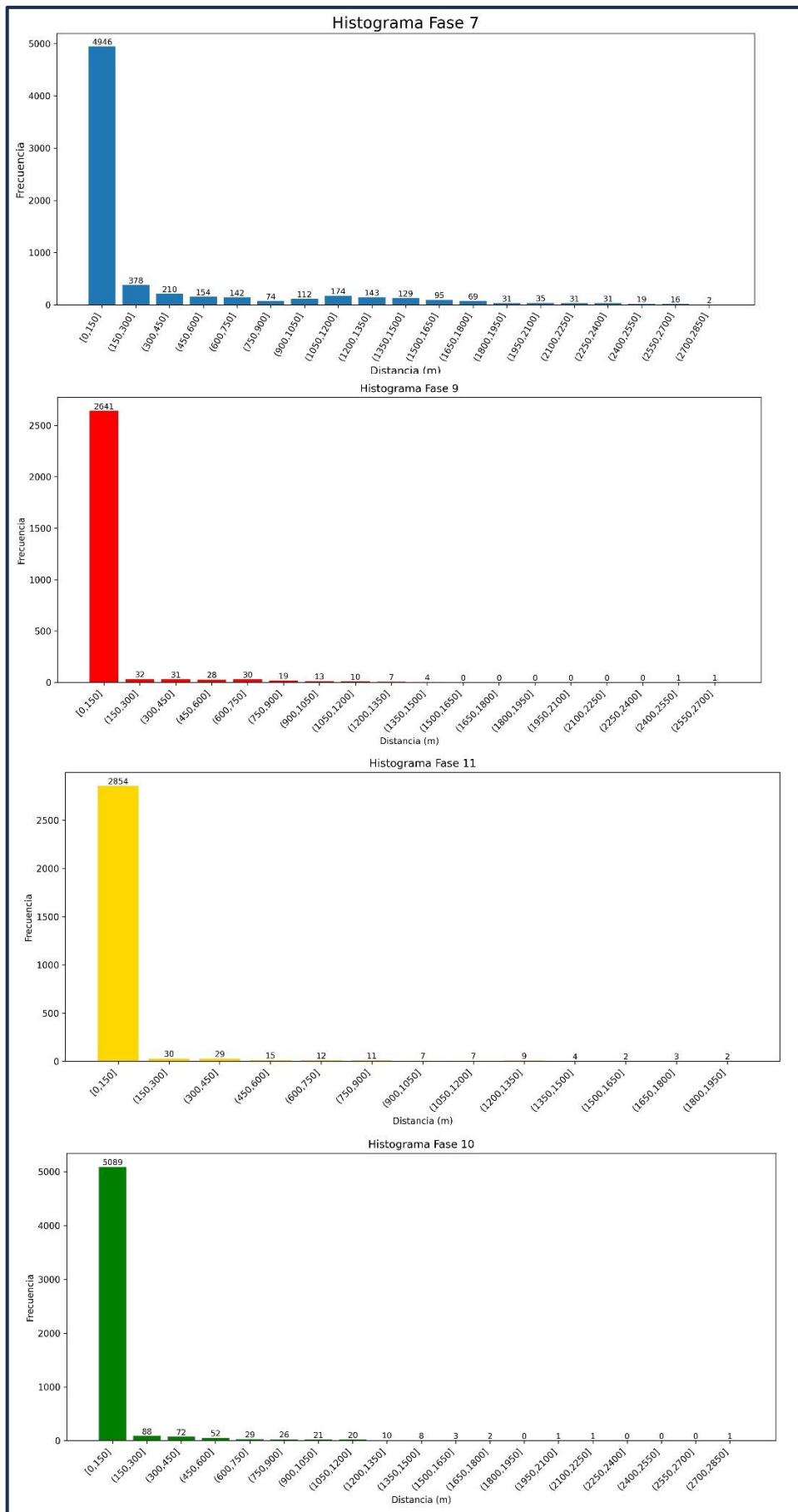
**Figura 4.8:** Planilla de Rocscience para generar los estereogramas sintéticos. Elaboración propia.

Los datos estructurales de los estereogramas sintéticos y de superficie se agrupan para así generar el estereograma final de cada área que pasan a llamarse dominios estructurales.

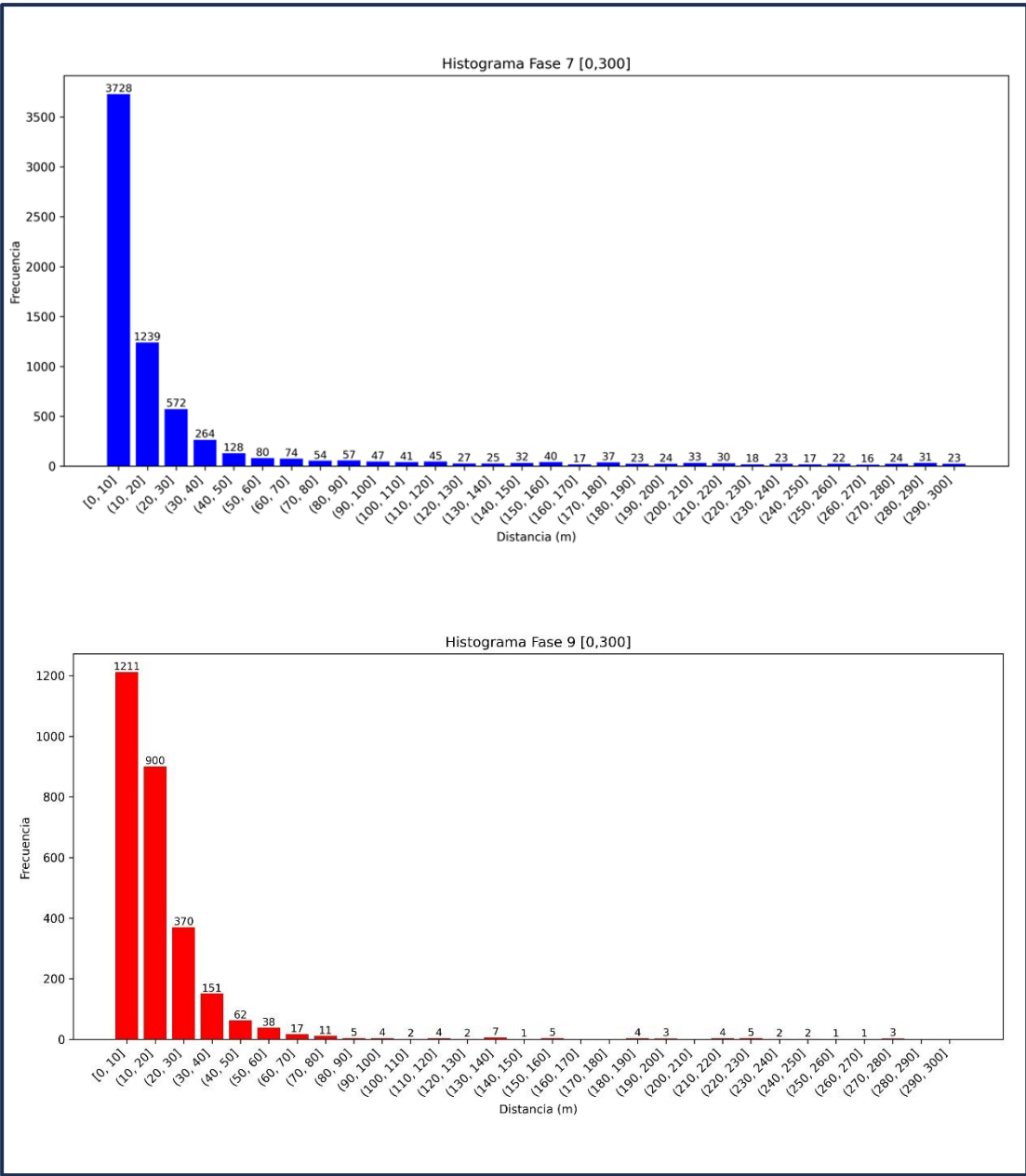
## 5. RESULTADOS

### 5.1. Tamaño de celda para la grilla sistemática

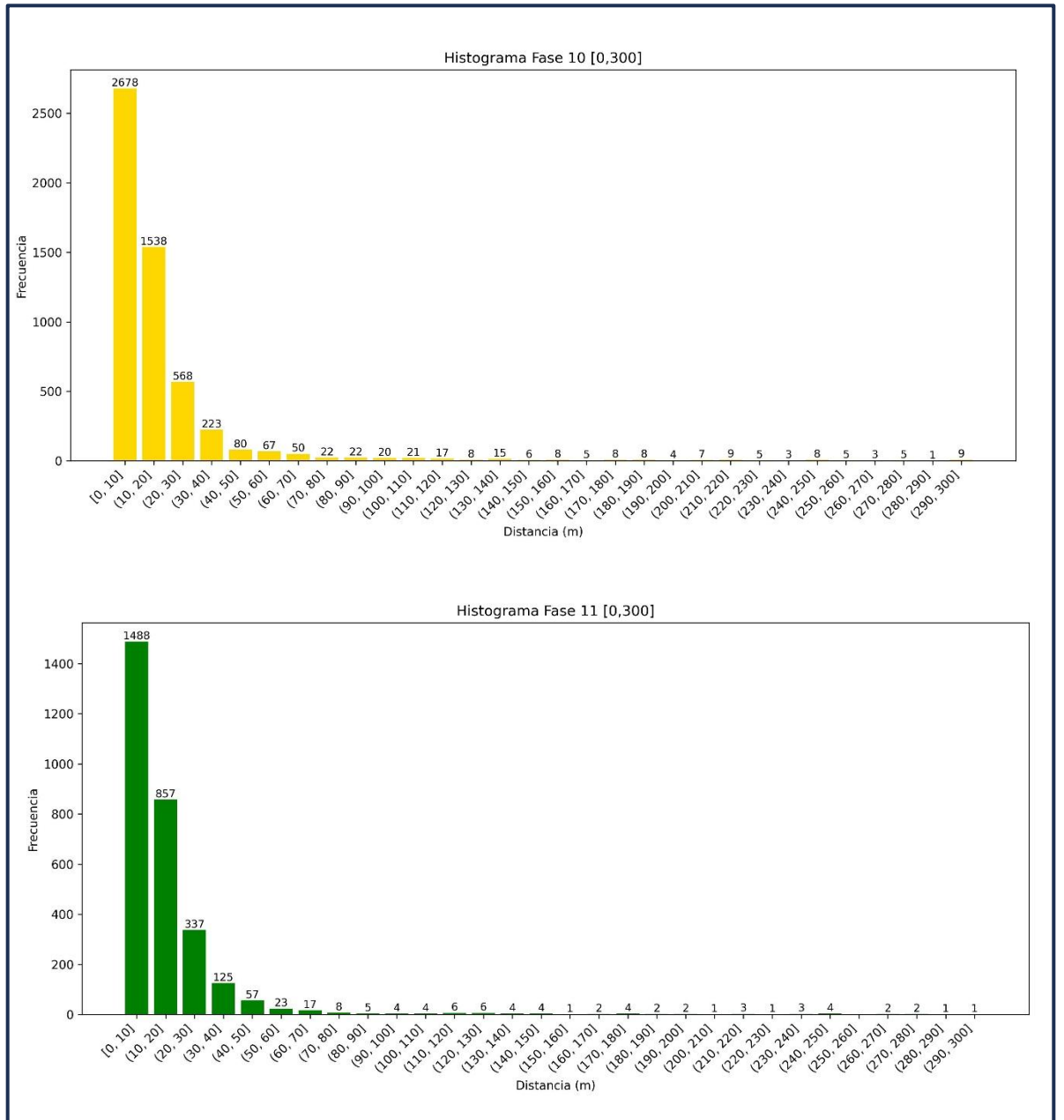
Se realizaron histogramas (Figura 5.1) con la distancia de los datos de mapeo de bancos que hay en el rajo, esto tiene la finalidad de observar la dispersión que poseen los datos para 4 fases (7, 9, 10 y 11), y así escoger tamaño de celda correcto para la grilla que cubrirá todo el rajo. El resultado que entregaron estos histogramas son que los datos con mayor frecuencia están a una distancia menor o igual a 300 metros. Según estos resultados, se hicieron histogramas (Figura 5.2 a y b), estadística descriptiva de los datos (Figura 5.3) y diagramas de Boxplot (Figura 5.4), pero ahora solo tomando los datos que están a una distancia menor o igual a 300 metros de cada fase, lo que arrojó como resultado que el Q4 variara entre 37-64m, la desviación estándar esta entre 59-26, para esto valores de desviación estándar se debe considerar todas las fases tienen cantidades de datos diferentes, esto se debe a que algunas están hace más tiempo que otras en el rajo, por lo tanto, se ha realizado un estudio y control mayor de esa fase, lo que refleja mayor cantidad de datos. Al considerar estos dos valores, se realizó una celda de 50x50m en áreas aleatorias en el rajo y se generaron los estereogramas, lo cual no presento un buen resultado, porque los datos de mapeo de bancos no están distribuidos de forma homogénea en el rajo, esto implica que en algunos sectores hay muy pocos o nulos datos, lo que no ayudaba a generar estereogramas que muestren alguna tendencia, que es lo que se busca. Por lo que, se optó realizar una celda de 100x100m, la cual si contenía una cantidad de datos suficiente para generar estereogramas que muestran una tendencia y también entrega información más detallada del rajo por su tamaño.



**Figura 5.1:** Histogramas de las 4 fases del rajo de MLP, para observar la dispersión de los datos (distancias). Elaboración propia.



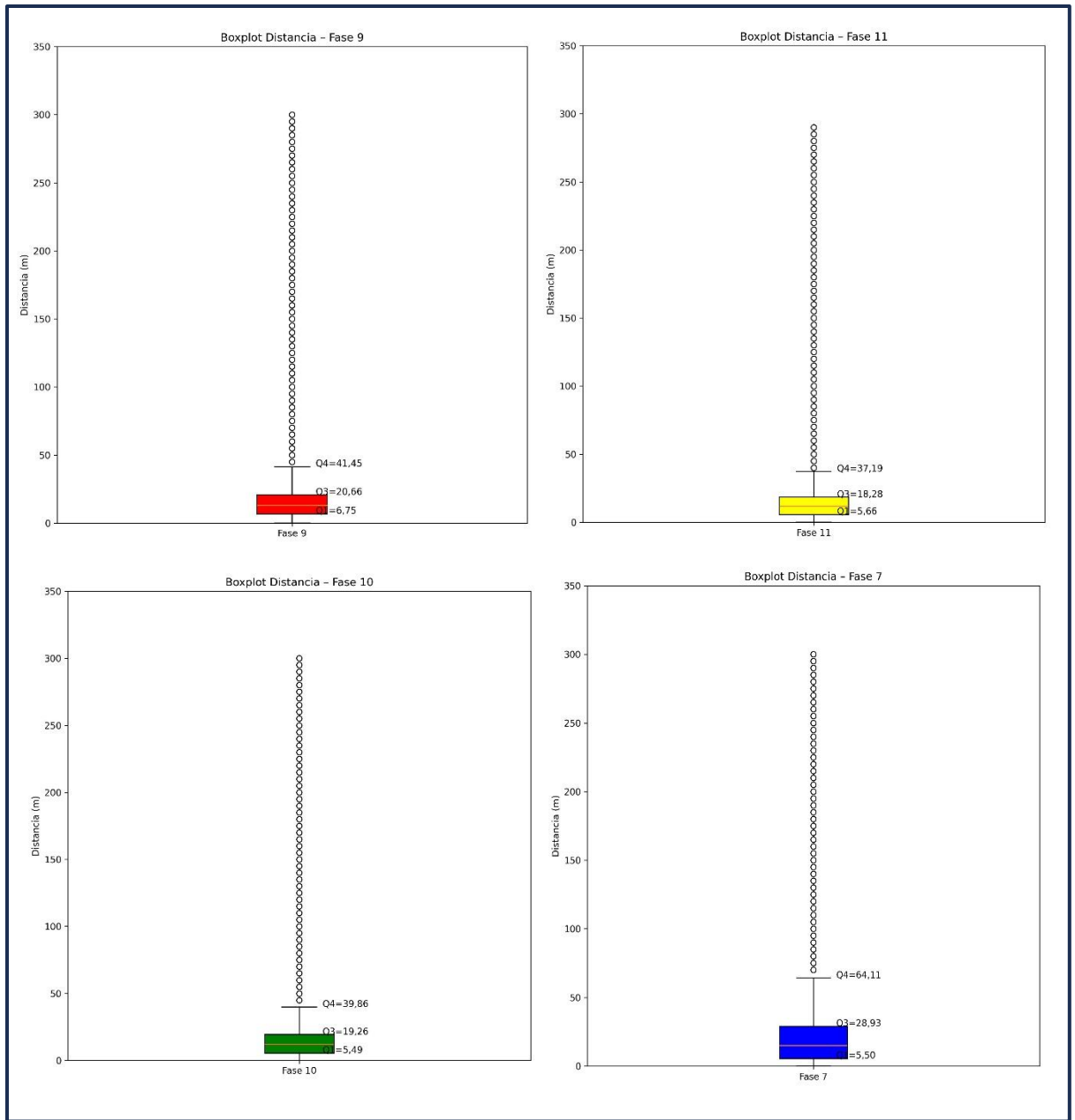
**Figura 5.2 a:** Histogramas de la fase 7 y 9, a una distancia menor o igual de 300 metros del rajo de MLP. Elaboración propia



**Figura 5.2 b:** Histogramas de la fase 10 y 11, a una distancia menor o igual de 300 metros del rajo de MLP. Elaboración propia.

<i>Fase 7 [0,300]</i>		<i>Fase 10 [0,300]</i>	
Media	35,12	Media	19,31
Error típico	0,82	Error típico	0,46
Mediana	12,93	Mediana	10,93
Moda	5,00	Moda	#N/D
Desviación estándar	59,07	Desviación estándar	32,76
Varianza de la muestra	3489,63	Varianza de la muestra	1072,95
Curtosis	6,80	Curtosis	29,53
Coefficiente de asimetría	2,70	Coefficiente de asimetría	4,97
Rango	299,47	Rango	299,26
Mínimo	0,01	Mínimo	0,00
Máximo	299,48	Máximo	299,26
Suma	183058,94	Suma	98922,89
Cuenta	5213,00	Cuenta	5123,00
<i>Fase 9 [0,300]</i>		<i>Fase 11 [0,300]</i>	
Media	18,70	Media	16,92
Error típico	0,55	Error típico	0,50
Mediana	12,40	Mediana	10,57
Moda	#N/D	Moda	#N/D
Desviación estándar	28,13	Desviación estándar	26,71
Varianza de la muestra	791,09	Varianza de la muestra	713,44
Curtosis	42,48	Curtosis	44,45
Coefficiente de asimetría	5,87	Coefficiente de asimetría	5,97
Rango	297,74	Rango	292,10
Mínimo	0,03	Mínimo	0,10
Máximo	297,77	Máximo	292,20
Suma	49641,66	Suma	48347,82
Cuenta	2655,00	Cuenta	2857,00

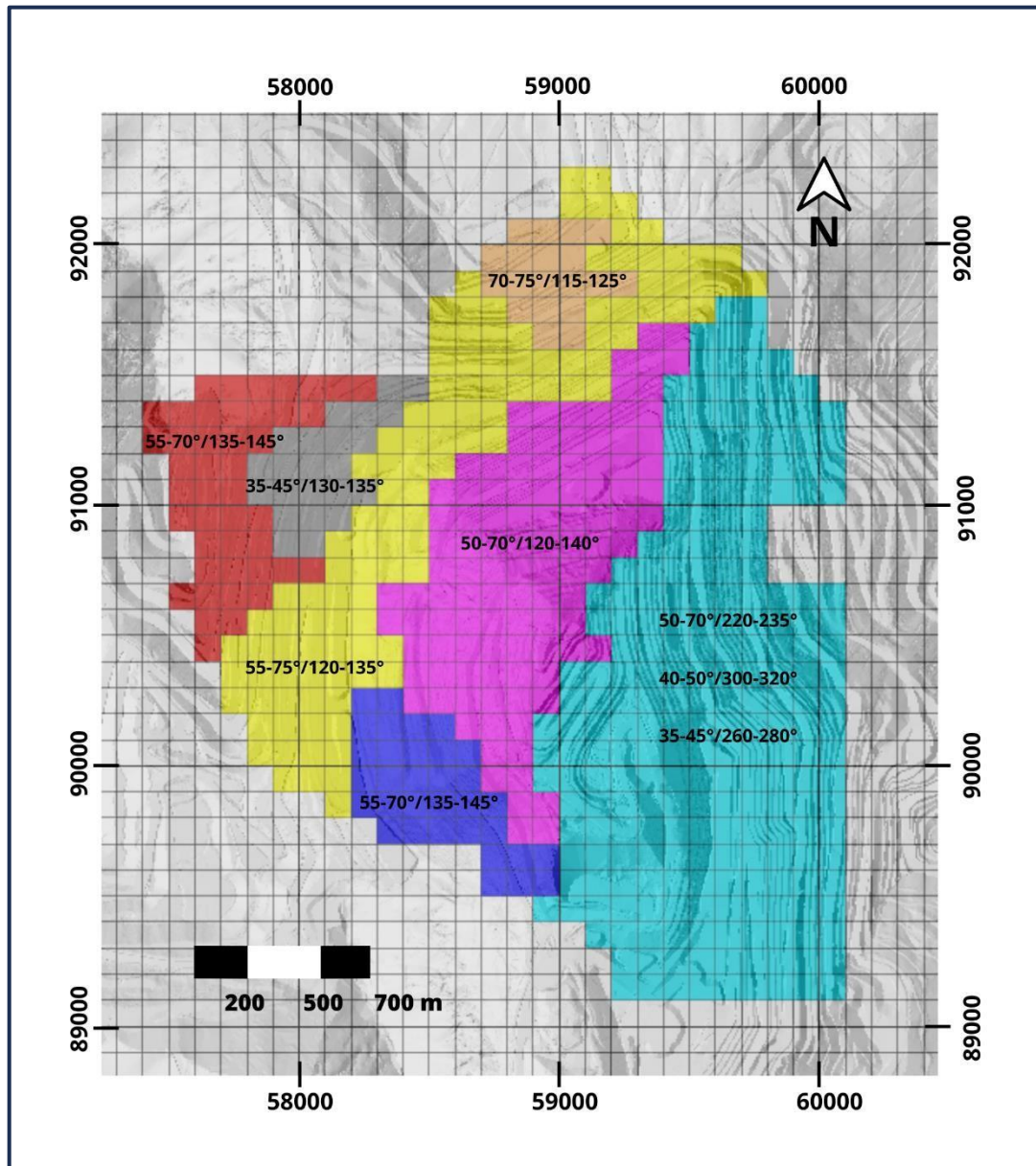
**Figura 5.3:** Estadísticas descriptiva de las 4 fases del rajo de MLP. Elaboración propia.



**Figura 5.4:** Diagramas de Boxplot de las 4 fases del raio de MLP, para observar la dispersión de los datos (distancias). Elaboración propia.

## 5.2. Familias estructurales con información de superficie

Se generaron 612 estereogramas que cubrían todo el rajo de MLP, esto se realizó con la base de datos de mapeo de bancos. Se identificaron 7 áreas estructurales (Figura 5.5) en una primera instancia que están separadas por las familias principales estructurales que están plasmadas en los estereogramas.

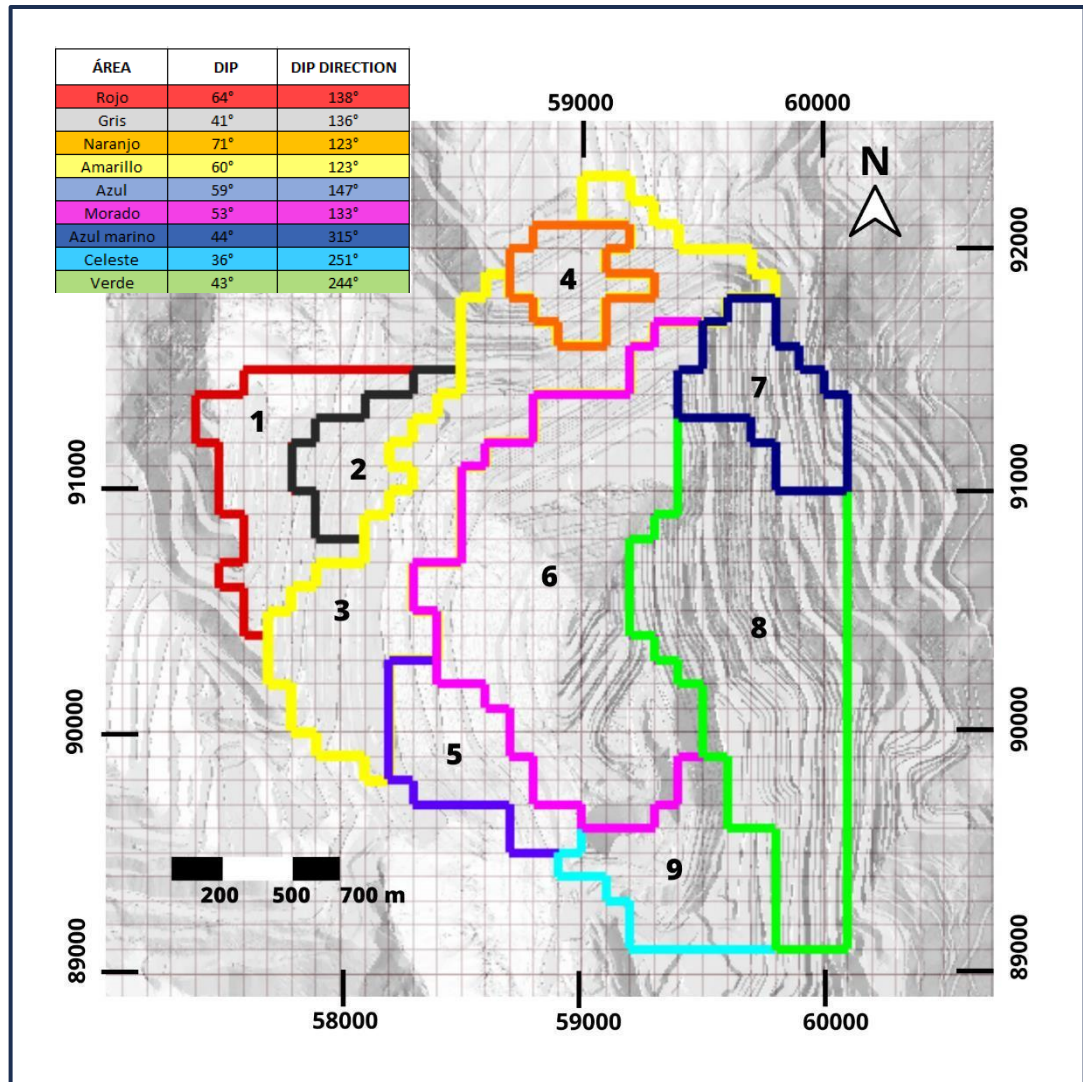


**Figura 5.5:** Orientaciones de las familias principales estructurales y sus áreas en el rajo de MLP.  
Elaboración propia.

Al revisar las familias de la Figura 5.5 se hicieron las siguientes observaciones la familia que esta hacia el lado W del rajo (color celeste) no poseía una tendencia clara (familia principal), para dilucidar esta familia principal se dividió esta área de diferentes formas, hasta llegar a la decisión que el área de color celeste se divide en 3, las cuales al generar los estereogramas de las áreas muestran una tendencia más clara y las familias obtenidas en esta afectan a la estabilidad de las paredes en el rajo en esa zona (Figura 5.6). En el área de color morado se agranda en la zona SW, esto se realizó porque se observó que la familia de Dip  $50^{\circ}$  y Dip direction  $130^{\circ}$  aprox. continuaba en esa zona (Figura 5.6).

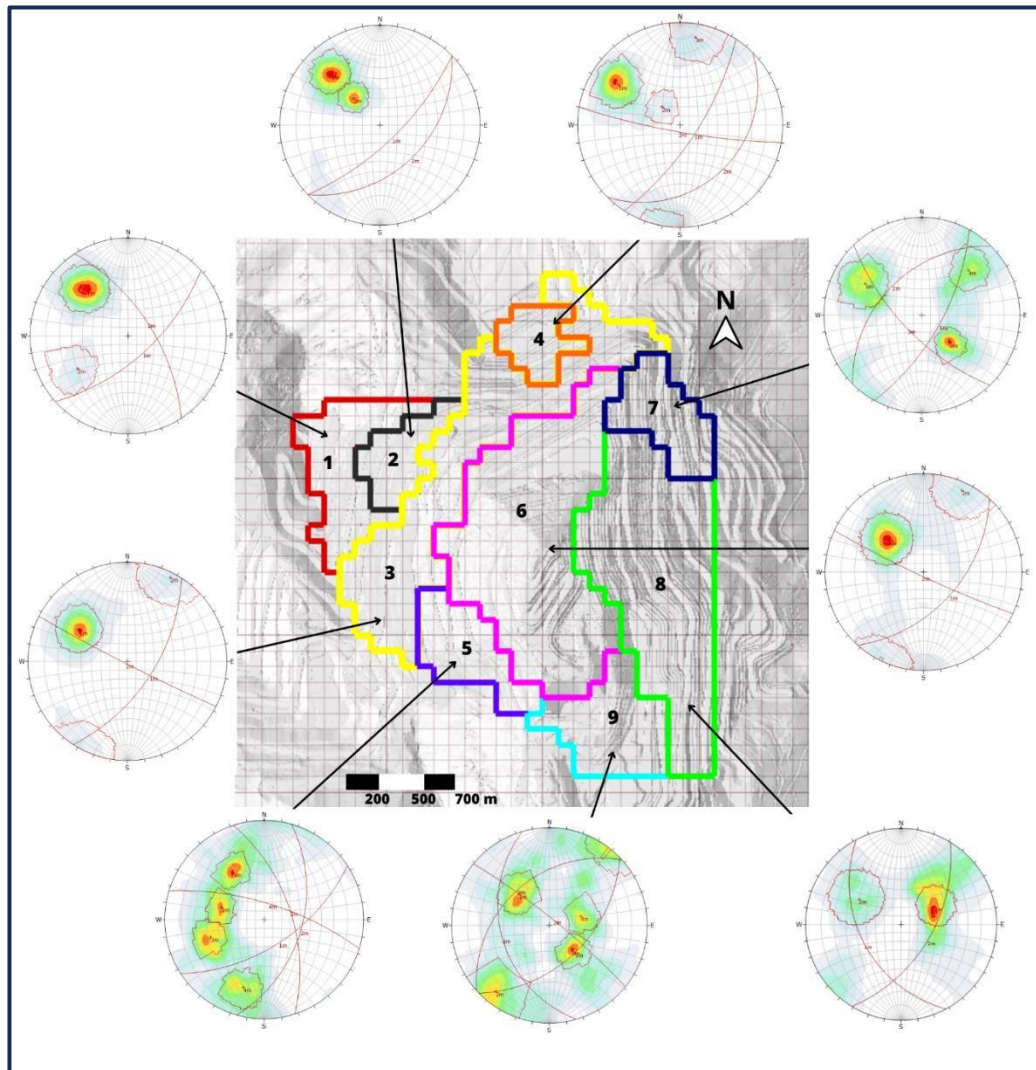
Finalmente quedaron 9 familias estructurales principales distribuidas en el rajo (Figura 5.6) en donde los datos de Dip y Dip direction varía en  $15^{\circ}$  aprox. en una misma familia principal y por el momento para distinguir las entre ellas, se les asigno un color y numero. Nombrándolas de E a W en orden quedan de la siguiente manera:

- Familia estructural o área estructural de color rojo y número 1.
- Familia estructural o área estructural de color gris y número 2.
- Familia estructural o área estructural de color amarillo y número 3.
- Familia estructural o área estructural de color naranja y número 4.
- Familia estructural o área estructural de color azul y número 5.
- Familia estructural o área estructural de color morado y número 6.
- Familia estructural o área estructural de color azul marino y número 7.
- Familia estructural o área estructural de color verde y número 8.
- Familia estructural o área estructural de color celeste y número 9.



**Figura 5.6:** Áreas estructurales con familias principales del rajo de MLP. Elaboración propia.

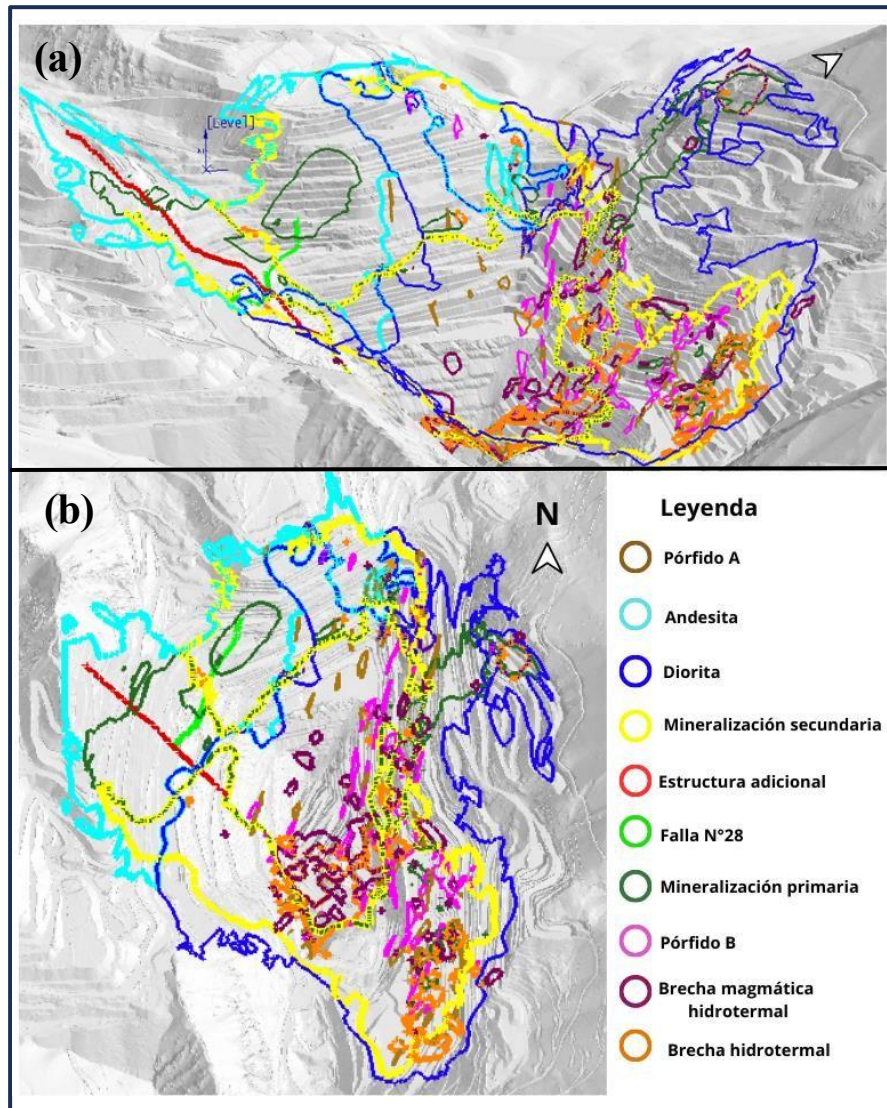
al juntar todos los datos estructurales de superficie de cada área quedaron los siguientes estereogramas (Figura 5.7), que contienen familias principales como también familias secundarias.



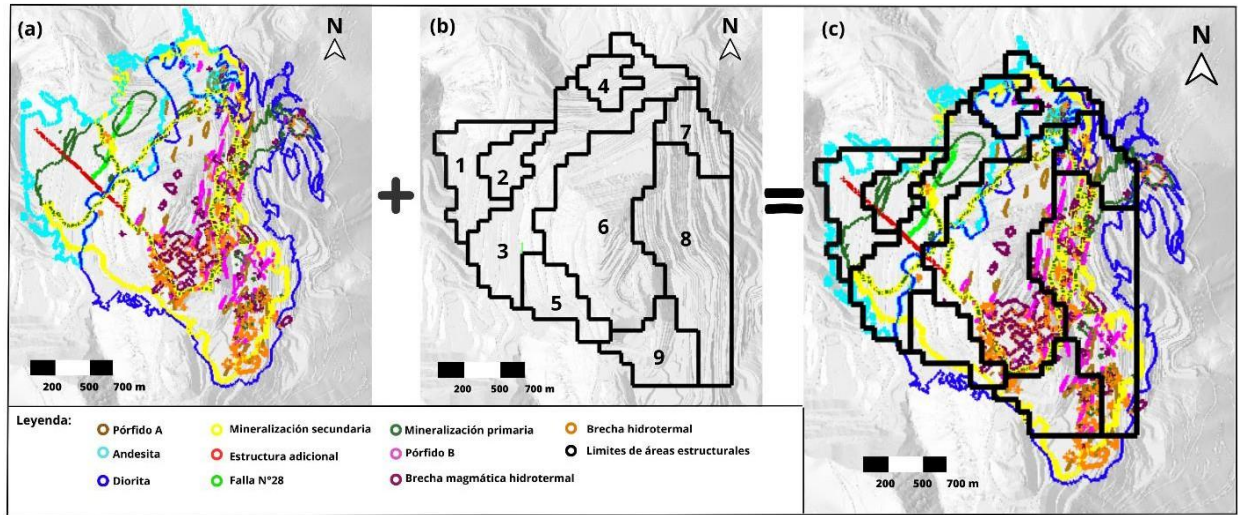
**Figura 5.7:** Áreas estructurales con información de superficie del rajo de MLP. Elaboración propia.

### 5.3. Límites geológicos

Una vez identificadas las familias en superficie, se usó el modelo LAM (litología, alteración, Mineralización) y estructuras para saber si existe coincidencia entre los límites de las áreas estructurales con los límites de algún elemento geológico, esto se hizo de forma digital ocupando el programa Vulcan. Los límites que mejor calzaban con las áreas estructurales se encuentran en la Figura 5.8.



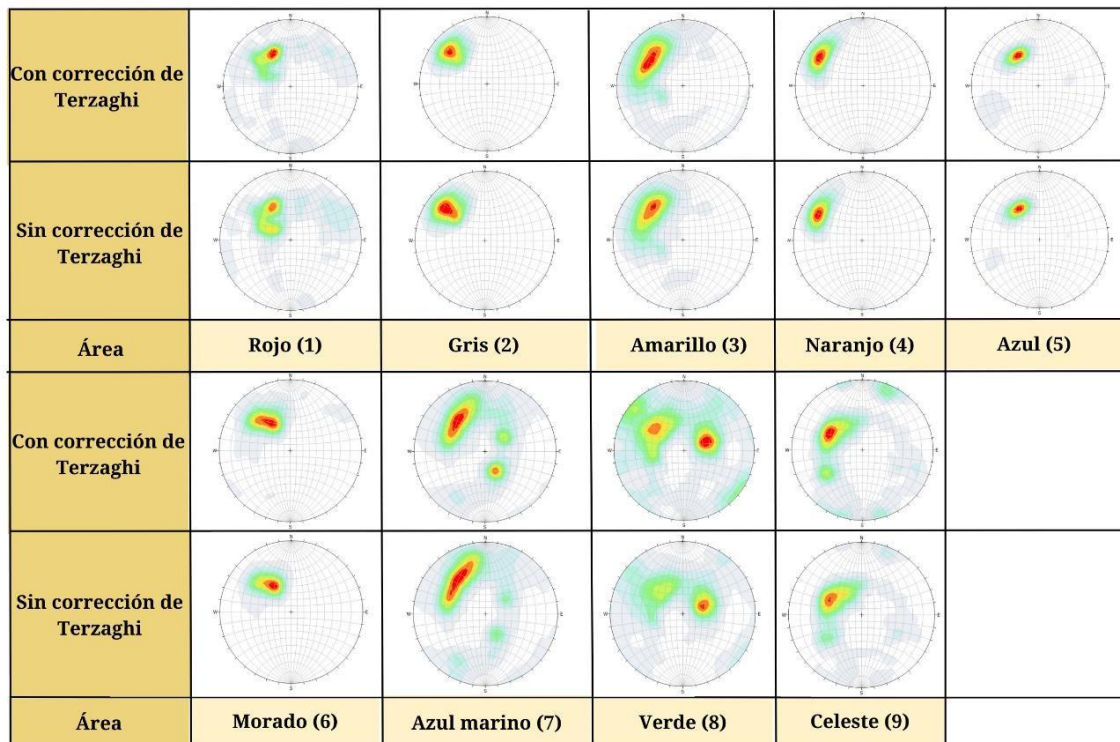
**Figura 5.8:** Límites de elementos geológicos que calzan con las áreas estructurales en diferentes vistas. (a) Vista de perfil. (b) Vista en planta. Elaboración propia.



**Figura 5.9:** Elementos geológicos y áreas estructurales en el rajo de MLP. (a) Límites de elementos geológicos que calzan con las áreas estructurales. (b) áreas estructurales. (c) límites de geológicos más los límites de las áreas estructurales. Elaboración propia.

## 5.4. Estereogramas de sondaje

Al obtener las áreas estructurales superficiales con sus límites geológicos ya definidos, se ocupa la base de datos de sondajes para validar estas áreas en el subsuelo, una vez generada la base de datos de los sondajes y detectado que sondaje está en cada área estructural, se agrupan los datos con largos correspondientes ( los que están a 150 metros de altitud desde la topografía actual y la misma topografía bajada 150 metros, en el programa Vulcan) y se realizan los estereogramas de subsuelo con su respectiva corrección de Terzaghi (Figura 5.10) lo que arroja como resultado para cada área estructural, se aumentó el número de polos de los estereogramas para las familias que están en una dirección más bien paralela la dirección del collar de cada sondaje, con este arreglo matemático que realiza el software DIPS, disminuye el sesgo en los estereogramas y éste se vuelve más representativo a la realidad del sector donde se realizó el sondaje.

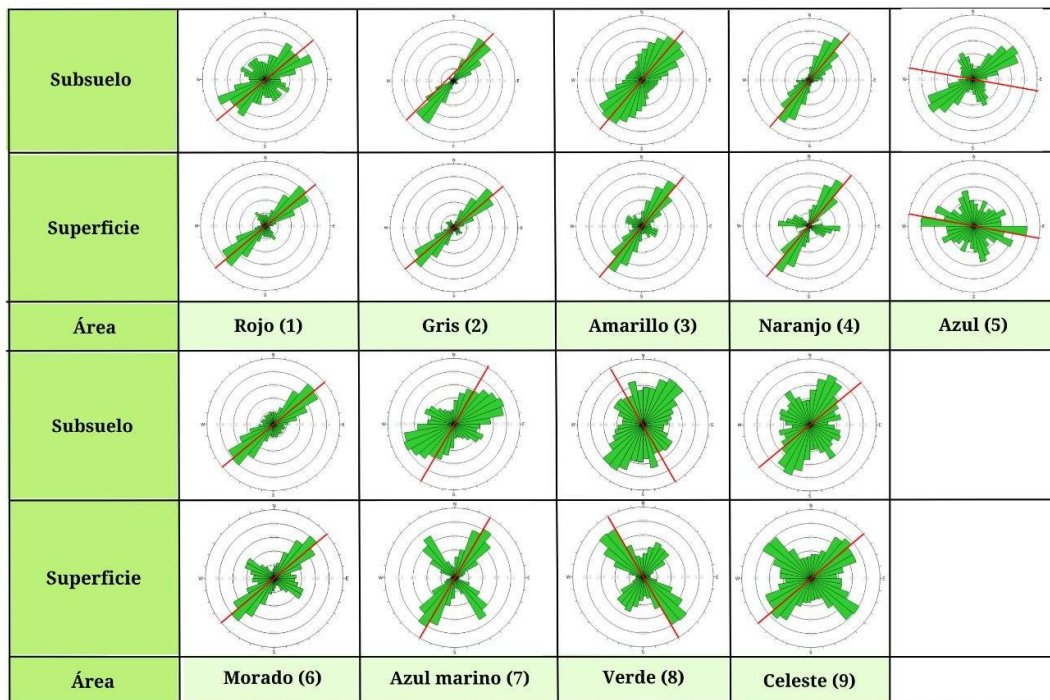


**Figura 5.10:** Estereogramas de subsuelo de cada área con y sin corrección de Terzaghi. Elaboración propia.

### 5.5. Validación de las familias estructurales y sus límites

Para contrastar y validar la información de superficie, se comparan los estereogramas de superficie con los de subsuelo para observar si existe similitud en las familias que se forman en cada área. Se compararon estos pasando los estereogramas de cada área a diagramas de roseta (Figura 5.11) para visualizar los planos de cada familia de manera más fácil. En estos se puede observar que los diagramas son muy similares en las familias principales de cada área, por lo tanto, existe una correlación y continuidad de las estructuras que hay en superficie como en subsuelo, esto da como resultado que se validen las 9 áreas que se realizaron en superficie.

Se debe considerar que la información de sondaje es la que debe validar a la de superficie y no al revés, ya que los dominios estructurales es información que se usa en la superficie del terreno, como talud y bancos en el rajo.



**Figura 5.11:** Diagramas de roseta de superficie y subsuelo de cada área estructural que muestra las direcciones (línea roja) familias principales de superficie. Elaboración propia.

## **5.6. Estereogramas sintéticos**

La información que hay de subsuelo es mucho mayor en cuanto a los datos estructurales que la información que hay de superficie (tabla 4.1), para que la información de superficie no se pierda en la sondaje, cuando se establezcan los estereogramas de los dominios, se realizaron estereogramas sintéticos (Figura 5.12) que consisten que los estereogramas de sondaje tengan el mismo soporte que los de superficie, pero conservan las familias estructurales de sondaje, esto se realizó también con las familias secundarias de superficie para que esta información no se pierda. El objetivo de hacer estos estereogramas es que la información de superficie y de sondaje tenga el mismo soporte, para cuando esta información se agrupe en los estereogramas de los dominios quedan todas las familias representadas en ellos, sea superficie, sondaje y familias secundarias de superficie.

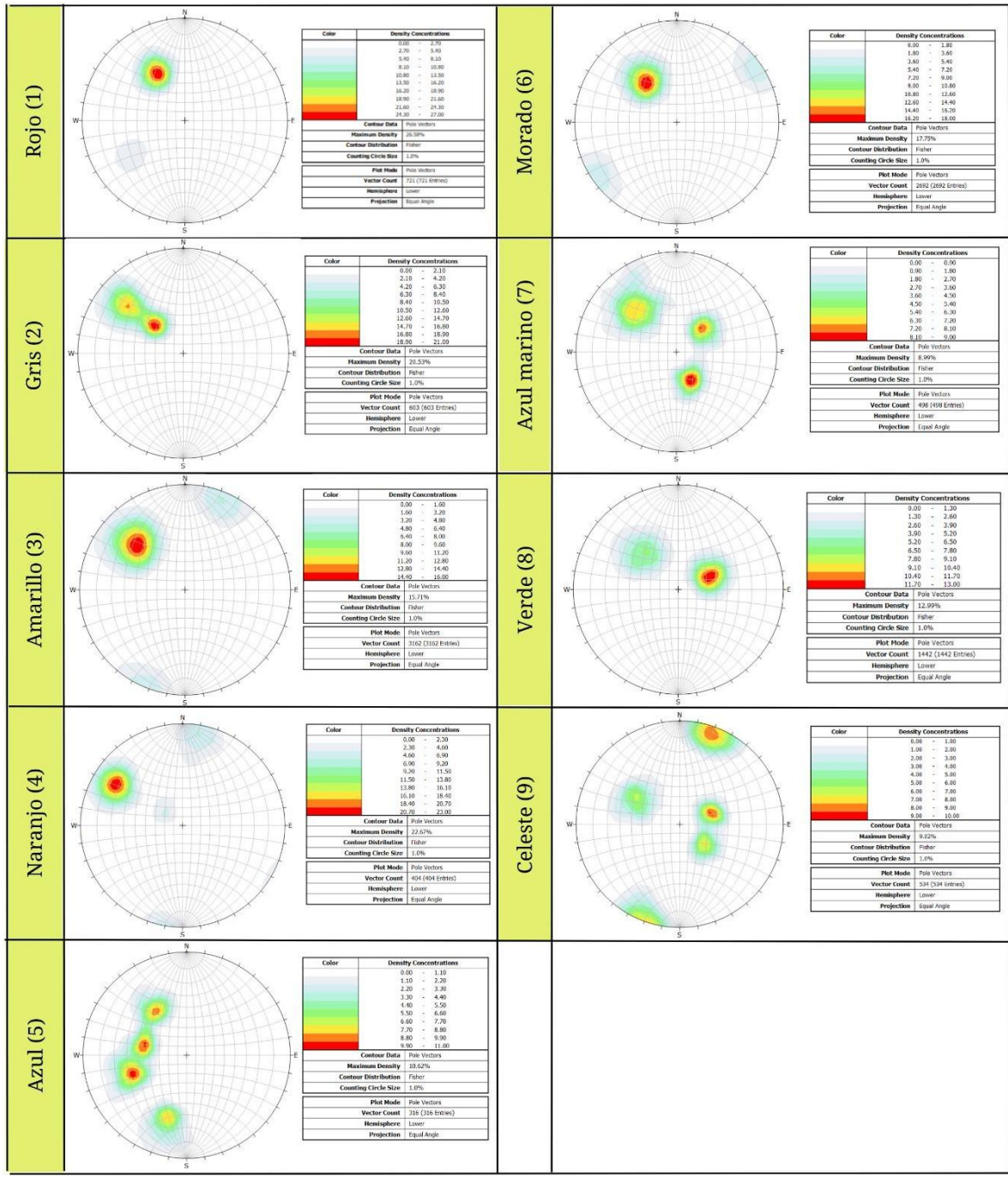


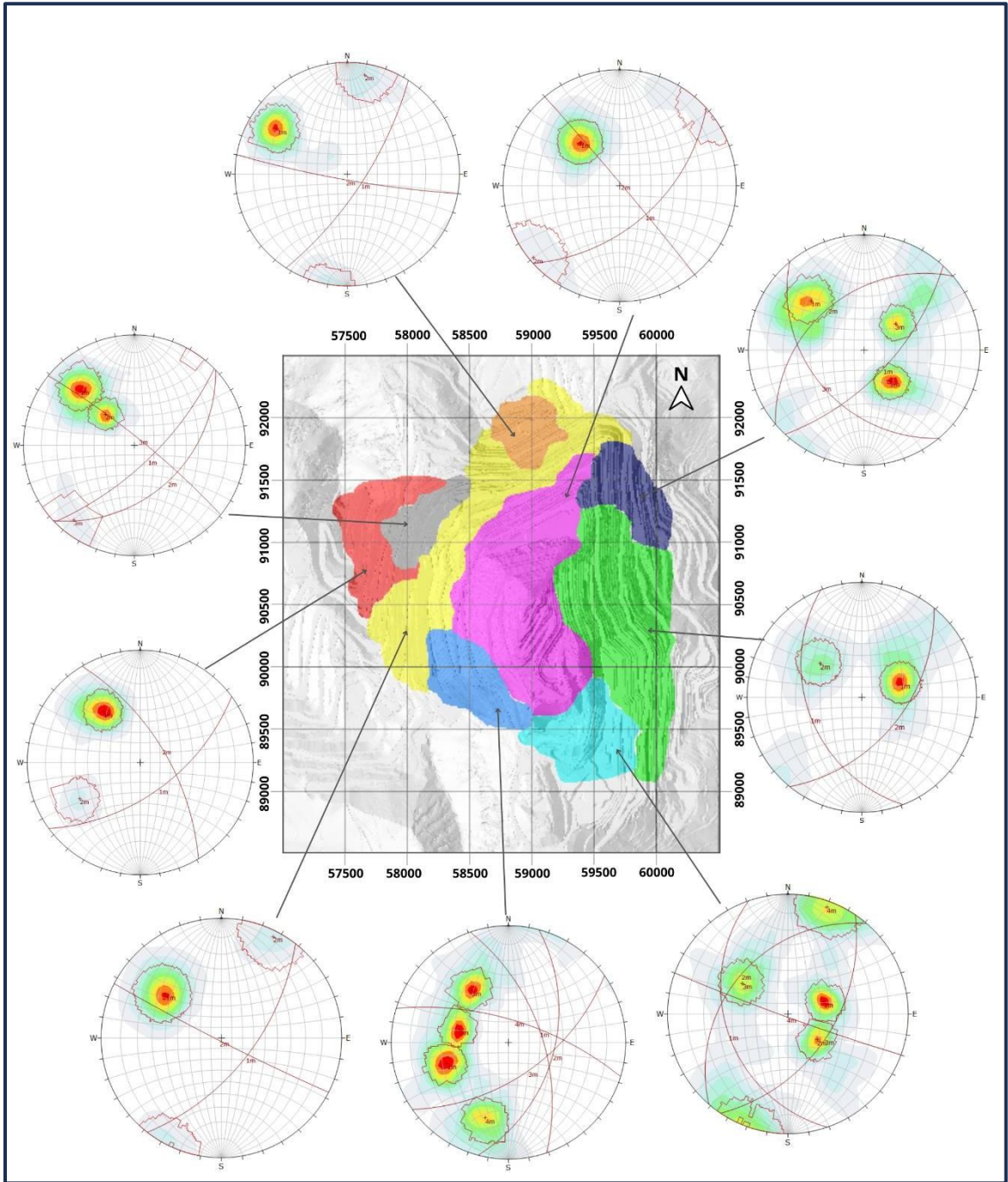
Figura 5.12: Estereogramas sintéticos de cada área estructural. Elaboración propia.

## 5.7. Redefinición de dominios estructurales 2023 de MLP

Una vez unida la información de superficie con la información de los estereogramas sintéticos de cada área, se generaron los estereogramas de cada dominio, los cuales son 9 y cada uno tiene sus familias principales como secundarias (Figura 5.13).

Ahora que las áreas estructurales pasaron a ser dominios, se les va a otorgar un nombre de acuerdo con el lugar geográfico que están ubicadas en el rajo, donde:

- Área estructural de color rojo pasa a definirse como dominio Oeste
- Área estructural de color gris pasa a definirse como dominio Noroeste
- Área estructural de color amarillo pasa a definirse como dominio Centro-oeste
- Área estructural de color naranja pasa a definirse como dominio Norte
- Área estructural de color azul pasa a definirse como dominio Sur
- Área estructural de color morado pasa a definirse como dominio Central
- Área estructural de color azul marino pasa a definirse como dominio Noreste
- Área estructural de color verde pasa a definirse como dominio Este
- Área estructural de color celeste pasa a definirse como dominio Sureste



**Figura 5.13:** Dominios estructurales de MLP para el año 2023. Elaboración propia.

**Dominio Oeste:** está limitada hacia el W, N y S por andesita (lado izquierdo de la Figura 5.13) y hacia el E por la zona lixiviada (lado derecho de la Figura 5.13), hacia el SE por una falla con dirección de inclinación NW (llamada estructura adicional)). La litología que presenta en esta zona es una roca extrusiva de composición andesítica que hacia el sur se encuentra con mineralización primaria y secundaria (Figura 5.9).

**Dominio Noroeste:** está limitada hacia el este por la zona lixiviada (lado derecho de la Figura 5.13), hacia el SW por una falla con dirección de inclinación NW (llamada estructura adicional) y hacia la parte su oeste por una falla con dirección NE (llamada falla 28). La litología que presenta en esta zona es una roca extrusiva de composición andesítica y gran parte de esta zona hacia E se encuentra con mineralización primara (Figura 5.9).

**Dominio Centro-oeste:** está limitado por el W por una falla con dirección NE (llamada falla 28), hacia el E por el límite de la zona mineralizada secundaria y primaria. La litología que presenta esta zona es una roca extrusiva de composición andesítica, que se encuentra con mineralización primara y secundaria (Figura 5.9).

**Dominio Norte:** posee un límite litológico que es roca de composición andesítica y diorítica. La litología presente en esta zona es una roca intrusiva de composición diorítica que se encuentra con mineralización secundaria (Figura 5.9).

**Dominio Sur:** está limitado por el NE por el límite de la zona mineralizada secundaria y primaria. La litología presente en esta zona es una roca intrusiva de composición diorítica, que se encuentra con mineralización secundaria (Figura 5.9).

**Dominio Central:** está limitado por el W por el límite de la zona mineralizada secundaria y primaria, hacia el NW por los pórfidos A y B, y hacia el SW por brechas magmáticas

hidrotermales y brechas hidrotermales. La litología que presenta esta zona es una roca intrusiva de composición diorítica, que se encuentra con mineralización primaria y hacia el sur de esta zona están presentes las brechas magmáticas hidrotermales y brechas hidrotermales. (Figura 5.9).

**Dominio Noreste:** está limitado por el W y SE por el límite de la zona mineralizada secundaria y primaria. La litología presente en esta zona es una roca intrusiva de composición diorítica, donde se encuentra levemente con mineralización secundaria y primaria (Figura 5.9).

**Dominio Este:** posee dos límites litológicos que son los pórfidos A y B hacia el NW y las brechas magmáticas hidrotermales y brechas hidrotermales hacia el SW. La litología presente en esta zona es una roca intrusiva de composición diorítica, donde la mitad de esta zona se encuentra con mineralización secundaria (Figura 5.9).

**Dominio Sureste:** posee un límite litológico hacia el NW que son las brechas magmáticas hidrotermales y brechas hidrotermales; y hacia el NE por los pórfidos A y B. La litología presente en esta zona es una roca intrusiva de composición diorítica y los tipos de brechas hacia el lado E de esta zona, estas se encuentran con mineralización secundaria (Figura 5.9).

**Tabla 5.1:** Detalle de las familias estructurales que contienen los dominios estructurales de MLP.

Domino	ID	Set	Dip	DipDir	N° polos	% polos	Total polos	Fisher's K	Desviación estandar
Oeste	1	1m	58°	144°	798	39%	2042	67.70	12
	2	2m	64°	59°	186	9%		68.09	12
					1058	52%			
Noroeste	1	1m	70°	136°	321	29%	1113	68.72	12
	2	2m	42°	137°	265	24%		83.83	11
	3	3m	82°	39°	53	4%		73.44	12
					474	43%			
Centro-oeste	1	1m	61°	128°	4278	44%	9688	41.94	15
	2	2m	86°	204°	1230	13%		41.07	16
					4180	43%			
Norte	1	1m	73°	123°	407	34%	1190	74.75	12
	2	2m	84°	190°	158	13%		53.66	14
					625	53%			
Sur	1	1m	58°	71°	167	16%	1039	66.38	12
	2	2m	47°	105°	151	15%		73.54	12
	3	3m	57°	145°	143	14%		74.28	12
	4	4m	68°	17°	127	12%		69.77	12
					451	43%			
Central	1	1m	53°	138°	3156	35%	8935	49.13	14
	2	2m	88°	50°	665	7%		42.21	15
					5114	53%			
Noreste	1	1m	64°	131°	273	17%	1619	45.91	15
	2	2m	38°	320°	247	15%		60.74	13
	3	3m	39°	230°	182	11%		71.38	12
					917	57%			
Este	1	1m	39°	249°	1245	22%	5600	49.66	14
	2	2m	50°	129°	771	14%		42.42	15
					3584	64%			
Sureste	1	1m	35	251,34°	244	13%	1866	61.87	13
	2	2m	36°	311°	222	12%		60.15	13
	3	3m	49°	124°	224	12%		51.06	14
	4	4m	87°	200°	209	11%		54.39	14
					967	52%			

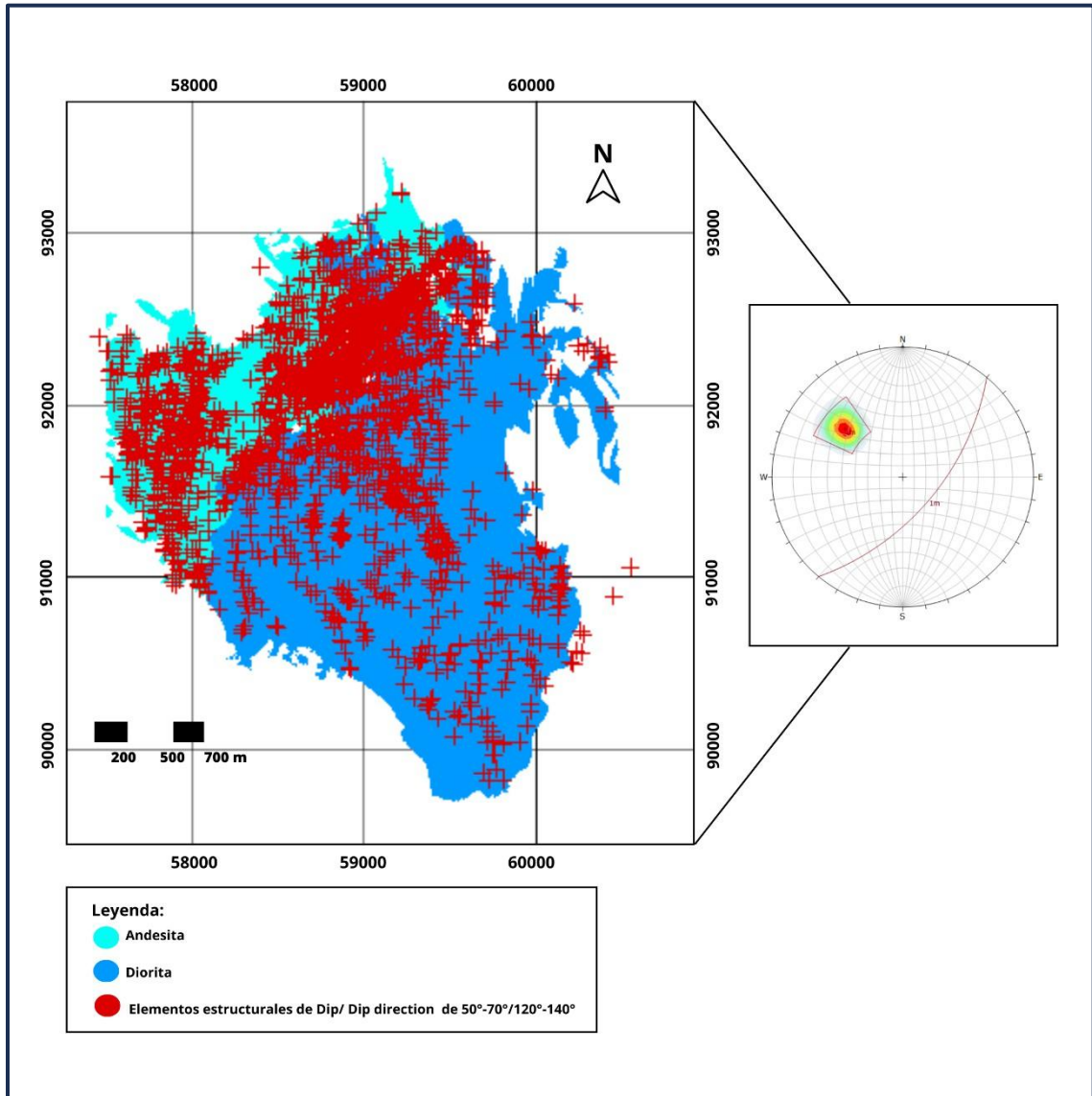
## **6. DISCUSIONES**

### **6.1. Modelo de los dominios estructurales**

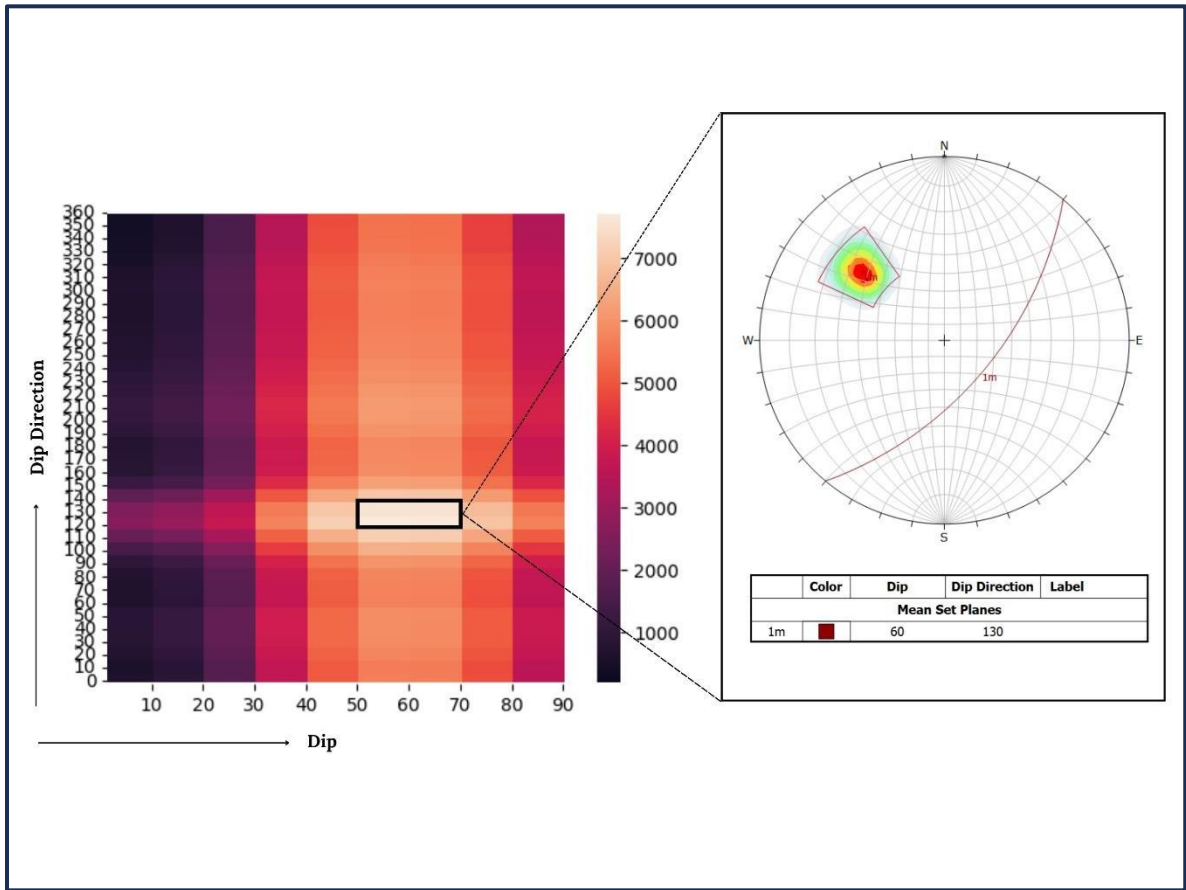
Este modelo exhibe la zonificación de la orientación de las estructuras (Dip y Dipdir) presentes en el rajo, con límites geológicos definidos. El cual representa las diversas orientaciones preferenciales de fracturamiento (fabrica) en el macizo rocoso. Esto deja en evidencia la correlación entre las variaciones en las direcciones de las estructuras del rajo y los diversos elementos geológicos, como Mineralizaciones, alteraciones y cambios litológicos. Los dominios estructurales son un modelo que describe la geometría de las estructuras en superficie y tiene implicancia directa en los diseños geomecánicos, así como en una planificación óptima de la tronadura en el rajo. Al comprender y definir adecuadamente estos dominios, se pueden tomar decisiones más informadas para asegurar la estabilidad del talud, mejorar la eficiencia y seguridad de las operaciones Mineras.

### **6.2. Direcciones estructurales con mayor densidad en el rajo**

En la Figura 6.1, se puede observar los elementos estructurales (cruces rojas) que están con mayor concentración según lo indica el mapa de calor (Figura 6.2). Estos elementos estructurales tienen dirección NE y están distribuidos de forma heterogénea en todo el rajo de MLP, ya que en la zona W del rajo tiene una mayor densidad que en la zona E. Esto se debe a que, las rocas presentes en la zona W del rajo son extrusivas de composición andesítica y las rocas que están hacia el centro y E del rajo son intrusivas de composición diorítica, estos dos tipos de rocas poseen una génesis diferente en cuanto a presión, temperatura y tiempo de formación, lo que implica que tengan características diferentes, donde algunas de estas son el grado de resistencia a la deformación y su permeabilidad, siendo las rocas extrusivas menos resistentes y más permeables que las rocas intrusivas, es por esto que el último evento deformacional según Perelló et al., 2012, está plasmado en mayor grado en el lado W del rajo que en el lado E. También, dejando como evidencia de esto que en la zona W del rajo las familias principales en los estereogramas de los dominios estructurales son NE.



**Figura 6.1:** Elementos estructurales con mayor densidad en el rajo, superpuestos a dos rocas andesita y diorita. Elaboración propia.



**Figura 6.2:** Mapa de calor, en el cual se genera un estereograma con la familia con mayor densidad de datos estructurales (50-70°/120-140°). Elaboración propia.

### **6.3. Importancia de la corrección de Terzaghi**

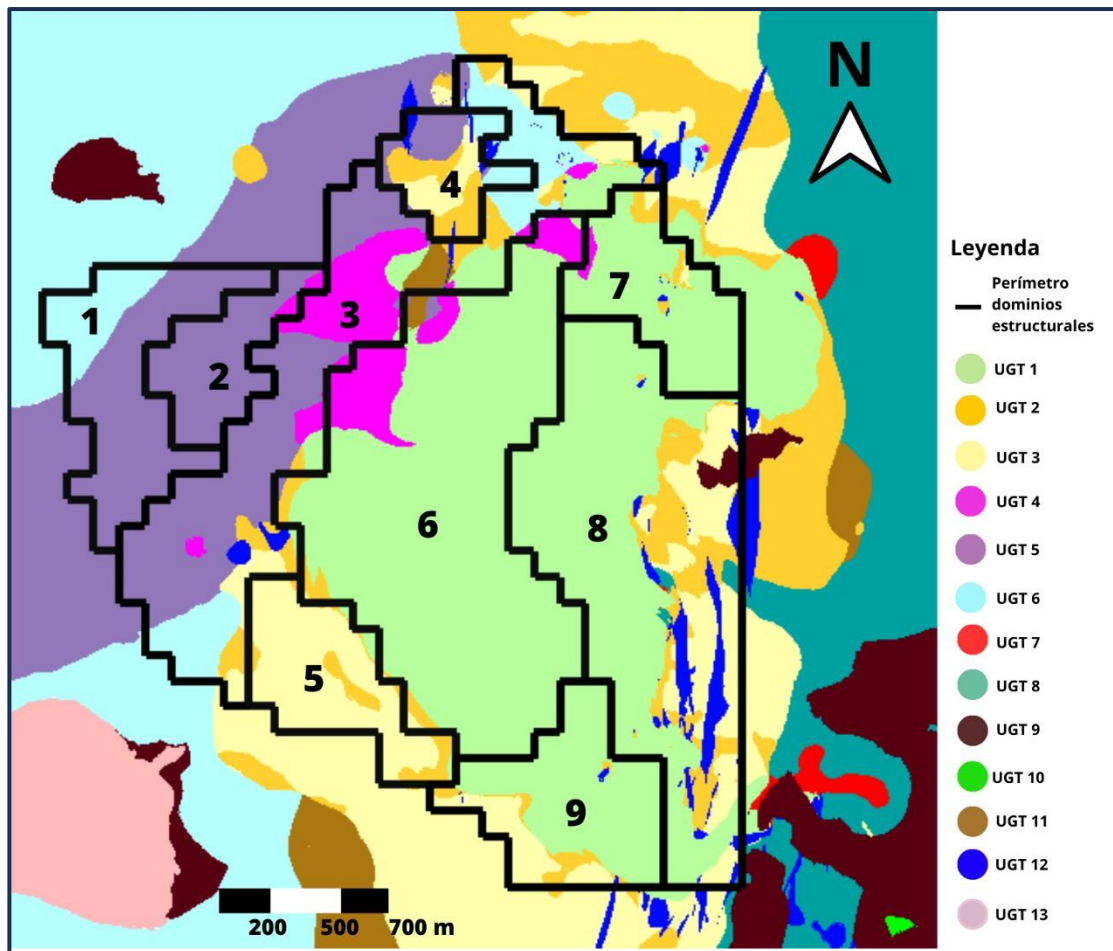
Es de gran importancia realizar la corrección de Terzaghi en el programa DIPS para los sondajes, ya que esta evitará el sesgo que se produce en un sondaje. Los datos estructurales de sondajes no siempre representan la verdadera orientación de las estructuras debido a la desviación de este a medida que se va introduciendo a subsuelo, como tampoco es representativo de todas las estructuras del área donde se realiza, ya que en el testigo quedan representadas las estructuras perpendiculares y oblicuas a la dirección del sondaje, quedando fuera las estructuras paralelas. Para realizar esta corrección en DIPS se necesita tener los datos estructurales de las diferentes traversas que se producen en un sondaje, la orientación y dirección del collar, con estos datos el programa realiza un ajuste matemático que representa la verdadera orientación de estas mediciones en el subsuelo y aumentando el soporte de estructuras que se encuentra de forma más bien paralela a la orientación del sondaje, evitando el sesgo del sondaje y también para no ocupar datos errores a futuro.

### **6.4. Relación entre el modelo de los dominios estructurales y las unidades geotécnicas**

En la Figura 6.3, se relaciona las unidades geotécnicas (UGT) con dominios estructurales se obtiene que para que el dominio Oeste está compuesta por las UGT 5 y 6, donde la UGT 5 litológicamente posee rocas volcano-sedimentarias con un RQD promedio de 27 y un RMR promedio de 42, caracterizando esta unidad como una zona de mala calidad geotécnica y UGT 6 que está compuesta por rocas volcánicas de composición andesítica, estas presenta un RQD promedio de 51 y un RMR promedio de 53, caracterizando esta unidad como una zona de regular calidad geotécnica. El dominio Noroeste está compuesta por la UGT 5 litológicamente posee rocas volcano-sedimentarias con un RQD promedio de 27 y un RMR promedio de 42, caracterizando esta unidad como una zona de mala calidad geotécnica. El dominio Centro-oeste está compuesta por la UGT 4 y 5 principalmente, donde la UGT 4 litológicamente posee rocas volcano-sedimentarias con un RQD promedio de 27 y un RMR promedio de 42, caracterizando esta unidad como

una zona de mala calidad geotécnica y la UGT 5 está compuesta litológicamente por rocas volcánicas de composición andesítica, esta presenta un RQD promedio de 95 y un RMR promedio de 76, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica. El dominio Norte está compuesta por la UGT 2, 3 y 5 principalmente, donde la UGT 2 está compuesta principalmente por diorita, corresponde a la zona de Mineralización hipógena, presenta un RQD promedio de 84 y un RMR promedio de 64, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica; la UGT 3 está compuesta litológicamente por diorita en este dominio, presenta un RQD promedio de 81 y un RMR promedio de 60, caracterizando esta unidad como una zona de buena a regular calidad geotécnica y la UGT 4 litológicamente posee rocas volcano-sedimentarias con un RQD promedio de 27 y un RMR promedio de 42, caracterizando esta unidad como una zona de mala calidad geotécnica. El dominio Sur está compuesto por las UGT 2 y 3, donde la UGT 2 está compuesta principalmente por diorita, corresponde a la zona de Mineralización hipógena, presenta un RQD promedio de 84 y un RMR promedio de 64, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica y la UGT 3 está compuesta litológicamente por diorita en este dominio, presenta un RQD promedio de 81 y un RMR promedio de 60, caracterizando esta unidad como una zona de buena a regular calidad. El dominio Central está compuesto por las UGT 1 y 4, donde la UGT 1 está compuesta principalmente por diorita, presenta un RQD promedio de 98 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica. El dominio Noreste está compuesto por la UGT 1 casi por completo, está compuesta litológicamente por diorita, correspondiendo a la zona de mineralización hipógena y un RQD promedio de 98 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica. Los dominios Este y Sureste está compuesta por la UGT 1, 2, 3 y 12 principalmente, donde UGT 1 está compuesta litológicamente por diorita, pórfido A, B y D en el límite oeste correspondiendo a la zona de mineralización hipógena y un RQD promedio de 98 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica, la UGT 2 está compuesta principalmente por diorita, corresponde a la zona de mineralización hipógena, Presenta un RQD promedio de 84 y un RMR promedio de 64, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica, la UGT 3 está compuesta

litológicamente por diorita en este dominio, presenta un RQD promedio de 81 y un RMR promedio de 60, caracterizando esta unidad como una zona de buena a regular calidad geotécnica y la UGT 12 corresponde a pórfidos de composición andesítica y dacítica y brechas hidrotermales y presenta un RQD promedio de 83 y un RMR promedio de 57, caracterizando esta unidad como una zona de regular calidad geotécnica.



**Figura 6.3:** Unidades geotécnicas (UGT) en los diferentes dominios estructurales. Elaboración propia.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La familia estructural NE se encuentra presente en todos los estereogramas de los dominios estructurales de MLP 2023 (Figura 5.13). Esta familia corresponde al último evento deformacional según Perelló et al., 2012, quedando registrado en los lineamientos de arsénico en el rajo (Figura 2.6). En la zona NW del rajo esta familia tiene una mayor presencia, esto se debe a dos razones principales, la primera es que en esta zona se encuentra la Fm. Pelambres (secuencia volcano-sedimentaria) sin presencia de intrusivos menores y la segunda es por la orientación que tiene el rajo, donde en esta zona existe una mayor inestabilidad de los taludes por la familia NE, provocando fallas planas y/o formaciones de cuña. Estos dos factores generan que la familia estructural NE se encuentre como familia principal de los estereogramas de los dominios Oeste, Noroeste, Centro-oeste, Norte, Sur y Central.

En la parte NE del rajo hay una mayor variedad de litologías causada por el emplazamiento de pórfidos, brechas y diques. La temporalidad de este emplazamiento, junto con la superposición de eventos deformacionales de tipo frágil en la región, generan una dispersión en las orientaciones estructurales, sin un patrón claro o una familia estructural predominante, lo que influye en el registro de los estereogramas de los dominios estructurales Noreste, Este y Sureste.

Los dominios estructurales tienen como finalidad un uso operacional dentro del rajo de MLP, en el área de perforación y tronadura, se ocupan para definir la orientación de la secuencia de iniciación, ya que esta debe ser lo más perpendicular posible a los sistemas estructurales principales de los dominios presentes en el área que se desea tronar, esto tiene como objetivo no activar las estructuras del sector; en el área de Geotecnia se usa para calcular el ancho de berma para que contenga las caídas de rocas y/o derrames y para el análisis de estabilidad del talud. Teniendo en cuenta el uso de los dominios estructurales, es relevante al momento de establecerlos considerar las pequeñas variaciones estructurales que se encuentran en el rajo, en este caso las que tengan la familia

estructural NE, como también que quede plasmado en los estereogramas las familias secundarias, que dependiendo en la zona espacial que se encuentren pueden ser las que generen la mayor inestabilidad en el talud, que afecta directamente a la operación en el rajo de MLP.

Teniendo en cuenta que el software DIPS es un programa estadístico que considera solo la orientación de las estructuras, se recomienda para generar los dominios estructurales en el futuro, la persistencia, ya que una falla de un metro no tiene el mismo impacto que una de 40 metros, y la densidad de fracturas, esto ayudará a que los dominios sean aún más representativos de un área del rajo. Otro parámetro para considerar, es el relleno de las estructuras, ya que este se relaciona con la estabilidad de los taludes, y el tipo de relleno, distinguiendo entre rellenos duros y blandos, otorgándole mayor importancia a los segundos, debido a su menor resistencia al deslizamiento, este parámetro podría estar como un comentario en cada área de cada dominio, el cual sería útil para la operación.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Antofagasta Minerals (2022), Quienes somos, Los Pelambres recuperado de <https://web.pelambres.cl/quienes-somos/>

Alvarez, P. (1996), Los depósitos triásicos y jurásicos de la Alta Cordillera de San Juan, in Geología de la Región del Aconcagua, Provincias de San Juan y Mendoza: Dirección Nacional del Servicio Geológico [Argentina], Anales, v. 24, no. 14, p. 59–137.

Butler, R.F. (1992). Paleomagnetism; magnetic domains to geologic terranes. (Chapter 6), Blackwell Science.

Castelli, J.C. (2006), Geología de Los Pelambres y El Pachón: Geovectra, informe para AMSA, Santiago, p. 35.

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-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°–36°SL): Journal of South American Earth Sciences, v. 15, p. 117–139.

Contreras, C. (2019), Dominios estructurales. Minera Los Pelambres. P. 4

Contreras, C. (2022), Actualización modelo estructural y dominio. Minera Los Pelambres. P. 24.

Fedorowich, J. (2021), Reporte técnico “Actualización 2021 de las estructuras Modelo geológico para Los Mina Pelambres, Chile”. Minera Los Pelambres. P. 4-6; 21-25; 41-44;111- 121.

Fernández, R.R., Brown, R.F., y Lencinas, A.N. (1974), “Pachón,” un nuevo pórfido cuprífero argentino, Dto. Calingasta, Prov. de San Juan, República Argentina: Congreso Geológico Argentino, 5th, Buenos Aires, 1974, Actas, v. 2, p. 77–89.

Ferrada, W. (2022), Nota Técnica “Actualización modelo estructural, de caracterización y resistencia”. Minera Los Pelambres. P 3-6.

Gajardo, J. (2019), Solicitud de autorización “actualización Método de explotación” (C1816-INF-001-0). Minera Los Pelambres. P. 35-41.

GEOCONTROL, (2018), Propuesta de modelo estructural MLP 2018. P.4-39.

Mpodozis, C., Brockway, H., Marquardt, C., y Perelló, J. (2009), Geocronología U/Pb y tectónica de la region de Los Pelambres-Cerro Mercedario: Implicancias para la evolución cenozoica de los Andes del centro de Chile y Argentina: Congreso Geológico Chileno, 12°, Santiago, 2009, Actas. P. 2-4.

Perelló, J., Sillitoe, R. H., Mpodozis, C., Brockway, H., y Posso, H. (2012), Geologic Setting and Evolution of the Porphyry Copper-Molybdenum and Copper-Gold Deposits at Los Pelambres, Central Chile. Society of Economic Geologists Special Publication, p.16, 55- 104.

Rivano, S.G., y Sepulveda, P.H. (1986), Hoja Illapel, No. 69, Carta Geologica de Chile, 1:250000 scale map. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin).

Rivano, S., y Sepúlveda, P. (1991), Hoja Illapel, Región de Coquimbo: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 69, p.132.

Sillitoe, R.H. (1973), Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile: Economic Geology, v. 68, p. 1–10.