



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

**INNOVACIÓN EN EL CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FRACTURAS Y SU  
UTILIDAD EN EL MODELO ESTRUCTURAL DE LA MINA LOS PELAMBRES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**CARMEN GLORIA BUSTAMANTE ORELLANA**

**PROFESOR GUÍA:**

**DANIEL ALBERTO CARRIZO SANTIAGO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**SOFÍA REBOLLEDO LEMUS**

**BRIAN TOWNLEY CALLEJAS**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2015**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** Carmen Gloria Bustamante Orellana  
**FECHA:** Septiembre 2015  
**PROFESOR GUÍA:** Daniel Carrizo Santiago

## **INNOVACIÓN EN EL CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FRACTURAS Y SU UTILIDAD EN EL MODELO ESTRUCTURAL DE LA MINA LOS PELAMBRES**

En la presente memoria se explora la manera de relacionar complementariamente los modelos geológico-estructurales y modelos geotécnicos para una mina de rajo abierto, generados a partir de una misma base de datos. La base de datos disponible contiene la ubicación, orientación y características de fallas, vetillas y fracturas.

El estudio se divide en dos etapas de trabajo: la primera es la implementación de un programa que calcula la densidad de fracturas (DF) para una base de datos discreta. La segunda etapa consiste en establecer un modelo de DF y, posteriormente, explorar la existencia de relaciones espaciales con el modelo estructural de dominios y la geología del depósito Los Pelambres. Adicionalmente, se genera un modelo unificado estructural-geotécnico.

Para el cálculo de la DF el programa se divide en tres fases de procesamiento de datos: primero divide la base de datos en grupos según su proximidad espacial, luego, linealiza los datos pertenecientes a cada grupo y, finalmente, calcula la DF en una celda de 15 m de largo. Los resultados muestran que los programas implementados constituyen una herramienta que puede contribuir a disminuir los tiempos de generación de modelos de DF, mejorarlos cualitativamente y mejorar cuantitativamente los modelos estructurales en un menor tiempo optimizando el desarrollo minero.

Los modelos de DF permitieron definir la distribución espacial en el rajo de 3 zonas en relación a la concentración de DF: alta, media y baja. Se observa que la zonación de DF está estrechamente relacionada con el sistema de fallas y lineamientos de arsénico de rumbo NE, correspondientes a fases tardías de deformación frágil, posterior a la mineralización en Los Pelambres. El modelo unificado estructural-geotécnico complementa la zonación de dominios estructurales con la variación de DF. Es construido a partir de un modelo de bloques del parámetro DF con una grilla de 60x60 m., estos bloques son clasificados en 4 categorías: bajo, medio, alto y muy alto. El modelo unificado muestra que DF está controlada mayormente por la litología, siendo los macizos mayormente fracturados aquellos dominados por rocas volcánicas y los menos fracturados por rocas intrusivas.

*A mi madre, Carmen Orellana; gracias por mostrarme que después de la tormenta, aunque sea la más grande y destructiva, siempre, siempre sale el Sol.*

*A mi padre, René Bustamante; me encantaría que estuvieses acá, pero sé que de alguna manera lo estás, tal como lo prometiste. Te extraño y te amo profundamente.*

## Agradecimientos

A mi familia: a mi mami, la mujer más valiente y luchadora del mundo; a mi papi: que me mostró que con amor y voluntad todo se puede lograr. Gracias a ambos por mostrarme que el compromiso va más allá de los papeles, y que más bien se trata de elegirse mutuamente todos los días.

A los Reyes. Gracias Manina y Tío Robín por tratarme como la hija mayor. Uds. Para mí son mis segundos papis. A mis primos Pipe, Tuto y Enanita. Gracias por su apoyo incondicional y por creer siempre en mí.

A Isao por su infinita paciencia, apoyo, amor, incondicionalidad y estar conmigo en las buenas y en las malas.

A la Tachita y a la Prince, por alegrarme los días. Mención honrosa a la Tera y al Atto.

A mis amigos Pau, Vale, Carlos, Ale, Atax, Manu... Etc. Por animarme siempre.

A mis compañeros de generación: Ale, Surjan, Feña, Fer, Maca, Cony, Atax, Timmy y Pelao.

A mis compañeros de laboratorio del AMTC: Clau, Churri, Fabi, Yerko, Vicky, Charly, Panchi, Leonidas, Galle, Nico, Pauli... Gracias por sus consejos y estar dispuestos siempre a ayudarme.

A mis profes Daniel, Sofía y Brian por su dedicación y paciencia... sobre todo paciencia.

A la Rosita por retarme cuando me tiene que retar y por animarme cuando me tiene que animar. Sin duda eres la mejor jefa del mundo.

Al Kilo por sus ricos pollitos arverjados, a Juanito por sus exquisitos postres. A María Rosa y a la Blanquita por sus gestiones y consejos tan acertados.

En fin, a todo el mundo que ha pasado por mi vida, porque de alguna u otra manera, todos influyeron en este momento.

# Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	3
1.1.1	Objetivo general.....	3
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.1.3	Alcances.....	3
<b>2</b>	<b>Metodología de Trabajo.....</b>	<b>4</b>
2.1	Cálculo de la Densidad de Fractura.....	5
2.1.1	Base de datos.....	5
2.1.2	Estrategia de cálculo de Densidad de Fractura (DF).....	7
2.2	Modelamiento de la Densidad de Fractura.....	18
2.3	Modelamiento de la Densidad de Fractura por cada familia estructural.....	20
2.4	Relaciones espaciales entre el Modelo de Densidad de Fractura y zonación de dominios estructurales.....	20
2.5	Relaciones espaciales entre Modelo de Densidad de Fractura y geología de Los Pelambres.....	20
2.6	Modelo de bloques de densidad de fracturas.....	21
<b>3</b>	<b>Antecedentes Geológicos.....</b>	<b>22</b>
3.1	Geología regional del depósito Los Pelambres.....	22
3.1.1	Tectónica y estratigrafía.....	22
3.1.2	Rocas intrusivas.....	23
3.2	Geología distrital Los Pelambres.....	25
3.2.1	Rocas caja.....	25
3.2.2	Intrusivos.....	25
3.2.3	Centros hidrotermales.....	27
3.2.4	Geología estructural Mina Los Pelambres.....	28

3.2.5	Alteración hidrotermal .....	29
3.2.6	Mineralización hipógena .....	30
3.2.7	Modelo geométrico de fallas 3D para el rajo de Los Pelambres.....	31
<b>4</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>33</b>
4.1	Clusterización y Linealización.....	33
4.2	Modelo de Densidad de Fractura (MDF).....	36
4.2.1	Densidad de Fractura (DF).....	36
4.2.2	Densidad de Fractura por familias estructurales .....	36
4.3	Relación entre dominios del Modelo Estructural y el Modelo de Densidad de Fracturas .....	42
4.4	Relación entre Modelo de Densidad de Fractura y geología de Los Pelambres..	47
4.4.1	Geología distrital, lineamientos de arsénico (As) v/s Modelo de Densidad de Fractura .....	47
4.4.2	Alteración v/s Modelo de Densidad de Fractura.....	51
4.4.3	Cobre (Cu) y Molibdeno (Mo) v/s Modelo de Densidad de Fractura.....	51
4.4.4	Vetillas tipo 4, A y B v/s Modelo de Densidad de Fractura .....	51
<b>5</b>	<b>Modelo Unificado .....</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Discusiones .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>63</b>

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Extracto de las características (metadata) de las bases de datos utilizada en este trabajo. En naranja se destacan los datos que caracterizan a las estructuras y en azul se denotan los datos que caracterizan la línea de mapeo ( <i>scanline</i> ).....	5
Tabla 4.1: Extracto de las características (metadata) de las bases de datos clusterizada y linealizada. En naranja se destacan los datos que caracterizan a las estructuras y en azul se denotan los datos que caracterizan la línea de mapeo. En verde se destacan los id o número de grupo resultantes de la clusterización de datos y en rosado se muestran los datos resultantes de la linealización de datos; “Distancia” corresponde a la distancia de cada estructura linealizada al punto de origen del grupo.....	35
Tabla 4.2: Extracto de las características (metadata) de las bases de datos final. En azul se destacan los datos de Rumbo y Manteo de la base de datos original, en verde se destacan los id o número de grupo resultantes de la clusterización de datos, en rosado se muestran los datos resultantes de la linealización de datos y en morado se denotan los datos resultantes del cálculo de DF; N, E y Cota corresponden a las coordenadas del centroide de la celda, “Centroide” es la distancia de las coordenadas del centroide con respecto al origen del grupo, D es el tamaño de la celda, DF es el número de estructuras dentro de la celda, DFn_ap es el número de estructuras por cada familia en la celda y DFn_real es el número de estructuras de cada familia con el cálculo de DF real. ....	37
Tabla 4.3: Rangos de Dip y Dipdir de cada familia estructural, Dip y Dipdir característico (centroide ponderado) y número de estructuras pertenecientes a cada familia. ....	37
Tabla 4.4: Principales estadísticas de resultados de DF y DF por cada familia estructural. ....	41

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Ubicación de la Mina Los Pelambres (modificado de Comte & Carrizo, 2013). Se destacan los mayores rasgos morfo-tectónicos que afectan Sudamérica: la Placa de Nazca subduciendo a la Placa Sudamericana con una velocidad relativa de convergencia de largo plazo de 8cm/año en los últimos 5 Ma (Somoza & Zaffarana; 2008; DeMets <i>et al</i> , 1994; Pardo-Casas & Molnar, 1987); el Ridge de Juan Fernández (JFR) subduciendo la zona central de Chile; la zona del <i>Flat Slab</i> (subducción plana) y las curvas de nivel asociadas de la Placa de Nazca. Además se destaca la ubicación de tres provincias metalogénicas: Provincia metalogénica de pórfidos cupríferos del Eoceno – Oligoceno, Provincia metalogénica de Epitermales de oro (Au) del Mioceno y Provincia metalogénica de pórfidos cupríferos del Mioceno Tardío. En esta última se destacan los tres pórfidos de mayor tamaño de la: en rojo se muestra la ubicación de Los Pelambres, y en negro, la ubicación de Andina/Los Bronces y Teniente. ....	2
Figura 2.1: Diagrama que describe la estrategia metodológica utilizada en este trabajo. ....	4

Figura 2.2: Distribución de datos estructurales del mapeo de bancos en la Mina Los Pelambres utilizados en este trabajo. En amarillo se destaca la ubicación espacial de los datos estructurales y en gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres..... 6

Figura 2.3: Secuencia de procesamiento de los programas implementados. El primer programa se encarga de clusterizar o agrupar los datos de la Base de Datos estructural de bancos, el segundo programa linealiza los datos ya clusterizados y el tercer programa calcula el número de fracturas por celda para los datos linealizados y clusterizados, obteniendo de esta forma una base de datos que con la densidad de fracturas y densidad de fracturas real..... 7

Figura 2.4: Esquema que explica el umbral de búsqueda de puntos cercanos para clusterización de datos. D es el radio de la esfera truncada correspondiente a la distancia euclidiana entre los datos., y H es la semialtura de la esfera truncada que corresponde diferencia de cota entre los datos y equivale a la mitad de la altura de bancos en Los Pelambres..... 8

Figura 2.5: Esquema en planta con funcionamiento de clusterización de los datos, el eje x corresponde a las coordenadas E-W y el eje y corresponde a las coordenadas N-S. a) Datos filtrados por la componente Rumbo de la Traversa, b) se escoge un unto al azar, c) se le aplica el umbral de búsqueda de puntos cercanos al punto escogido en b), d) se marcan los puntos dentro del umbral de búsqueda de puntos cercanos, e) se aplica el umbral de búsqueda para los puntos marcados en d), f) se itera hasta que no existan nuevos puntos marcados, g) se le asigna un “id” o número de grupo, h) se repite el proceso desde b) hasta que todos los puntos dentro del mismo Rumbo estén asignados a un “id” o número de grupo. .... 9

Figura 2.6: Esquema en planta con funcionamiento de clusterización de los datos para distintos Rumbos, el eje x corresponde a las coordenadas E-W y el eje y corresponde a las coordenadas N-S. a) Todos los datos del Rumbo “A” clusterizados, b) el programa itera en un Rumbo que no haya sido clusterizado previamente hasta que todos los datos queden asignados a un grupo. .... 10

Figura 2.7: Esquema en planta con funcionamiento de linealización de datos: a) datos de un determinado “id” o número de grupo, b) nuevos ejes definidos a partir del análisis de componentes principales, c) combinación lineal de un punto  $i$  a partir de los nuevos ejes, d) proyecciones ortogonales de la posición de los puntos del grupo al eje  $x'$ , e) puntos linealizados en donde el eje  $x'$  corresponde a la nueva línea de mapeo definiendo nuevos Rumbo y Manteo de la línea de mapeo, el mínimo de los valores de la proyección corresponde al origen de la recta. Para mayor simplificación se realiza un esquema en 2D, pero el programa incorpora las 3 dimensiones. .... 12

Figura 2.8: Gráfico que explica el análisis de componentes principales de un grupo de datos representados con puntos azules. V1 corresponde a la primera componente principal , es decir, al eje con mayor varianza, y V2 a la segunda componente principal, es decir, al eje con la segunda mayor varianza. .... 13

Figura 2.9: Esquema con funcionamiento del cálculo de DF. a) línea de mapeo esquemática con estructuras con distintas actitudes; b) la línea de mapeo se divide en celdas de tamaño  $D=15$  m., DF es el número de todas las estructuras que estén contenidas dentro de la celda de tamaño D y la cruz roja corresponde al centroide de la celda de tamaño D..... 14

- Figura 2.10: Esquema con funcionamiento del cálculo de DF por familia, para efectos prácticos en la figura se muestran 3 familias de estructuras a modo de ejemplo. DF es el número de todas las estructuras que existan dentro de la celda, mientras que  $DF_1$ ,  $DF_2$  y  $DF_3$  cuenta el número de estructuras que existan de la familia 1, familia 2 y familia 3 respectivamente. ... 15
- Figura 2.11: Esquema con detalle del cálculo del espaciamiento promedio ( $S$ ) para un mismo *set* estructural. En rojo se destaca la línea de mapeo de largo  $l$  normal al *set*.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_{n-1}$  y  $S_n$  corresponden a los espaciamientos entre estructuras adyacentes, el promedio entre estos espaciamientos da como resultado el espaciamiento promedio. .... 16
- Figura 2.12: Esquema con funcionamiento del cálculo de espaciamiento aparente a espaciamiento real de un mismo *set* de estructuras. En rojo se destaca la línea de mapeo, la línea punteada corresponde a la dirección normal al *set* de estructuras, el ángulo  $\delta$  es el la diferencia entre la dirección de la línea de mapeo y la dirección normal al *set* de estructuras,  $S_r$  corresponde al espaciamiento real y  $S_a$  al espaciamiento aparente de las estructuras. El extremo superior derecho de la figura corresponde a una vista en detalle del cálculo de espaciamiento aparente a espaciamiento real de un mismo *set* de estructuras. .... 17
- Figura 2.13: Funcionamiento de densidad de *kernel*. a) La superficie (superficie de *kernel*) bajo el campo de población (valor de punto) disminuye hasta anularse en el radio de búsqueda. El volumen bajo esta superficie tiene el mismo valor que el campo de población. b) El valor de la densidad de cada celda ráster de salida se calcula sumando los valores de las superficies de *kernel* en donde estas se superponen con el centro de la celda ráster de salida..... 19
- Figura 2.14: Esquema con funcionamiento del modelo de bloques para los datos de densidad de fractura (DF), el eje x corresponde a las coordenadas E-W y el eje y corresponde a las coordenadas N-S. a) Datos de densidad de fracturas (DF), los distintos colores de puntos corresponden a distintas DF, en este caso, en blanco se destaca  $DF = 1$ , en rosado  $DF = 2$  y en morado  $DF = 3$ . b) La extensión de los datos de DF se divide en una grilla de 60 x 60 m. c) Con los datos de DF que estén contenidos dentro del bloque de 60 x 60 m., se calcula la densidad de fracturas promedio para cada bloque..... 21
- Figura 3.1: Mapa geológico de la región de Los Pelambres. Tomado de Perelló *et al.* (2012) .... 24
- Figura 3.2: Mapa geológico distrital área Los Pelambres. Tomado y modificado de Perelló *et al.* (2012). .... 26
- Figura 3.3: Distribución de alteración hidrotermal en Los Pelambres. Tomado Perelló *et al.* (2012). .... 29
- Figura 3.4: a) distribución e intensidad de vetillas tipo A y B en Los Pelambres, b) distribución e intensidad de vetillas tipo 4 en Los Pelambres. Tomado de Perelló *et al.* (2012)..... 31
- Figura 3.5: Fallas principales y mayores del rajo Los Pelambres (Carrizo *et al.*, 2014). Los puntos de colores representan la ubicación espacial de los datos estructurales modelados para obtener el modelo geométrico de fallas 3D en Los Pelambres. .... 32
- Figura 4.1: Distribución de vectores directores (pares de “NRumbo” y “NManteo”) resultantes de la linealización de datos en Los Pelambres. El 88% de los vectores entrega valores válidos de “NRumbo” y “NManteo”, mientras que un 12% de los vectores entrega valores no

válidos de “NRumbo” y “NManteo”, 90° y 0° respectivamente correspondientes a valores por defecto. ....	34
Figura 4.2: Histograma con las diferencias entre los Rumbo y Manteo entregados en la base de datos y los “NRumbo” y “NManteo” obtenidos de la linealización. La mayoría de los Delta Manteo se concentran por debajo de los 10°, mientras que la mayor parte de lo Delta Rumbo se mantienen por debajo de los 20°. En particular, un 74% de los datos de Delta Rumbo y Delta Manteo se mantienen por debajo de los 10°. ....	35
Figura 4.3: Distribución espacial de celdas con valores de DF en Los Pelambres. Cada punto representa una celda de 15 m de largo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. ....	38
Figura 4.4: Distribución espacial de densidad de <i>kernel</i> con celda de salida de 15x15 m y radio de búsqueda de 100 m., aplicada a la DF. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. ....	39
Figura 4.5: Distribución de zonación DF. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. ....	40
Figura 4.6: Distribución de la base de datos con respecto a las familias estructurales. ....	41
Figura 4.7: Distribución espacial de celdas con valores de la DF por cada familia estructural y sus respectivos diagramas de contorno de polos en Los Pelambres. Cada punto representa una celda de 15 m de largo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. ....	43
Figura 4.8: Distribución espacial de densidad de <i>kernel</i> con celda de salida de 15x15 m y radio de búsqueda de 100 m., aplicada a la DF de cada familia estructural. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. ....	44
Figura 4.9: Distribución espacial de zonación de la DF por cada familia estructural y sus respectivos diagramas de contorno de polos. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente, la zona de color morado, a DF bajo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. ....	45
Figura 4.10: Zonación de Dominios estructurales de Los Pelambres (Carrizo <i>et al.</i> , 2015) con sus respectivos diagramas de contorno de polos de estructuras: Dominio Noroeste, Dominio Centro Oeste, Dominio Central, Dominio Sur, Dominio Centro Este, Dominio Noreste. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. ....	48
Figura 4.11: Zonación DF y dominios estructurales. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. Las líneas negras denotan los límites de Dominios estructurales. En gris se muestra el modelo	

numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. .... 49

Figura 4.12: Zonación DF por real por familia v/s dominios estructurales. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. Las líneas negras denotan los límites de Dominios estructurales y en gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres. .... 50

Figura 4.13: Zonación de DF v/s geología distrital de Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo ..... 52

Figura 4.14: Concentraciones de arsénico v/s zonación de DF en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. En azul se representan las zonas con concentraciones de As entre 550 y 131 ppm, en celeste se representan las zonas de concentraciones de As entre 130 y 51 ppm, la falla inversa corresponde a la Falla Los Pelambres y las líneas segmentadas corresponden a fallas inferidas (Perelló *et al.*, 2012) en base a los lineamientos de As. .... 53

Figura 4.15: Zonación de DF v/s zonación de alteración hidrotermal de Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. En cuanto a la alteración hidrotermal, en amarillo se distingue la alteración sericítica, en rosado, la alteración potásica y en verde, la alteración propilítica. .... 54

Figura 4.16: a) Zonación de DF v/s distribución de Cobre en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado, a DF bajo. En rojo se representan las zonas con concentraciones de Cu mayores al 1%, en azul se representan las zonas con concentraciones de Cu entre 0,6% y 1%, en celeste se representan las zonas con concentraciones de Cu entre 0,4% y 0,6% y en azul se representan las zonas con concentraciones de Cu entre 0,1% y 0,4%. b) Zonación de DF v/s distribución de Mo en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado, a DF bajo. En rojo se representan las zonas con concentraciones de Mo mayores a 200 ppm, en azul se representan las zonas con concentraciones de Mo entre 100 y 200 ppm y en celeste las zonas con concentraciones de Cu entre 50 y 100 ppm. .... 55

Figura 4.17: a) Zonación de DF v/s distribución de vetillas tipo A y B en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado a DF bajo. En morado oscuro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B muy altas, en rosado oscuro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B altas, en rosado se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B moderadas y en rosado claro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B bajas. b) Zonación de DF v/s distribución de vetillas tipo 4 en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado a DF bajo. En morado oscuro se representan las zonas intensidad de vetillas tipo 4 altas, en rosado oscuro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo 4 moderada y en rosado se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo 4 bajas. .... 56

Figura 5.1: Modelo unificado de dominios estructurales y modelo de bloques de densidad de fractura (DF). El modelo de bloques se realizó con los datos de DF promedio; los bloques azules corresponden a DF promedio baja, los bloques verdes a DF promedio media, los bloques amarillos a DF promedio alta y los bloques rojos a DF promedio muy alta. En los lugares donde no existen bloques, se carece de datos de DF para ser modelados. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres..... 58

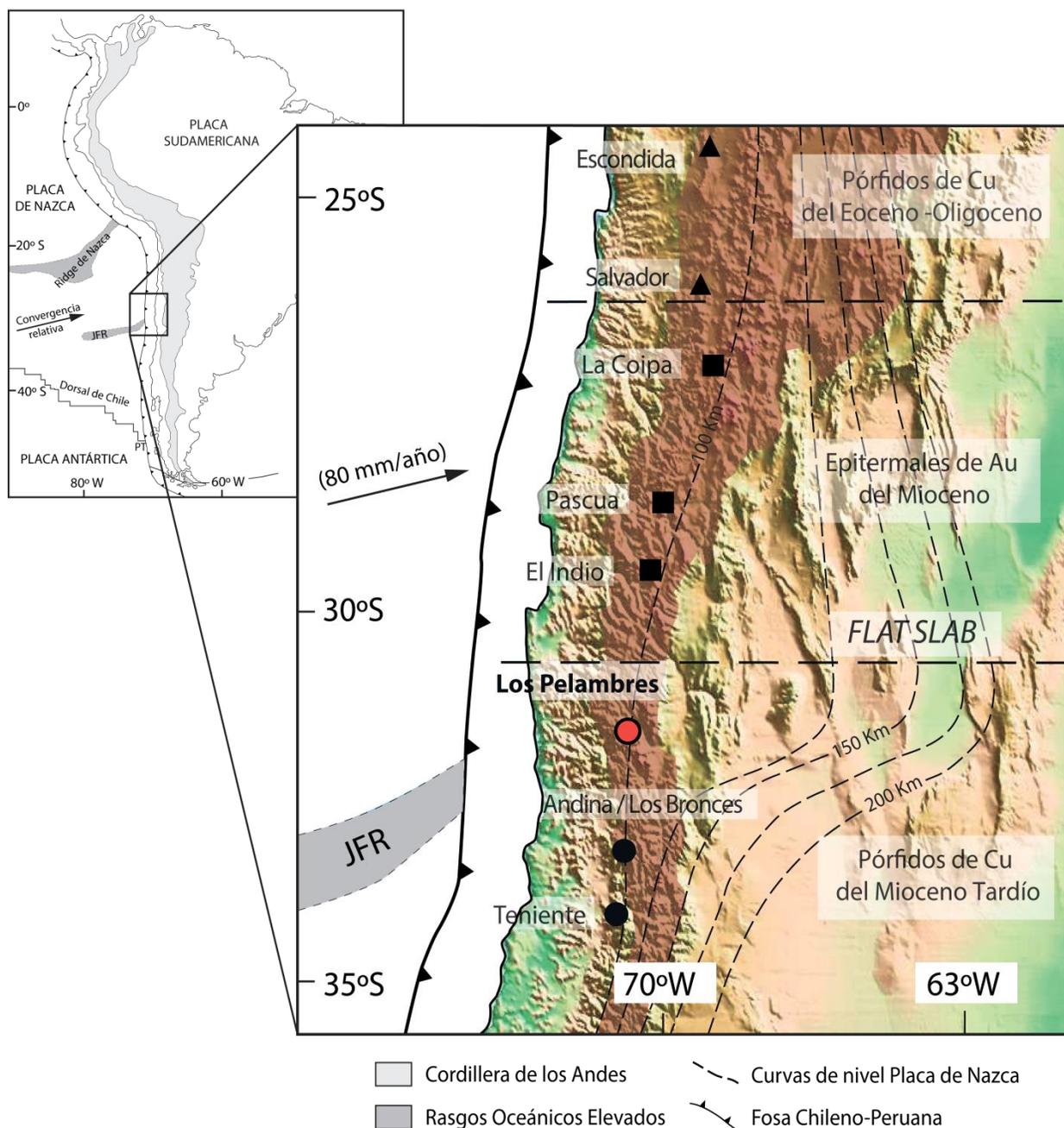
# 1 Introducción

Considerando el avance en el desarrollo operacional de la minería de rajo abierto, se torna crítica la precisión del modelo estructural por su fuerte influencia tanto en el desarrollo de diseños geotécnicos seguros, como en la actualización detallada del modelo geológico. En detalle, el modelo estructural es un factor fundamental para el manejo predictivo de incidentes geotécnicos durante la operación minera. Históricamente esta problemática ha sido abordada sobre la base de modelos geotécnicos y modelos estructurales. Sin embargo la relación entre modelos ha sido pobremente explorada, lo que no ha permitido mejorar tanto el nivel de incertidumbre de los modelos estructurales, como la precisión de los modelos predictivos geotécnicos. En consecuencia, el establecer dicha correlación representa un desafío de primer orden, en la actualidad, para mejorar el desarrollo minero en rajos abiertos. La presente memoria atiende a esta problemática, explorando las potenciales relaciones entre modelos estructurales y geotécnicos.

En particular, se utilizó el parámetro densidad de fractura (DF) para su modelamiento en el espacio debido a que ambos modelos se construyen a partir de la misma base de datos estructurales. Cabe señalar que la zonación de dominios estructurales, en general corresponde a un análisis geométrico-espacial de las discontinuidades; en tanto que la DF explora la distribución de las discontinuidades en el macizo. Esto establece una posible relación de complementariedad entre ambos modelos, explorada en esta memoria.

Como caso en estudio se analizó la información estructural de Mina Los Pelambres (Minera Los Pelambres S.A.) (Figura 1.1) en el contexto de un proyecto de investigación entre Mina Los Pelambres y el Advanced Mining Technology Center (AMTC), en colaboración docente con el Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Esta memoria es a su vez apoyada por la Superintendencia de Geotecnia de Minera Los Pelambres S.A.

El depósito Los Pelambres se ubica en la cuarta región de Coquimbo en la provincia del Choapa contiguo al límite con Argentina. Es un depósito tipo pórfido de cobre – molibdeno perteneciente a la franja metalogénica del Mioceno – Plioceno temprano, y el tercero en magnitud después de Rio Blanco-Los Bronces y El Teniente dentro de su franja metalogénica (Figura 1.1).



**Figura 1.1:** Ubicación de la Mina Los Pelambres (modificado de Comte & Carrizo, 2013). Se destacan los mayores rasgos morfo-tectónicos que afectan Sudamérica: la Placa de Nazca subduciendo a la Placa Sudamericana con una velocidad relativa de convergencia de largo plazo de 8cm/año en los últimos 5 Ma (Somoza & Zaffarana; 2008; DeMets *et al*, 1994; Pardo-Casas & Molnar, 1987); el Ridge de Juan Fernández (JFR) subduciendo la zona central de Chile; la zona del *Flat Slab* (subducción plana) y las curvas de nivel asociadas de la Placa de Nazca. Además se destaca la ubicación de tres provincias metalogénicas: Provincia metalogénica de pórfidos cupríferos del Eoceno – Oligoceno, Provincia metalogénica de Epitermales de oro (Au) del Mioceno y Provincia metalogénica de pórfidos cupríferos del Mioceno Tardío. En esta última se destacan los tres pórfidos de mayor tamaño de la: en rojo se muestra la ubicación de Los Pelambres, y en negro, la ubicación de Andina/Los Bronces y Teniente.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

El objetivo general de esta memoria es desarrollar una nueva herramienta que calcule el parámetro densidad de fracturas a partir de una base de datos geológico-estructurales estándar y posteriormente comprobar su utilidad al comparar los resultados con el modelo estructural de la Mina Los Pelambres.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar una herramienta que calcule la densidad de fracturas (DF) para una base de datos estructural.
- Establecer un modelo de densidad de fracturas (MDF) en la superficie del rajo (*Pitshell*).
- Establecer relaciones espaciales entre el Modelo Estructural de Dominios (ME), en relación al Modelo de Densidad de Fracturas (MDF) obtenido.
- Establecer relaciones espaciales entre la geología de Los Pelambres y el Modelo de Densidad de Fracturas (MDF) obtenido.
- Establecer un modelo unificado de densidad de fractura y dominios estructurales.

### **1.1.3 Alcances**

El alcance esperado de esta memoria se focaliza en contribuir a la optimización de los modelos estructurales mineros; i) reduciendo la incertidumbre de los modelos predictivos de la calidad de talud en el corto y mediano plazo; ii) estableciendo mejores herramientas para las recomendaciones de perforación y tronadura en mallas de disparo; iii) mejoramiento del diseño geotécnico de estabilidad de taludes (banco-berma) y por último, iv) generar modelos estructurales comprensivos que permitan establecer un mejor diálogo técnico entre las unidades de geología y geotecnia.

## 2 Metodología de Trabajo

Para llevar a cabo los objetivos planteados en esta memoria, a continuación se detalla la estrategia metodológica utilizada (Figura 2.1).

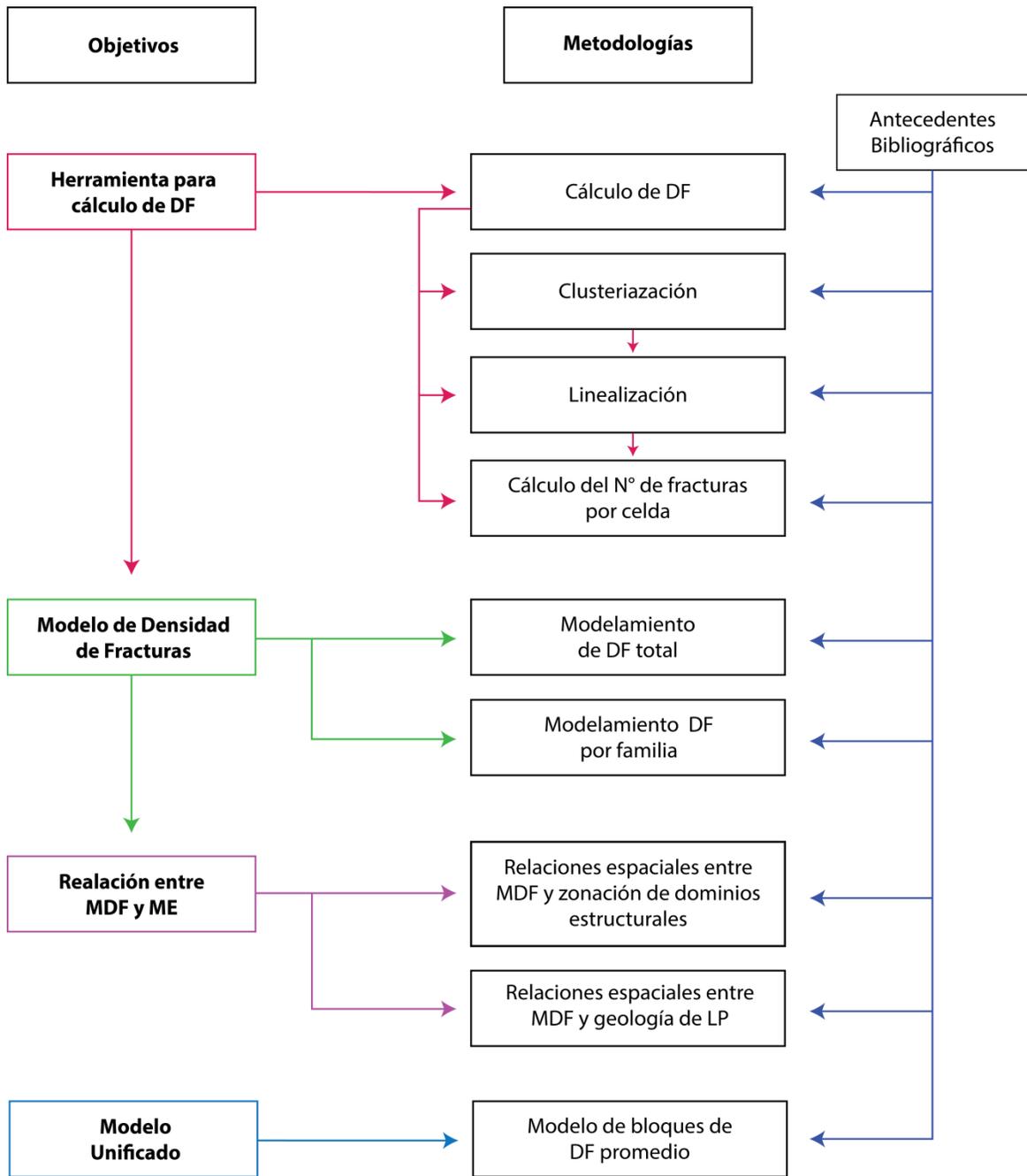


Figura 2.1: Diagrama que describe la estrategia metodológica utilizada en este trabajo.

## 2.1 Cálculo de la Densidad de Fractura

A continuación se describe la base de datos utilizada en este trabajo y, posteriormente, la estrategia que se utilizó para calcular la DF. Esta última consta de 3 pasos: i) clusterización, ii) linealización y iii) cálculo del número de fracturas por celda.

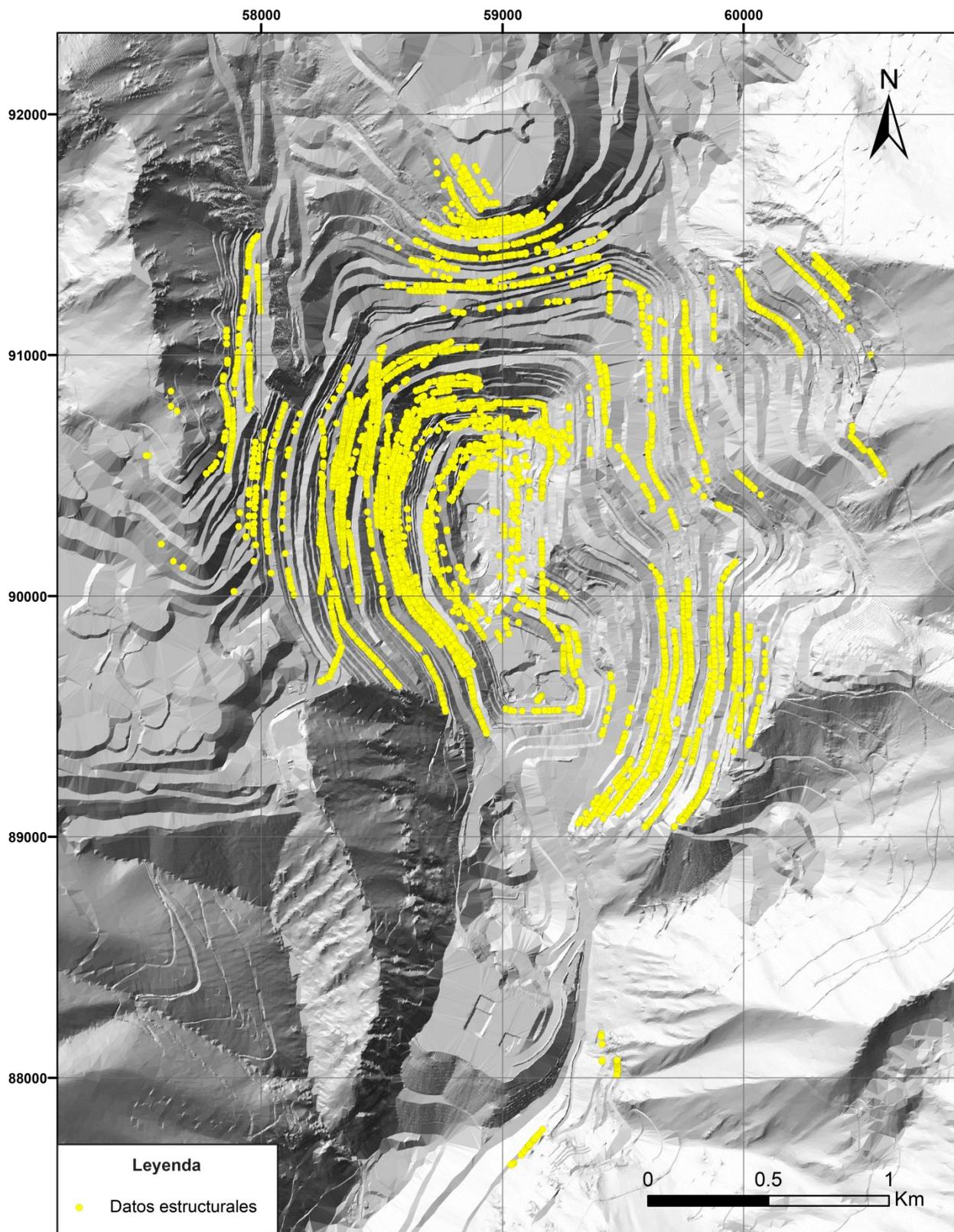
### 2.1.1 Base de datos

La Base de Datos utilizada en este estudio fue proporcionada por Minera Los Pelambres S.A, para posteriormente ser compilada, homologada y unificada por el grupo de geología estructural del AMTC, liderado por el Dr. Daniel Carrizo, enmarcado dentro el proyecto “Modelo Estructural 3D, Mina Los Pelambres”. Producto de lo anterior, se obtiene una base de datos unificada llamada ME2014, compuesta por datos estructurales de sondajes y de banco (Carrizo *et al.*; 2013; 2014; 2015).

Debido a que el objetivo a realizar es un modelo de densidad de fracturas en un *Pitshell*, para el presente trabajo se utilizaron, únicamente, datos cuya fuente de origen es la base de datos estructurales de banco (Mapeo de Banco) (Figura 2.2) que está compuesta de 5802 datos. Además, se consideraron solamente algunas características de esta base de datos (metadata): coordenadas locales (N, E, Cota), Dip, Dipdir y Dominio de estructuras; Rumbo, Manteo y Traversa de bancos correspondientes a la línea de mapeo (*scanline*) (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1:** Extracto de las características (metadata) de las bases de datos utilizada en este trabajo. En naranja se destacan los datos que caracterizan a las estructuras y en azul se denotan los datos que caracterizan la línea de mapeo (*scanline*).

N	E	Cota	Dip	Dipdir	Rumbo	Manteo	Traversa	Dominio	Familia
90849.00	57626.00	2818.00	70	180	158	0	1	6	
90128.87	58724.49	2929.13	79	85	171	0	2	2	
90141.65	58722.33	2929.15	46	17	171	0	2	2	
90143.13	58722.09	2929.16	47	139	171	0	2	2	2
90150.24	58720.95	2929.18	43	60	171	0	2	2	
90167.32	58718.21	2929.24	40	16	171	0	2	2	
90115.27	58728.21	2929.36	79	75	171	0	2	2	
90197.47	58712.51	2929.56	46	220	171	0	2	2	1
90201.00	58711.78	2929.61	58	25	171	0	2	2	
90202.17	58711.53	2929.63	54	25	171	0	2	2	
90094.83	58733.81	2929.72	65	129	171	0	2	2	
90212.06	58709.48	2929.77	52	110	171	0	2	2	2

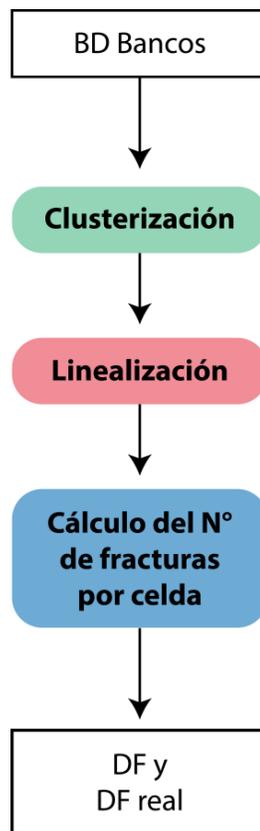


**Figura 2.2:** Distribución de datos estructurales del mapeo de bancos en la Mina Los Pelambres utilizados en este trabajo. En amarillo se destaca la ubicación espacial de los datos estructurales y en gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.

## 2.1.2 Estrategia de cálculo de Densidad de Fractura (DF)

La estrategia consiste en calcular la DF para una celda de una longitud determinada. Para realizar este cálculo fueron detectados tres problemas fundamentales a resolver: i) dividir los datos en subconjuntos según su proximidad espacial, ii) la posición de los datos de cada subconjunto generado no define necesariamente una línea recta (línea de mapeo), por lo tanto se debe calcular una línea que contenga los datos de manera colineal, y, finalmente, iii) calcular el número de fracturas de cada subconjunto de datos.

Para ello fue desarrollada una estrategia metodológica que considera tres etapas: clusterización, linealización y cálculo del número de fractura por celda (Figura 2.3). Esto fue calculado sobre la base de códigos generados en el software MatLab. A continuación son descritos los procesos realizados.



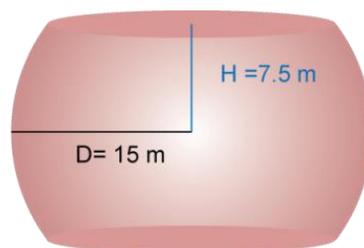
**Figura 2.3:** Secuencia de procesamiento de los programas implementados. El primer programa se encarga de clusterizar o agrupar los datos de la Base de Datos estructural de bancos, el segundo programa linealiza los datos ya clusterizados y el tercer programa calcula el número de fracturas por celda para los datos linealizados y clusterizados, obteniendo de esta forma una base de datos que con la densidad de fracturas y densidad de fracturas real.

### 2.1.2.1 Clusterización

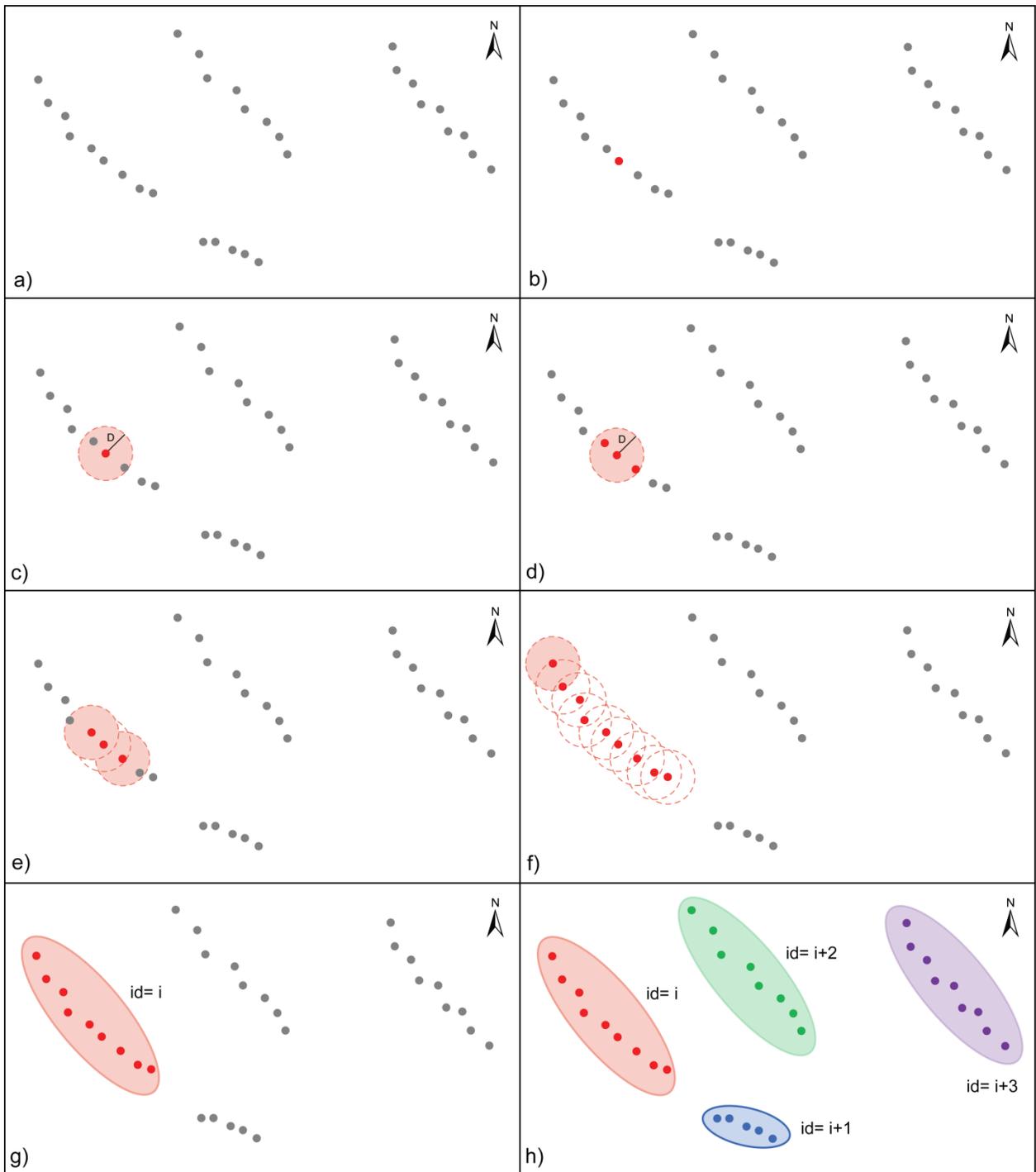
La Clusterización consiste en la agrupación de elementos basándose en alguna de sus características. En particular, para esta memoria, se agruparon los datos basados en su distribución espacial. La metodología de trabajo consiste en agrupar los datos mediante un umbral  $D$ , correspondiente a la distancia euclidiana entre todos los datos, y un umbral  $H$ , correspondiente a la diferencia de cota entre todos los datos. Esto entrega como resultado una esfera truncada de búsqueda de puntos cercanos (Figura 2.4).

Debido a que la altura de bancos en Los Pelambres es de 15 m., se escogió  $H=7,5$  m. equivalentes a la mitad de la altura de banco, con el fin que no hubiese traslape de puntos pertenecientes a distintos bancos; y  $D=15$  m. (Figura 2.4).

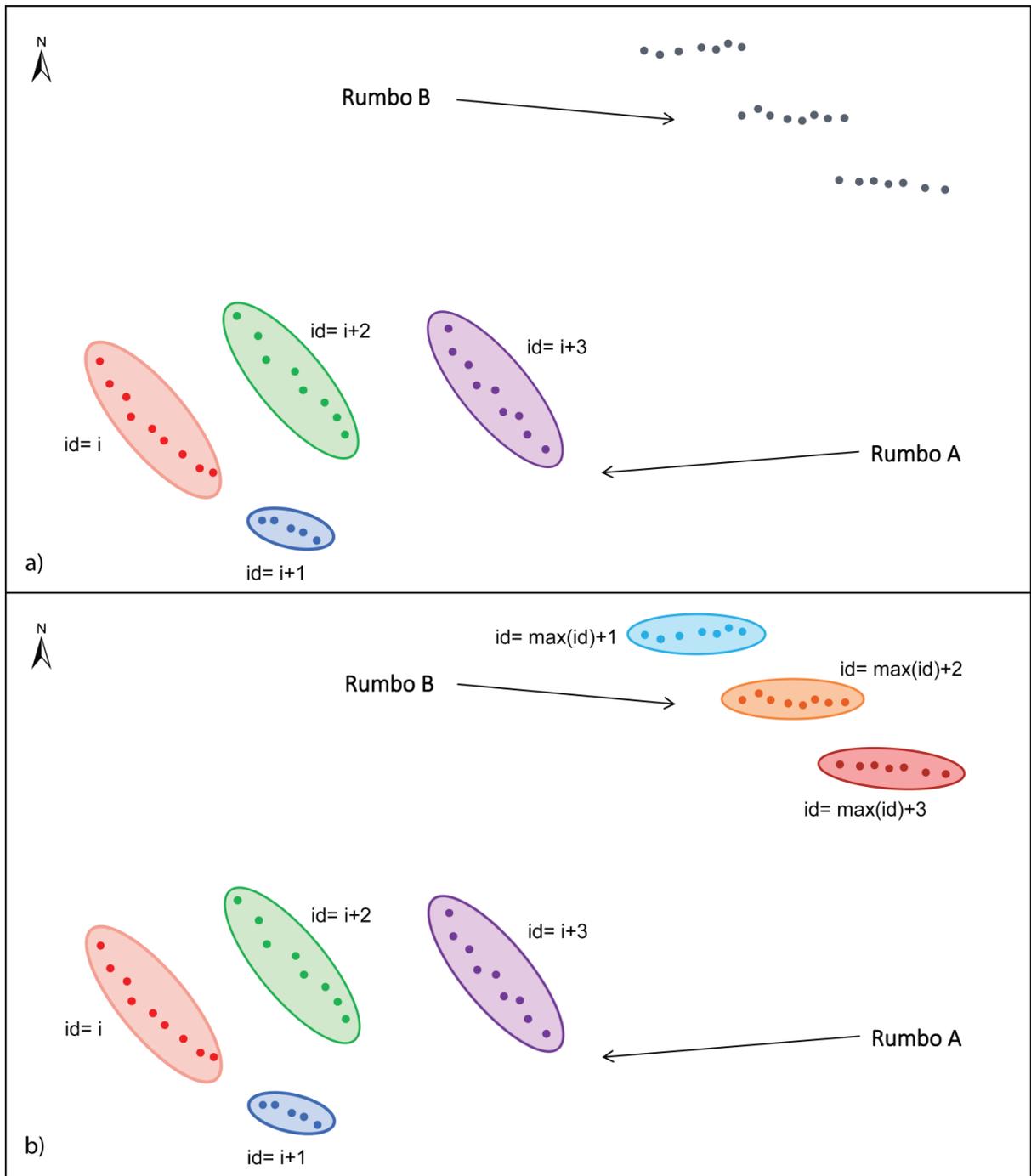
Para la búsqueda de puntos cercanos, el programa comienza por seleccionar o filtrar los datos por la componente Rumbo de la Traversa (Figura 2.5, a), luego escoge un punto al azar de los datos con igual Rumbo (Figura 2.5, b) se marca y se le aplica el umbral de búsqueda de puntos cercanos (Figura 2.4; Figura 2.5, c). Todos los puntos que estén dentro del umbral de búsqueda son marcados (Figura 2.5, d) para, posteriormente, aplicarles el umbral de búsqueda a estos nuevos puntos (Figura 2.5, e) e iterar hasta que ya no existan nuevos puntos dentro del umbral (Figura 2.5, f). Cuando el programa ya no puede seguir iterando, se les asigna un “id” o número de grupo a todos los puntos marcados por el umbral de búsqueda de puntos cercanos (Figura 2.5, g). Posteriormente, escoge un punto al azar que no esté marcado dentro del mismo Rumbo y comienza el proceso nuevamente hasta que todos los puntos dentro de ese Rumbo estén asignados a un “id” o número de grupo (Figura 2.5, h; Figura 2.6, a). Luego, el programa repite el proceso para los Rumbo restantes, hasta que todos los puntos de la base de datos estén asignados a un número de grupo (Figura 2.6, b).



**Figura 2.4:** Esquema que explica el umbral de búsqueda de puntos cercanos para clusterización de datos.  $D$  es el radio de la esfera truncada correspondiente a la distancia euclidiana entre los datos., y  $H$  es la semialtura de la esfera truncada que corresponde diferencia de cota entre los datos y equivale a la mitad de la altura de bancos en Los Pelambres.



**Figura 2.5:** Esquema en planta con funcionamiento de clusterización de los datos, el eje x corresponde a las coordenadas E-W y el eje y corresponde a las coordenadas N-S. a) Datos filtrados por la componente Rumbo de la Traversa, b) se escoge un punto al azar, c) se le aplica el umbral de búsqueda de puntos cercanos al punto escogido en b), d) se marcan los puntos dentro del umbral de búsqueda de puntos cercanos, e) se aplica el umbral de búsqueda para los puntos marcados en d), f) se itera hasta que no existan nuevos puntos marcados, g) se le asigna un “id” o número de grupo, h) se repite el proceso desde b) hasta que todos los puntos dentro del mismo Rumbo estén asignados a un “id” o número de grupo.



**Figura 2.6:** Esquema en planta con funcionamiento de clusterización de los datos para distintos Rumbos, el eje x corresponde a las coordenadas E-W y el eje y corresponde a las coordenadas N-S. a) Todos los datos del Rumbo “A” clusterizados, b) el programa itera en un Rumbo que no haya sido clusterizado previamente hasta que todos los datos queden asignados a un grupo.

### 2.1.2.2 Linealización

La linealización consiste en proyectar los datos previamente clusterizados a un nuevo sistema de referencia. Se seleccionan los datos por “id” o número de grupo (Figura 2.7, a). Se definen nuevos ejes mediante análisis de componentes principales (explicado más adelante) cuyo origen es el punto promedio de los datos (Figura 2.7, b), en donde el nuevo eje  $x'$  corresponde a la línea de tendencia de datos donde ocurre la mayor varianza de estos, y el nuevo eje  $y'$  es ortogonal al eje  $x'$  y en donde ocurre la segunda mayor varianza de puntos (Figura 2.7, b). Con estos nuevos ejes,  $x'$  e  $y'$ , se obtienen nuevas combinaciones lineales de la posición de los puntos del grupo. En particular para un punto  $i$  cualquiera dentro del grupo, la nueva combinación lineal de su posición es:

$$i = \text{punto promedio} + \lambda_{x'i} * v_{x'i} + \lambda_{y'i} * v_{y'i} + \lambda_{z'i} * v_{z'i} \text{ (Figura 2.7, c),}$$

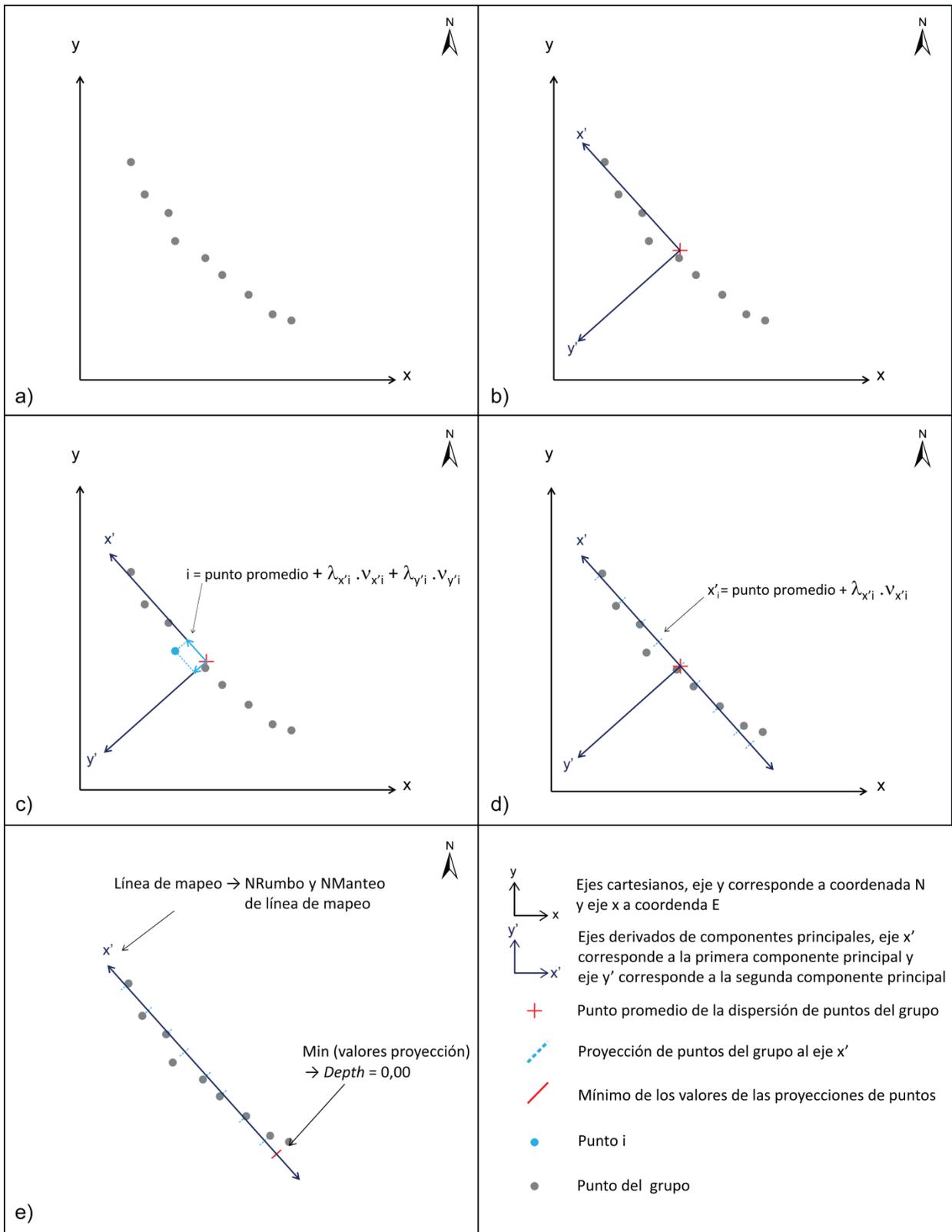
donde  $\lambda$  y  $v$  son los valores y vectores propios respectivamente, obtenidos del análisis de componentes principales. Luego, la posición de los datos se proyecta ortogonalmente en el eje  $x'$  mediante la ecuación

$$x'i = \text{punto promedio} + \lambda_{x'i} * v_{x'i} \text{ (Figura 2.7, d).}$$

Al valor mínimo de los  $x'_i$  se le asigna el valor 0.00, quedando como nuevo origen, y a los demás valores  $x'_i$  se les asigna la diferencia entre su proyección y el valor mínimo

$$x''i = x'i - \min(x'i) \text{ (Figura 2.7, e).}$$

El eje de referencia  $x'$  es proyectado sobre el sistema de coordenada original (E, N, Cota) y, de esta manera, se pueden extraer el nuevo Rumbo y el nuevo Manteo que caracterizan al eje  $x'$  denominados “NRumbo” y “NManteo”. De esta manera, el eje  $x'$  se transforma en una nueva línea de mapeo más precisa, ajustándose mejor los puntos del grupo (Figura 2.7, e).

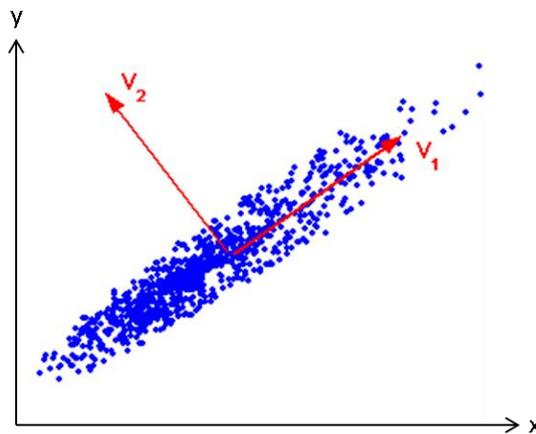


**Figura 2.7:** Esquema en planta con funcionamiento de linealización de datos: a) datos de un determinado “id” o número de grupo, b) nuevos ejes definidos a partir del análisis de componentes principales, c) combinación lineal de un punto  $i$  a partir de los nuevos ejes, d) proyecciones ortogonales de la posición de los puntos del grupo al eje  $x'$ , e) puntos linealizados en donde el eje  $x'$  corresponde a la nueva línea de mapeo definiendo nuevos Rumbo y Manteo de la línea de mapeo, el mínimo de los valores de la proyección corresponde al origen de la recta. Para mayor simplificación se realiza un esquema en 2D, pero el programa incorpora las 3 dimensiones.

## Análisis de componentes principales

Con el fin de linealizar los datos previamente clusterizados, se aplica el análisis de componentes principales a los grupos generados por el programa. Este análisis consiste en un método estadístico utilizado para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Técnicamente, busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados bajo el criterio de mínimos cuadrados.

El análisis de componentes principales construye una transformación lineal, cuyos vectores directores son ortogonales entre sí, que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente (Figura 2.8). Para construir esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. Debido a la simetría de esta matriz, existe una base completa de vectores propios de la misma. La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para reducir la dimensionalidad de datos. (Peña, 2002).



**Figura 2.8:** Gráfico que explica el análisis de componentes principales de un grupo de datos representados con puntos azules. V1 corresponde a la primera componente principal, es decir, al eje con mayor varianza, y V2 a la segunda componente principal, es decir, al eje con la segunda mayor varianza.

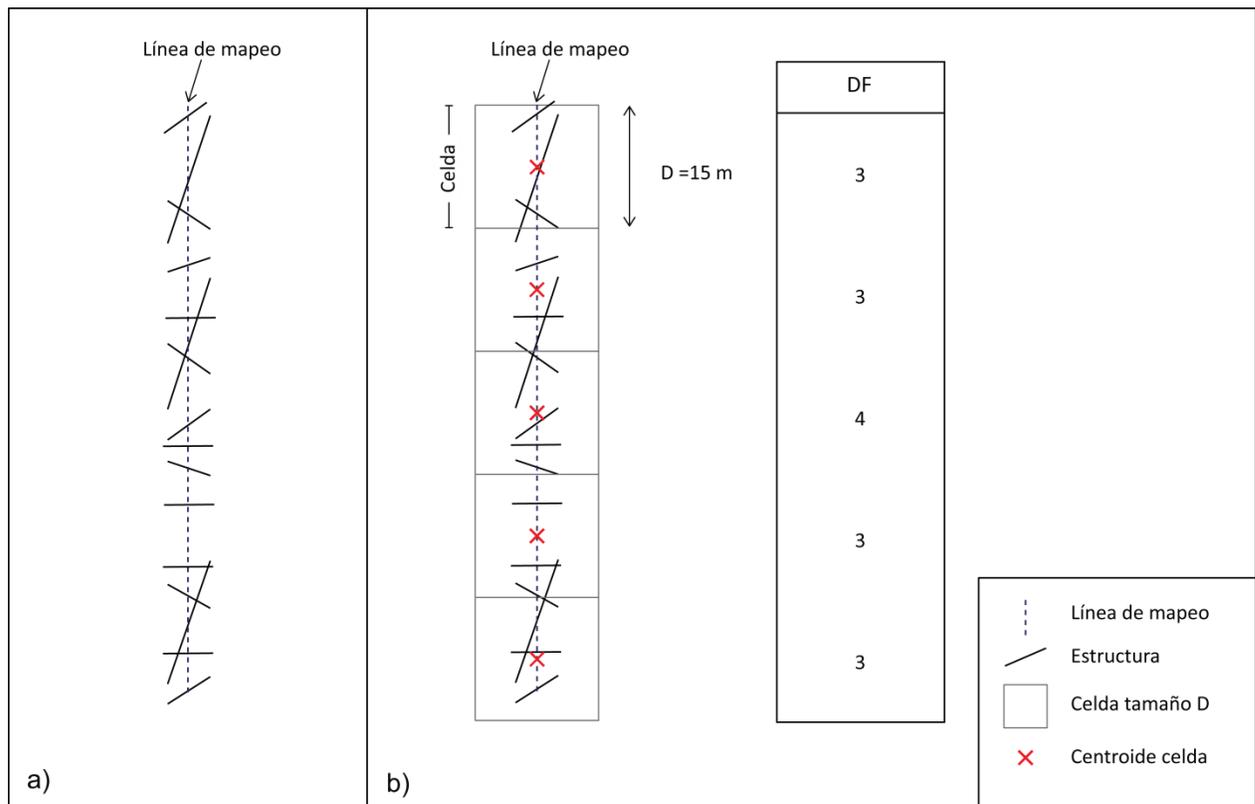
### 2.1.2.3 Cálculo de Densidad de Fracturas

Consiste en contar el número de estructuras que existen en una celda de tamaño D. Se escoge  $D = 15$  m., ya que la altura de banco en Los Pelambres es de 15 m.

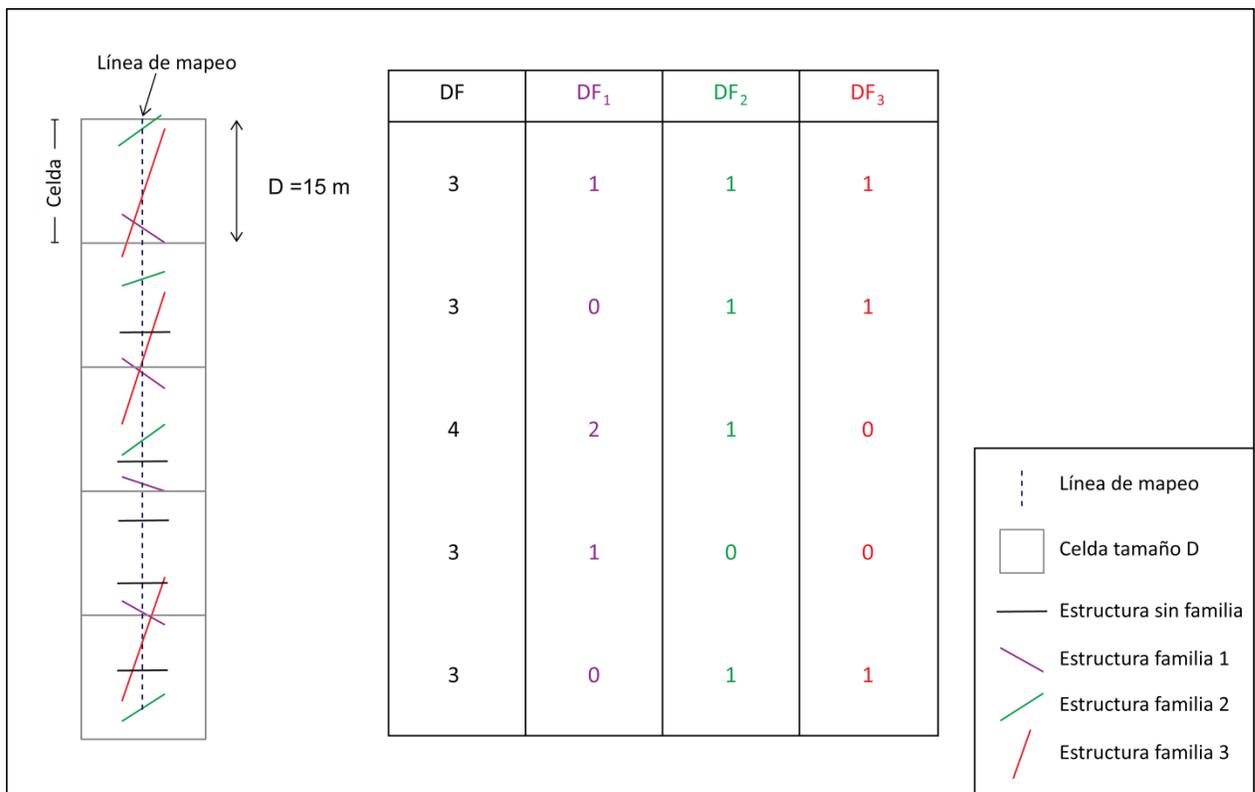
Con los datos ya clusterizados y linealizados (Figura 2.9, a) se puede calcular la densidad de fracturas. Para esto se divide la línea de mapeo (*scanline*) en celdas de tamaño D desde el origen de la línea hasta el final (Figura 2.9, b) y se cuentan todos los datos que existan dentro de la celda indistintamente de la familia estructural a la que pertenecen. Para poder ubicar en el espacio la celda se calcula las coordenadas de su centroide interpolando las coordenadas de los datos estructurales que estén dentro de la celda (Figura 2.9, b).

El cálculo de densidad de fracturas por familias es similar al cálculo anterior. La diferencia radica en que solamente se cuentan las estructuras que pertenezcan a una determinada familia (Figura 2.10).

Debido a que las estructuras que pertenecen a una misma familia tienen geometrías similares, se puede calcular el Dip y Dipdir característico para cada familia mediante el software Dips. Con los datos de Dip y Dipdir característico de cada familia y los datos de “NRumbo” y “NManteo” de la línea de mapeo calculados en el punto anterior (0), es posible programar el cálculo la densidad de fractura real para cada familia.



**Figura 2.9:** Esquema con funcionamiento del cálculo de DF. a) línea de mapeo esquemática con estructuras con distintas actitudes; b) la línea de mapeo se divide en celdas de tamaño D=15 m., DF es el número de todas las estructuras que estén contenidas dentro de la celda de tamaño D y la cruz roja corresponde al centroide de la celda de tamaño D.



**Figura 2.10:** Esquema con funcionamiento del cálculo de DF por familia, para efectos prácticos en la figura se muestran 3 familias de estructuras a modo de ejemplo. DF es el número de todas las estructuras que existan dentro de la celda, mientras que DF<sub>1</sub>, DF<sub>2</sub> y DF<sub>3</sub> cuenta el número de estructuras que existan de la familia 1, familia 2 y familia 3 respectivamente.

## Densidad de Fractura

La densidad de fractura (DF) es definida en este trabajo como la cantidad de fracturas que se reconocen a lo largo de una longitud determinada. Esto es posible realizarlo a lo largo de sondajes o líneas de mapeo (*scanline*). Considera cualquier tipo de discontinuidad, como fallas, vetillas, fracturas, etc. Para la presente memoria la longitud ( $l$ ) utilizada es 15 m., correspondientes al tamaño de la celda. Los tipos de discontinuidades que componen la base de datos son estructuras menores (diaclasas, vetas y fallas menores) y fallas (fallas mayores e intermedias) (Carrizo *et al.*, 2013).

El sondaje o talud posee discontinuidades correspondientes a distintos grupos de familias de estructuras de igual orientación (*sets*), con rumbos y manteos diferentes, por lo que la DF dependerá de la dirección que tenga la línea de mapeo.

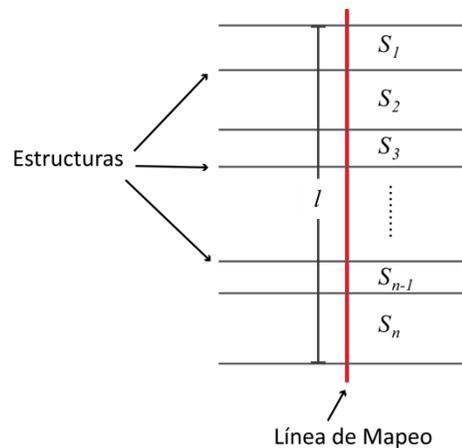
Por otra parte, la frecuencia de fracturas (FF) se define como el número de discontinuidades interceptadas por una unidad de largo de la línea de mapeo (Zhang, 2006; entre otros), por lo

tanto, si se normaliza la DF por el largo de la celda se obtiene la FF, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{DF}{FF} = \frac{15[m]}{1[m]} \rightarrow FF = \frac{DF}{15}$$

A su vez, la FF corresponde también al recíproco del espaciamiento promedio ( $S$ ) (Figura 2.11) que se define como la distancia perpendicular entre estructuras adyacentes de un mismo *set* (Zhang, 2006; entre otros). La relación entre FF y espaciamiento ( $S$ ) está dada por la siguiente ecuación (Figura 2.11), en donde el espaciamiento promedio corresponde a la sumatoria de todos los espaciamientos ( $S_i$ ) divididos por el número de estructuras, a su vez, la sumatoria de espaciamientos ( $S_i$ ) equivale al largo de la línea de mapeo ( $l$ ), y finalmente, el número de estructuras dividido por el largo de la línea de mapeo ( $l$ ) corresponde a la frecuencia de fractura (FF).

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} = \frac{l}{N^{\circ} \text{ de estructuras}} = \frac{1}{FF}$$



**Figura 2.11:** Esquema con detalle del cálculo del espaciamiento promedio ( $S$ ) para un mismo *set* estructural. En rojo se destaca la línea de mapeo de largo  $l$  normal al *set*.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_{n-1}$  y  $S_n$  corresponden a los espaciamientos entre estructuras adyacentes, el promedio entre estos espaciamientos da como resultado el espaciamiento promedio.

### Cálculo de Densidad de Fractura real

En terreno, el espaciamiento ( $S$ ) y FF se mide a lo largo de sondajes o líneas de mapeo (*scanlines*) cuya orientación está definida independientemente de la orientación de las discontinuidades. Por lo tanto, dado que la dirección de la línea de mapeo no es necesariamente

perpendicular al plano del *set* de discontinuidades, el espaciamiento y FF medidos a lo largo de la línea de mapeo es aparente y no el real (Figura 2.12). Para corregir esto se aplica el siguiente cálculo:

$$S_r = S_a \cos \delta ,$$

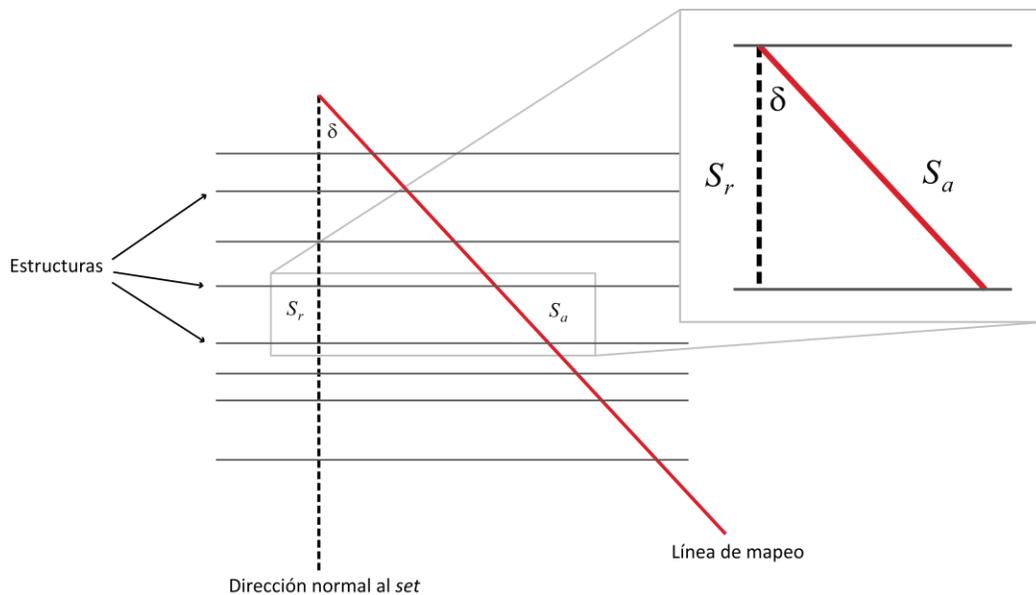
en donde  $S_r$  es el espaciamiento real ( $S_r$ ) corresponde a la proyección del espaciamiento aparente ( $S_a$ ) al eje normal al *set* de discontinuidades, donde  $\delta$  corresponde al ángulo entre la normal al *set* de discontinuidades y dirección de la línea de mapeo (Figura 2.12). Además como se mostró anteriormente:

$$FF = \frac{1}{S} ,$$

por lo tanto:

$$FF_r = \frac{FF_a}{\cos \delta} ,$$

(Zhang, 2006; entre otros) con  $0^\circ \geq \delta \geq 75^\circ$ ; en donde  $FF_a$  es la frecuencia de fractura aparente,  $FF_r$  es la frecuencia de fractura real y  $\delta$  el ángulo entre la normal al *set* de discontinuidades y la dirección de la línea de mapeo (Figura 2.12).



**Figura 2.12:** Esquema con funcionamiento del cálculo de espaciamiento aparente a espaciamiento real de un mismo *set* de estructuras. En rojo se destaca la línea de mapeo, la línea punteada corresponde a la dirección normal al *set* de estructuras, el ángulo  $\delta$  es el la diferencia entre la dirección de la línea de mapeo y la dirección normal al *set* de estructuras,  $S_r$  corresponde al espaciamiento real y  $S_a$  al espaciamiento aparente de las estructuras. El extremo superior derecho de la figura corresponde a una vista en detalle del cálculo de espaciamiento aparente a espaciamiento real de un mismo *set* de estructuras.

Al multiplicar la ecuación anterior por la longitud de la línea de mapeo o la longitud de la celda ( $l$ ) se obtiene esta misma relación para la densidad de fracturas:

$$DF_r = \frac{DF}{\cos \delta} ,$$

en donde  $DF$  es la densidad de fractura,  $DF_r$  es la densidad de fractura real y  $\delta$  el ángulo entre la normal al *set* de discontinuidades y la dirección de la línea de mapeo.

Para la programación del cálculo de  $DF$  real se utiliza los parámetros *Dipdir* característico de cada familia y “*NRumbo*”, correspondientes a la dirección normal de las estructuras de cada familia y dirección de la línea de mapeo respectivamente. Se calcula la diferencia de ángulo mínima entre *Dipdir* y “*NRumbo*”, es decir, si la diferencia excede los  $90^\circ$  se calcula su ángulo suplementario. Si  $\delta > 75^\circ$ , se le asigna  $\delta = 75^\circ$  de este modo el valor de  $DF_r$  no tiende a infinito.

## 2.2 Modelamiento de la Densidad de Fractura

Una vez ya calculada la  $DF$ , se modela este parámetro en el espacio. Para ello se utiliza el software ArcGis, generando un *Pitshel* con la distribución de densidad de fracturas en la mina rajo abierto Los Pelambres.

Para representar los valores de  $DF$  y establecer una correlación espacial entre ellos, se aplica la herramienta de análisis espacial densidad de *kernel* para el parámetro  $DF$ , con una celda de salida de  $15 \times 15$  y un radio de búsqueda de 100 m. Posteriormente se zonifican los datos según los valores resultantes de las densidades de *kernel* calculadas a partir de los valores de  $DF$ . A continuación se describe el funcionamiento de la densidad *de kernel*.

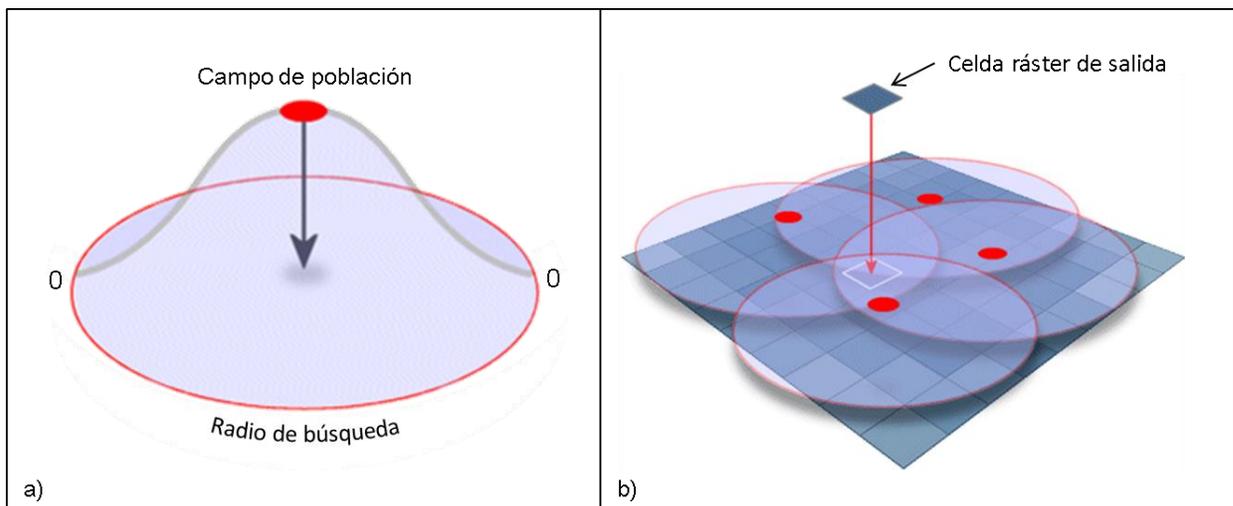
### Densidad de *kernel*

La herramienta Densidad *kernel* calcula la densidad de las entidades de punto en su vecindad. El campo de población o valor de la entidad de punto, se puede utilizar para ponderar algunas entidades más que otras, según su significado, o para permitir que un punto represente varias observaciones. Para este trabajo se utilizará el valor de  $DF$  y  $DF$  real de cada familia como valor de cada punto.

El funcionamiento de esta herramienta consiste en ajustar una superficie curva uniforme sobre cada punto. El valor de superficie es más alto en la ubicación del punto y va disminuyendo a medida que aumenta la distancia desde éste, hasta alcanzar cero en la distancia radio de búsqueda desde el punto (Figura 2.13, a). Sólo es posible un vecindario circular. El volumen bajo la superficie es igual al valor del punto, o 1 si su valor no es especificado (Figura 2.13, a). Los valores de puntos pueden ser de tipo entero o punto flotante (número real).

Para calcular la densidad de cada celda ráster de salida, se agregan los valores de todas las superficies de *kernel* en donde se superponen con el centro de la celda de salida (Figura 2.13, b). La función *kernel* utilizada por ArcGis se basa en la función *kernel* cuadrática que se describe en Silverman (1986).

Aumentar el radio no cambiará en gran medida los valores de densidad que se calcularon. Si bien caerán más puntos dentro una vecindad más grande, este número se dividirá por un área más grande al calcular la densidad. El efecto principal de un radio más grande es que la densidad se calcula considerando una mayor cantidad de puntos que pueden estar más lejos de la celda ráster. Esto tiene como resultado un ráster de salida más generalizado.



**Figura 2.13:** Funcionamiento de densidad de *kernel*. a) La superficie (superficie de *kernel*) bajo el campo de población (valor de punto) disminuye hasta anularse en el radio de búsqueda. El volumen bajo esta superficie tiene el mismo valor que el campo de población. b) El valor de la densidad de cada celda ráster de salida se calcula sumando los valores de las superficies de *kernel* en donde estas se superponen con el centro de la celda ráster de salida.

## **2.3 Modelamiento de la Densidad de Fractura por cada familia estructural**

Al igual que para el modelamiento de la DF, el modelamiento de DF por cada familia estructural se realiza con el software ArcGis, generando un *Pitshell* con la distribución de densidad de fracturas por cada familia estructural (Carrizo *et al.*, 2014).

Para representar los valores de DF por familia y posteriormente establecer una correlación espacial entre ellos, se aplica la herramienta de análisis espacial densidad de *kernel* para cada DF real de cada familia (parámetros DFreal1, DFreal2, DFreal3 y DFreal4), con una celda de salida de 15x15 y un radio de búsqueda de 100 m. Posteriormente se zonifican los datos según los valores resultantes de las densidades de *kernel*.

## **2.4 Relaciones espaciales entre el Modelo de Densidad de Fractura y zonación de dominios estructurales.**

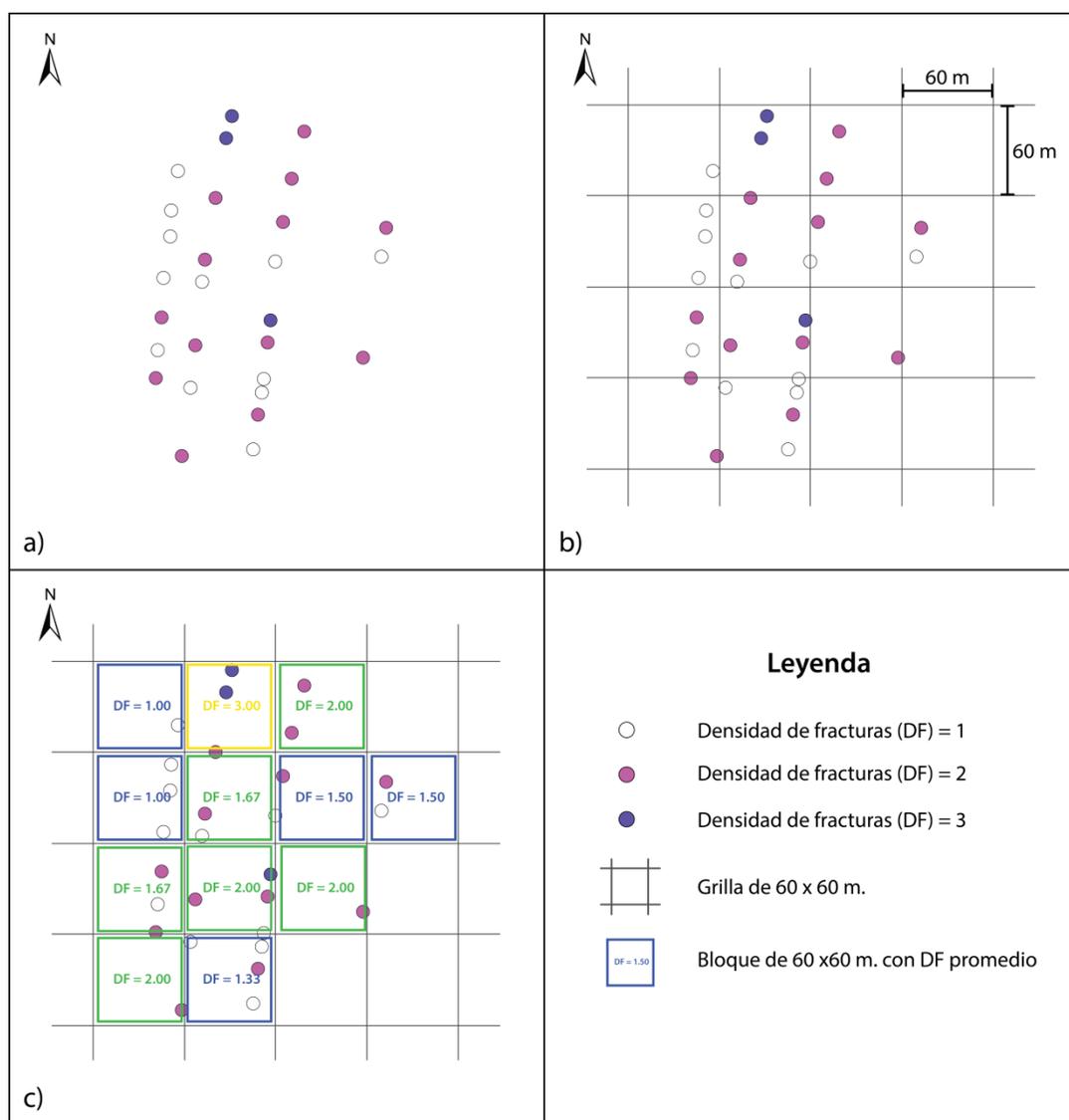
A partir de los resultados obtenidos del modelamiento de DF, se explora la existencia de algún tipo de relación espacial entre la zonación de dominios estructurales, obtenido del modelo estructural 3D de fallas y dominios, y el modelo de densidad de fracturas y densidad de fracturas real. Para ello se analiza, cualitativamente y cuantitativamente, la zonificación de densidad de fracturas y densidad de fracturas real en relación a la zonificación dominios estructurales.

## **2.5 Relaciones espaciales entre Modelo de Densidad de Fractura y geología de Los Pelambres.**

A partir de los resultados obtenidos del modelamiento de DF, se explora la existencia de algún tipo de relación espacial entre el modelo de densidad de fracturas y densidad de fracturas real con la geología de la Mina Los Pelambres. Para ello se analiza, cualitativamente y cuantitativamente, la zonificación de densidad de fracturas y densidad de fracturas por familias en relación a la litología, alteración, mineralización de cobre, molibdeno y lineamientos de arsénico de la Mina Los Pelambres descrito en trabajo de Perelló *et al.* (2012).

## 2.6 Modelo de bloques de densidad de fracturas

El modelo de bloques de densidad de fracturas se construye a partir de los resultados de densidad de fracturas en una grilla de 60x60 m. Lo anterior es realizado calculando la densidad de fracturas promedio dentro de cada bloque de 60x60 m (Figura 2.14). Posteriormente, este modelo de bloques de DF es unificado con el modelo de dominios estructurales de Los Pelambres.



**Figura 2.14:** Esquema con funcionamiento del modelo de bloques para los datos de densidad de fractura (DF), el eje x corresponde a las coordenadas E-W y el eje y corresponde a las coordenadas N-S. a) Datos de densidad de fracturas (DF), los distintos colores de puntos corresponden a distintas DF, en este caso, en blanco se destaca DF = 1, en rosado DF = 2 y en morado DF = 3. b) La extensión de los datos de DF se divide en una grilla de 60 x 60 m. c) Con los datos de DF que estén contenidos dentro del bloque de 60 x 60 m., se calcula la densidad de fracturas promedio para cada bloque.

## 3 Antecedentes Geológicos

Los Pelambres es un depósito tipo pórfido de cobre – molibdeno perteneciente a la franja de pórfidos cupríferos del Mioceno tardío - Plioceno temprano (Maksaev *et al.*, 2007). Es el tercer depósito de mayor concentración mineral de su franja metalogénica y se sitúa en el extremo norte de la misma (Maksaev *et al.*, 2007). Además de Los Pelambres, la franja de pórfidos cupríferos del Mioceno tardío - Plioceno temprano incluye a otros pórfidos de Cu-Mo de clase mundial como El Teniente y Rio Blanco - Los Bronces, gozando de una dotación de Cu de ~360 Mt (Perelló *et al.*, 2012) (Figura 1.1). Estos depósitos de Cu-Mo están típicamente emparentados a stocks porfídicos multifase y a complejos de brechas magmático-hidrotermal (Maksaev *et al.*, 2007).

### 3.1 Geología regional del depósito Los Pelambres

#### 3.1.1 Tectónica y estratigrafía

La región de los Pelambres abarca la frontera de Chile con Argentina entre los 31°35'S y 32°03'S, y se divide en tres dominios tectónicos principales que están limitados por fallas inversas de alto ángulo con rumbos N-S a NNW-SSE: falla Los Pelambres, de vergencia W; falla Ttotal, de vergencia W y Falla Gonzáles, de vergencia E (Figura 3.1) (Perelló *et al.*, 2012).

El dominio este se ubica al este de la falla Los Pelambres. Comprende un gran bloque basamento de la cordillera de Santa Cruz. Hacia el oeste, el bloque es sobreyacido por afloramientos de la cuenca de Neuquén (rocas sedimentarias y volcánicas continentales triásicas), y por rocas sedimentarias marinas y continentales del Jurásico al Cretácico Temprano. A su vez, estas rocas se encuentran sobreyacidas discordantemente por los Estratos de Mondaca (clasificación informal) compuestos por conglomerados y brechas volcanoclásticas continentales, tobas y rocas de composición andesíticas y dacíticas. Hacia el sur de la región, estos estratos están sobreyacidos discordantemente por más de 400 m de flujos de lavas subhorizontales de composición andesítica. Hacia el norte, estas rocas están sobreyacidas por basamento Paleozoico y estratos Mesozoicos puestos en contacto mediante la falla Mondaca (Figura 3.1).

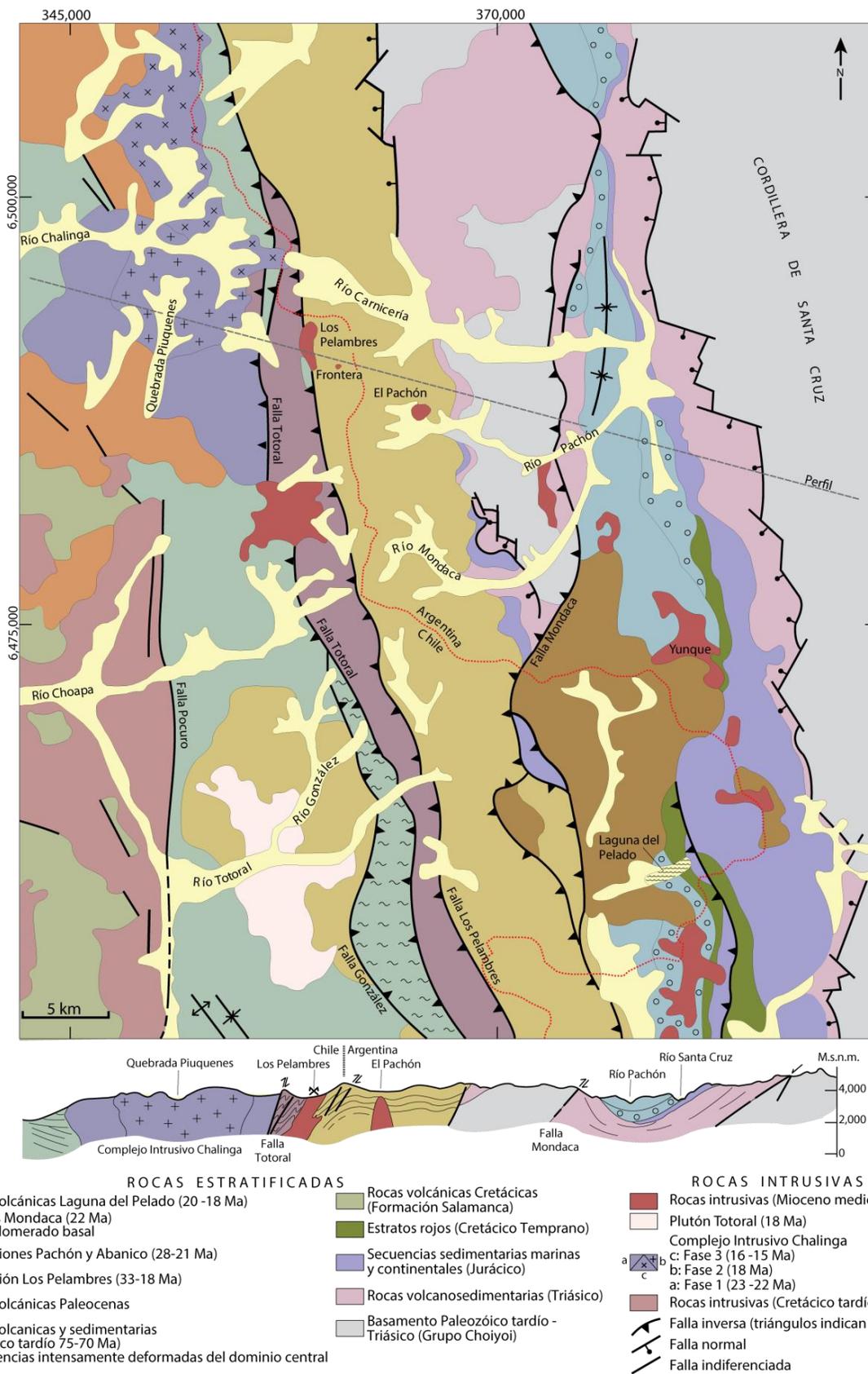
El dominio central corresponde a una estrecha franja intensamente deformada de dirección N-S a NW-SE de 5 Km de ancho. Limita al oeste con las fallas Ttotal y Gonzáles, y al este con

la Falla los Pelambres. Se compone de tobas y flujos de lava de composición andesítica a basáltica, estratos epiclásticos fluviales y calizas lacustres pertenecientes a la Formación Los Pelambres, además de lentes tectónicas de rocas volcánicas cretácicas (Figura 3.2).

El dominio oeste se ubica al oeste de las fallas Totoral y Gonzáles. Las rocas que componen este dominio se encuentran manteniendo levemente hacia el este y comprenden secuencias volcánicas continentales, volcanosedimentarias, y rocas sedimentarias cretácicas. Incluye también la Fm. Salamanca y otras unidades indiferenciadas. Hacia el este, la Fm. Salamanca se encuentra en contacto con unidades volcánicas mediante la Falla Pocuro. Al noroeste de la región de los Pelambres, las rocas volcánicas cretácicas están sobreyacidas discordantemente por secuencias volcánicas de composición andesítica paleocenas y, en Río Totoral, por rocas similares del Oligoceno - Mioceno (Figura 3.1).

### **3.1.2 Rocas intrusivas**

La actividad intrusiva Meso-Cenozoica ocurre principalmente en el dominio Oeste. Se compone de plutones y stocks, de composición principalmente intermedia, del Cretácico tardío, Paleoceno, Eoceno y Oligoceno. En los dominios Central y Este, la actividad intrusiva disminuye notablemente. Hacia el sur de la región de los Pelambres, se encuentra el Plutón Totoral (Figura 3.1) de composición monzogranítica (Perelló *et al*, 2012). Hacia el Oeste de la región, se ubica el Complejo Intrusivo Chalinga (Figura 3.1) compuesto de tres fases intrusivas: la primera fase está compuesta de dioritas y granodioritas de piroxeno; la segunda fase se compone de gabros y dioritas de olivino, y la tercera fase está compuesta de monzodioritas cuarcíferas (Perelló *et al*, 2012). Hacia el sureste de esta última fase, se extiende un cordón de stocks de composición diorita cuarcífera y dacítica. Incluye centros de pórfidos como Los Pelambres, El Pachón, Yunque y Cerro Mercenario. La intrusión más al noroeste de este cordón corresponde al stock Los Pelambres y sus cuerpos satélites (Perelló *et al*, 2012).



**Figura 3.1:** Mapa geológico de la región de Los Pelambres. Tomado de Perelló *et al.* (2012)

## **3.2 Geología distrital Los Pelambres**

### **3.2.1 Rocas caja**

Las rocas de caja de los cuerpos mineralizados en Los Pelambres corresponden a Toba Riolítica (Cretácico Tardío) y las formaciones Los Pelambres y Pachón. Estas dos formaciones se encuentran en contacto por la falla inversa Los Pelambres (Figura 3.1 y Figura 3.2) (Perelló *et al.*, 2012).

La Fm. Pachón, descrita como Fm. Abanico en trabajos anteriores, se encuentra al este de la falla Los Pelambres y aflora al este y al norte de la mina Los Pelambres (Figura 3.2). Corresponde a rocas porfídicas amigdaloidales y a brechas volcánicas de composición andesítica con manteos que varían entre los 20°W y los 70°W y de rumbo N-S (Brockway *et al.*, 2008). Importantes bloques de composición andesítica pertenecientes a esta formación están presentes en el Stock Los Pelambres (Figura 3.2) (Perelló *et al.*, 2012).

La Fm. Los Pelambres se encuentra al oeste de la falla Los Pelambres y aflora al oeste de la mina Los Pelambres (Figura 3.2). Se compone de rocas epiclásticas y flujos de lavas y brechas de composición andesítica. Sus manteos varían entre los 50°W y los 80°W y su rumbo es N-S (Brockway *et al.*, 2008; Perelló *et al.*, 2012).

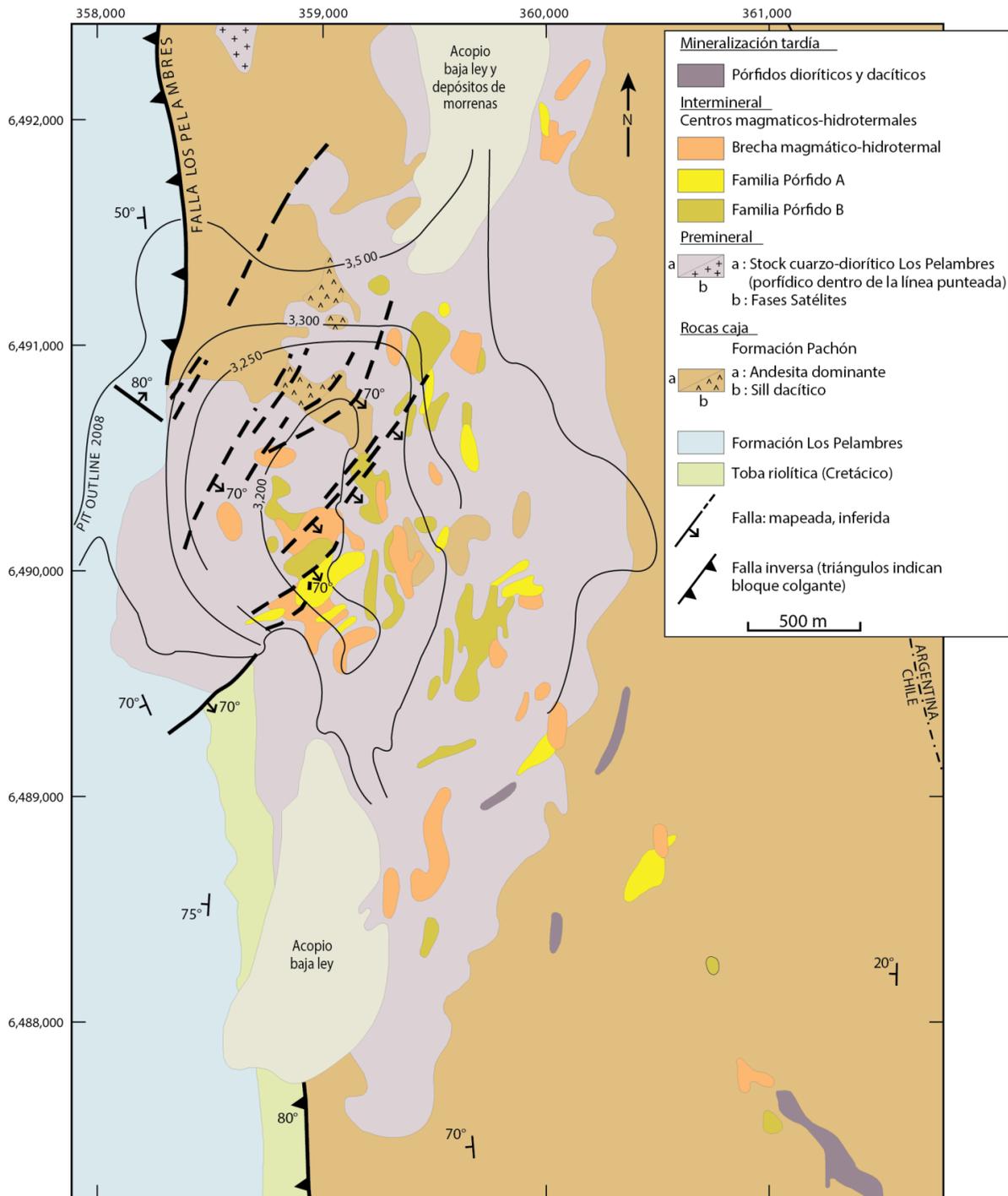
La unidad de Toba Riolítica, descrita por Brockway *et al.* (2008) como Filón Dacítico, es de textura porfídica fina con fenocristales de plagioclasa y escasos ojos de cuarzo. Posee rumbo N-S y manteo subvertical. Aflora al suroeste del rajo y se pone en contacto con la Fm. Pachón mediante la Falla Los Pelambres y subyace discordantemente a la Fm. Los Pelambres (Figura 3.2) (Brockway *et al.*, 2008; Perelló *et al.*, 2012).

### **3.2.2 Intrusivos**

#### **3.2.2.1 Stock los Pelambres**

El Stock los Pelambres es un cuerpo intrusivo de tamaño 4.5 × 2.5 km con tendencia N-S. Se compone de muchas fases discretas que incluyen cristales de tamaño fino y grueso con texturas equigranulares y porfídicas. La mayor parte del Stock Los Pelambres se compone de diorita cuarcífera gris clara a gris medio, con textura subequigranular a hipidiomórfica equigranular (tonalita de Sillitoe, 1973), mientras que un importante volumen de la porción

central este del stock es ocupada por diorita cuarcífera de textura porfídica (Figura 3.2). Observaciones locales sugieren que las fases porfídicas son posteriores al emplazamiento de la diorita cuarcífera equigranular (Perelló *et al.*, 2012).



**Figura 3.2:** Mapa geológico distrital área Los Pelambres. Tomado y modificado de Perelló *et al.* (2012).

### **3.2.2.2 Fases porfídicas interminerales**

Corresponden diques y cuerpos pequeños de geometría irregular que en su mayoría se encuentran agrupados en la porción central del Stock Los Pelambres (Figura 3.2). Se agrupan en dos familias principales: Pórfido A y Pórfido B (Atkinson *et al.*, 1996). Es posible que exista más de una generación de Pórfido A y Pórfido B, ya que se han encontrado relaciones de corte mutuas entre ambos pórfidos (Perelló *et al.*, 2012).

La familia de Pórfido A se presenta como pequeños diques y cuerpos irregulares con tendencia N-S que afloran al este de la porción central de Stock Los Pelambres (Atkinson *et al.*, 1996). Se caracteriza por ser de composición predominantemente andesítica, color gris oscuro a marrón, con cristales de tamaño de grano medio a fino (1 - 3 mm) y textura porfídica (Perelló *et al.*, 2012). Contiene abundantes fenocristales de plagioclasa, menor fenocristales de hornblenda biotitizada y escasos fenocristales de biotita y cuarzo. La masa fundamental es de textura traquítica y se compone principalmente de biotita (Atkinson *et al.*, 1996).

La familia de Pórfido B ocurre principalmente como diques ubicados en la porción central del depósito (Atkinson *et al.*, 1996). Se caracteriza por ser de composición predominantemente dacítica, color gris claro a medio o marrón con cristales de tamaño de grano medio (2 - 4 mm) y textura porfídica (Perelló *et al.*, 2012). Contiene abundantes fenocristales de plagioclasa, menor presencia de fenocristales de biotita y hornblenda biotitizada, y escasos fenocristales de cuarzo. Su masa fundamental es afanítica a aplítica (Atkinson *et al.*, 1996).

### **3.2.2.3 Fases minerales porfídicas tardías**

Corresponden a pórfidos dioríticos y diques microdioríticos ubicados predominantemente en la zona entre Los Pelambres y Frontera (Figura 3.2). Los diques localizados en el margen SE del stock Los Pelambres tienen tendencias N-S a NE- SW con 20 a 30 m de ancho y varios cientos de metros de largo, con textura equigranular microfanerítica (Perelló *et al.*, 2012).

## **3.2.3 Centros hidrotermales**

Los centros hidrotermales se definen como focos de intrusiones principalmente de pórfido B y en menor medida de Pórfido A, con desarrollo de fases tempranas o tardimagmáticas de alteración (Brockway *et al.*, 2008). Se pueden reconocer fases de aplitas, pegmatitas, texturas de

solidificación unidireccional (UST), brechas magmático-hidrotermal y brechas ígneas, las cuales en conjunto muestran características de transición magmática a hidrotermal (Brockway et al., 2008; Perelló *et al.*, 2012).

La secuencia de desarrollo de estos centros hidrotermales es compleja y no necesariamente igual para todas ellas. En una sección idealizada, cuerpos de aplita-pegmatita ocurren junto con texturas de solidificación unidireccional (UST) en zonas apicales de los cuerpos de brecha y/o intrusiones generadoras asociadas (Pórfido A y B). La brecha magmático-hidrotermal es normalmente polimíctica y se compone de fragmentos de múltiples fases intrusivas. El cemento hidrotermal de esta brecha está hecho de los mismos minerales que componen los cuerpos de aplita-pegmatita en partes distales de la intrusión (cuarzo, feldespato potásico, anhidrita, biotita, turmalina, calcopirita y bornita), gradando progresivamente a matriz ígnea compuesta de Pórfido A o B (Perelló *et al.*, 2012).

### 3.2.4 Geología estructural Mina Los Pelambres

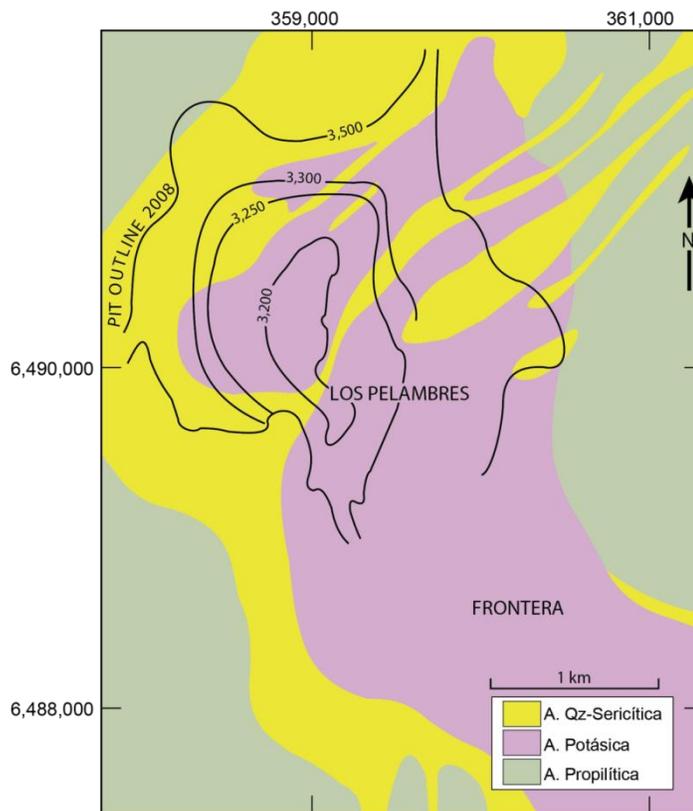
El desarrollo tectónico del área de Los Pelambres es dominado por la falla Los Pelambres: falla inversa de alto ángulo, vergencia oeste ( $\sim 80^\circ$ ) con rumbo N-S (Perelló *et al.*, 2012; Brockway *et al.*, 2008). Sitúa la unidad de Tobas Riolíticas (Cretácico tardío) y la Fm. Los Pelambres (Oligoceno - Mioceno temprano) por sobre la Fm. Pachón (Mioceno temprano) (Figura 3.1 y Figura 3.2). Se presume que el último desplazamiento de la falla Los Pelambres ocurrió antes de la intrusión del Stock Los Pelambres (Mioceno medio), ya que el lóbulo W del stock se encuentra cortando la falla (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los manteos homoclinales al oeste de las Fms. Los Pelambres y Pachón aumentan su magnitud marcadamente en las proximidades de la falla (Perelló *et al.*, 2012).

Una serie estructuras que han sido inferidas mediante lineamientos de altas concentraciones de As cortan la parte central oeste del Stock Los Pelambres (Figura 3.2) con rumbos N50°E a N70°E con manteos entre 50° y 70°SE (Brockway *et al.*, 2008). Están definidas por etapas tardías de vetillas tipo D y se encuentran asociadas a alteración sericítica, (Perelló *et al.*, 2012; Brockway *et al.*, 2008). Una componente principal de este *set* de estructuras parece desplazar el contacto entre el Stock los Pelambres y la falla los Pelambres (Figura 3.2) (Perelló *et al.*, 2012).

### 3.2.5 Alteración hidrotermal

Los Pelambres se ajusta parcialmente al modelo clásico de alteración hidrotermal de Lowell y Guilbert (1970) y de Sillitoe (2010), en donde el núcleo de alteración potásica grada lateralmente a una zona de alteración sericitica anular rodeada por un extenso halo de alteración propilítica (Sillitoe, 1973).

La alteración potásica presenta gran extensión en el depósito, conformando una franja con disposición NW-SE de ~2 km de ancho en el sector central del rajo de Los Pelambres (Figura 3.3) (Brockway *et al.*, 2008). La alteración potásica está definida por la presencia de biotita hidotermal y feldespato potásico junto con anhidrita, calcopirita ± bornita ± trazas de digenita, molibdenita y localmente magnetita hidrotermal (Sillitoe, 1973). La hornblenda en las rocas ígneas está reemplazada casi en su totalidad por biotita café, y la plagioclasa está reemplaza por feldespato potásico. (Sillitoe, 1973; Atkinson *et al.*, 1996). Las Brechas magmático-hidrotermal e ígneas también son parte de la zona de alteración potásica; presentan biotita café y verde y se caracteriza por el desarrollo de sericita ± clorita en sus partes apicales (Perelló *et al.*, 2012).



**Figura 3.3:** Distribución de alteración hidrotermal en Los Pelambres. Tomado Perelló *et al.* (2012).

La alteración cuarzo-sericita se dispone como una zona anular alrededor de la alteración potásica. Alcanza su mayor desarrollo en la zona NW de los Pelambres y coincide con el corredor estructural de rumbo NE (Figura 3.3) (Perelló *et al.*, 2012). La alteración cuarzo-sericita se superpone y destruye las asociaciones mineralógicas de la alteración potásica; el feldespato está reemplazado por sericita y la biotita por pirita y/o sericita (Atkinson *et al.*, 1996). Está definida por la presencia de cuarzo, sericita, pirita, turmalina subordinada, y menor calcopirita, galena, esfalerita, molibdenita y trazas de digenita (Perelló *et al.*, 2012).

La alteración Propilítica se dispone como una amplia zona que rodea Los Pelambres (Figura 3.3). Andesitas adyacentes al depósito se encuentran intensamente propilitizadas. Presentan minerales de arcilla, clorita y yeso con epidota local. En el sector SE del depósito, la alteración consiste en vetillas y cúmulos de epidota. No se dispone de información precisa de los límites de esta alteración (Atkinson *et al.*, 1996).

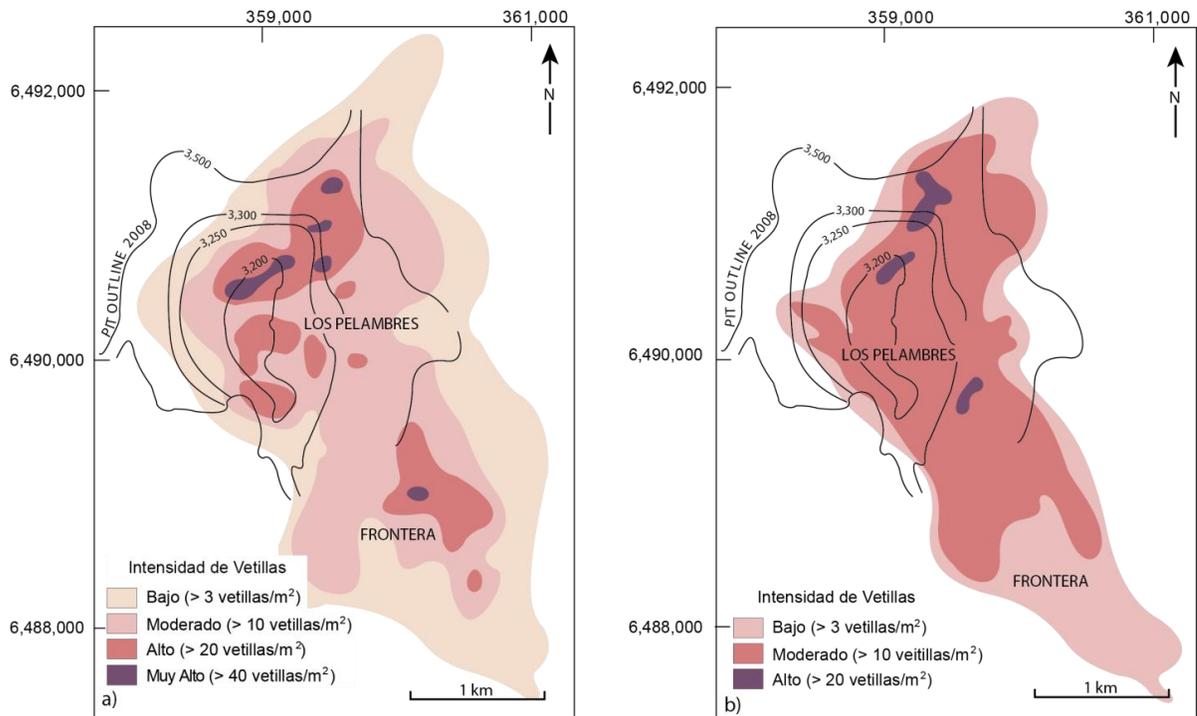
### **3.2.6 Mineralización hipógena**

#### **3.2.6.1 Vetillas**

En los Pelambres, han sido reconocidas seis tipos de vetillas. Desde la más antigua a la más joven son: biotita temprana (EB), mica verde (GM), tipo 4 (T4), tipo A (A), tipo B (B) y tipo D (D) (Perelló *et al.*, 2012). Las de mayor presencia en el depósito son las vetillas tipo 4, A y B, con distribuciones espaciales de tendencia NE y SE que reflejan elementos geológicos y estructurales descritos anteriormente (Perelló *et al.*, 2012).

Las vetillas tipo 4 contribuyen con la mayor parte del Cu de Los Pelambres (Figura 3.4, b). Están compuestas por una banda central de cuarzo, feldespato potásico, con menor calcopirita, bornita y molibdenita, y poseen un gran halo de alteración potásica (Brockway *et al.*, 2008). La mayoría de la calcopirita, bornita y molibdenita se encuentra diseminada en los halos, los cuales se componen de cuarzo, feldespato potásico, biotita, sericita, mica verde, andalucita, anhidrita, corindón, rutilo y plagioclasa (Perelló *et al.*, 2012).

Las vetillas tipo A y B, contribuyen con el resto de Cu de Los Pelambres (Figura 3.4, a). Las vetillas tipo A se componen de cuarzo granular con diseminación fina de calcopirita, bornita, menor pirita y ocasionalmente molibdenita. Generalmente no poseen halos de alteración. Las vetillas tipo B son típicamente rectilíneas, se componen de cuarzo granular fino, con abundante molibdenita y escasa calcopirita y pirita (Brockway *et al.*, 2008).

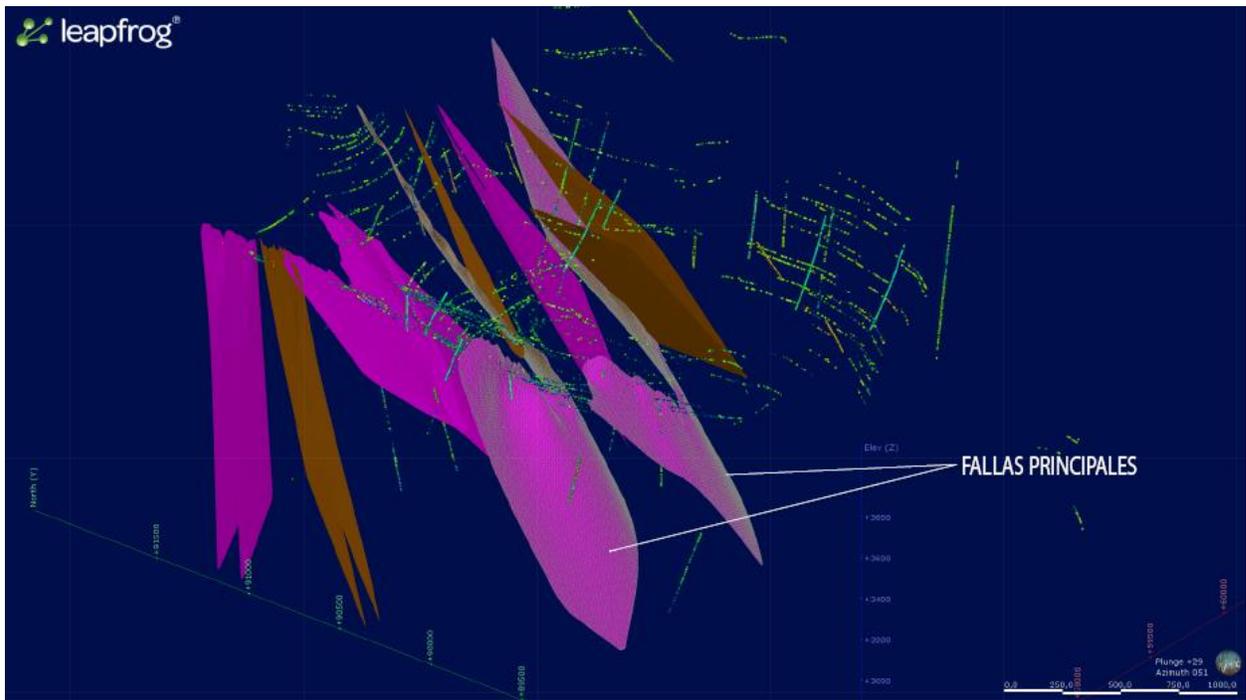


**Figura 3.4:** a) distribución e intensidad de vetillas tipo A y B en Los Pelambres, b) distribución e intensidad de vetillas tipo 4 en Los Pelambres. Tomado de Perelló *et al* (2012).

### 3.2.7 Modelo geométrico de fallas 3D para el rajo de Los Pelambres

Con el fin de construir un Modelo de Fallas 3D, las estructuras fueron categorizadas en tres grupos: (i) fallas principales, con una potencia mayor a 10 bancos; (ii) fallas intermedias, con potencias entre 5 y 10 bancos; y (iii) estructuras menores, con potencia menor a 2. Los parámetros de categorización no son exclusivos por sí solos, sino más bien, responden a un criterio de evaluación por caso. Cabe señalar que no se observan fallas importantes en el rajo, siendo las estructuras más relevantes aquellas que tienen trazas discretas y una continuidad mayor. La magnitud de la deformación en estas fallas es discreta, lo que justifica su incipiente desarrollo (Carrizo *et al.* 2015).

Como resultado del modelo geométrico de fallas 3D fueron modeladas 14 fallas; dos Fallas Principales de orientación NNE-SSW con inclinaciones coherentes de 40°-50° SE, además de las superficies de límites de Dominios. En general, las Fallas Intermedias están localizadas principalmente en el extremo NW del rajo, las que se orientan de manera consistente con las Fallas Principales, pero con mayor ángulo de manteo. A su vez fueron modeladas Fallas Intermedias en la pared NE del rajo entre las Fallas Principales (Carrizo *et al.* 2015) (Figura 3.5).



**Figura 3.5:** Fallas principales y mayores del rajo Los Pelambres (Carrizo *et al.*, 2014). Los puntos de colores representan la ubicación espacial de los datos estructurales modelados para obtener el modelo geométrico de fallas 3D en Los Pelambres.

## 4 Resultados

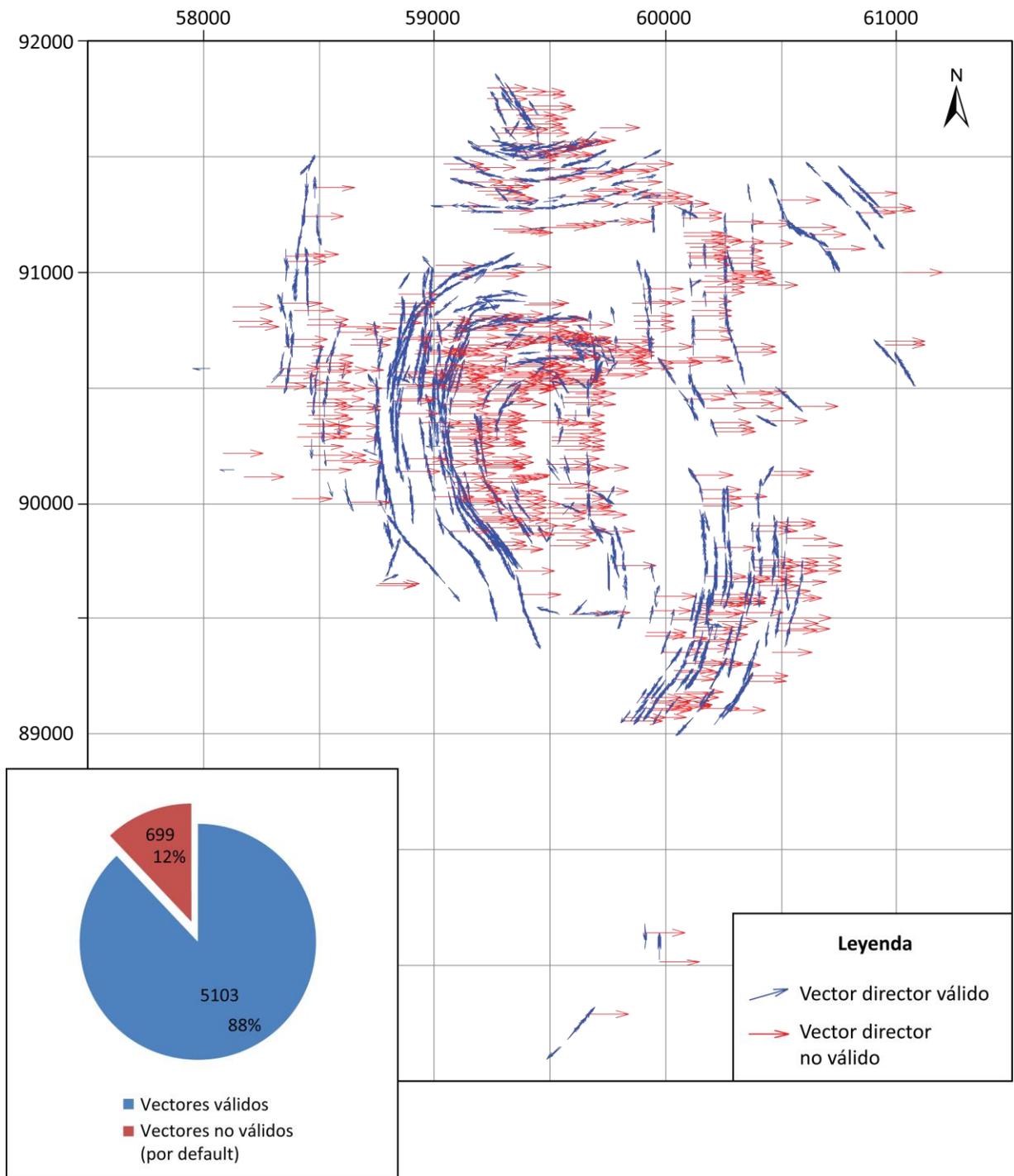
A continuación son expuestos los resultados obtenidos desglosados en i) clusterización y linealización, ii) modelo de DF, iii) relación entre dominios del modelo estructural y el modelo de DF, y iv) relación entre modelo de DF y geología de Los Pelambres.

### 4.1 Clusterización y Linealización

La base de datos obtenida de la clusterización y linealización de datos se muestra en la Tabla 4.1. En naranja se destacan los datos que caracterizan a las estructuras y en azul se denotan los datos que caracterizan la línea de mapeo (*scanline*) de la base de datos original. En verde se destacan los id o número de grupo resultantes de la clusterización de datos y en rosado se muestran los datos resultantes de la linealización de datos; “Distancia” corresponde a la distancia de cada estructura linealizada al punto de origen del grupo.

En particular, la linealización de datos entregó como resultado pares de “NRumbo” y “NManteo” válidos y no válidos (Figura 4.1). Los pares válidos corresponden al 88% de los datos, mientras que los no válidos, al 12% de los datos (Figura 4.1). Los pares no válidos corresponden a grupos conformados por un solo punto, o bien todos los puntos del grupo están en la misma posición, entregando un “NRumbo” de 90° y un “NManteo” de 0°, que corresponden a valores por defecto. Para calcular la DF real de los datos con pares de “NRumbo” y “NManteo” no válidos, se utiliza el Rumbo y el Manteo de la base de datos original para efectuar dicha ponderación.

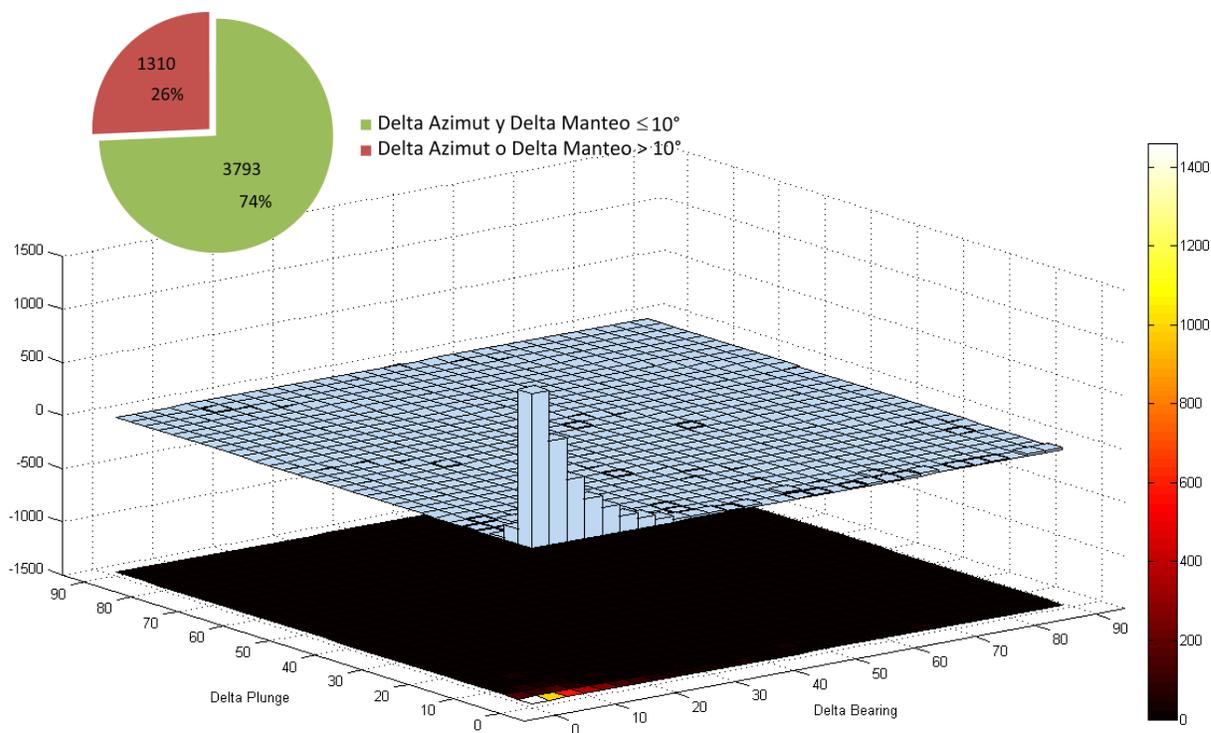
De los pares de “NRumbo” y “NManteo” válidos, el 74% de los datos tiene una diferencia menor a 10° con respecto al Rumbo y Manteo de la travesa de la base de datos original, mientras que el 26% restante de los datos poseen una diferencia mayor a 10° (Figura 4.2). La mayor parte de la diferencia entre “NManteo” y Manteo se concentra por debajo de los 10°, mientras que la mayoría de la diferencia entre “NRumbo” y Rumbo se mantiene por debajo de los 20° (Figura 4.2). A partir de lo anterior se puede concluir que la Linealización de datos estructurales constituye una buena herramienta para calcular de manera automática orientaciones de travesas a partir de datos estructurales cuando no se dispone de información de orientación de banco.



**Figura 4.1:** Distribución de vectores directores (pares de “NRumbo” y “NManteo”) resultantes de la linealización de datos en Los Pelambres. El 88% de los vectores entrega valores válidos de “NRumbo” y “NManteo”, mientras que un 12% de los vectores entrega valores no válidos de “NRumbo” y “NManteo”, 90° y 0° respectivamente correspondientes a valores por defecto.

**Tabla 4.1:** Extracto de las características (metadata) de las bases de datos clusterizada y linealizada. En naranja se destacan los datos que caracterizan a las estructuras y en azul se denotan los datos que caracterizan la línea de mapeo. En verde se destacan los id o número de grupo resultantes de la clusterización de datos y en rosado se muestran los datos resultantes de la linealización de datos; “Distancia” corresponde a la distancia de cada estructura linealizada al punto de origen del grupo.

ID Cluster	Distancia	N	E	Cota	Dip	Dipdir	Familia	Rumbo	Manteo	NRumbo	NManteo
1	0	88180.02	59409.579	3128.2901	74	173		5	0	175.99101	9.9632155
1	4.1016331	88175.99	59409.861	3128.9997	78	170		5	0	175.99101	9.9632155
1	9.2003578	88170.981	59410.213	3129.8819	45	289	3	5	0	175.99101	9.9632155
1	9.700113	88170.489	59410.247	3129.9683	66	56		5	0	175.99101	9.9632155
2	0	88138.56	59412.48	3135.61	58	282	3	5	0	90	0
3	0	88066.45	59412.83	3139.96	51	232		5	0	1.740977	5.2940453
3	6.6112404	88073.03	59413.03	3140.57	36	196	1	5	0	1.740977	5.2940453
4	0	88023.15	59476.957	3179.4393	60	248		5	0	178.14664	12.348677
4	0	88023.15	59476.957	3179.4393	46	250	1	5	0	178.14664	12.348677
4	0.9929211	88024.12	59476.926	3179.6516	66	189		5	0	178.14664	12.348677
4	1.9980603	88025.101	59476.894	3179.8666	74	158		5	0	178.14664	12.348677
4	3.0007449	88026.08	59476.862	3180.081	50	43		5	0	178.14664	12.348677
4	3.993666	88027.049	59476.831	3180.2933	32	276	3	5	0	178.14664	12.348677
4	9.5966373	88032.52	59476.654	3181.4916	66	196		5	0	178.14664	12.348677
4	17.995897	88040.72	59476.389	3183.2879	80	190		5	0	178.14664	12.348677
4	19.501151	88042.19	59476.341	3183.6098	44	248	1	5	0	178.14664	12.348677
4	27.500069	88050	59476.088	3185.3204	48	4		5	0	178.14664	12.348677
4	30.993304	88053.41	59475.978	3186.0675	60	55		5	0	178.14664	12.348677
4	31.894076	88054.29	59475.95	3186.2601	89	8		5	0	178.14664	12.348677
4	34.792593	88057.12	59475.858	3186.88	68	295		5	0	178.14664	12.348677
4	38.39782	88060.64	59475.744	3187.651	52	263		5	0	178.14664	12.348677
4	41.992967	88064.15	59475.631	3188.4199	76	181		5	0	178.14664	12.348677
4	45.495966	88067.57	59475.52	3189.169	50	43		5	0	178.14664	12.348677



**Figura 4.2:** Histograma con las diferencias entre los Rumbo y Manteo entregados en la base de datos y los “NRumbo” y “NManteo” obtenidos de la linealización. La mayoría de los Delta Manteo se concentran por debajo de los 10°, mientras que la mayor parte de lo Delta Rumbo se mantienen por debajo de los 20°. En particular, un 74% de los datos de Delta Rumbo y Delta Manteo se mantienen por debajo de los 10°.

## 4.2 Modelo de Densidad de Fractura (MDF)

El Modelo de Densidad de Fracturas (MDF) es realizado con la base de datos final obtenida del cálculo de la DF (Tabla 4.2).

### 4.2.1 Densidad de Fractura (DF)

La densidad de fractura (DF) es el número total de estructuras existentes dentro de la celda independiente de la familia a la que pertenezcan.

Los resultados obtenidos según la metodología explicada en el capítulo 2 para este parámetro son los siguientes; utilizando el umbral de puntos cercanos definido en 0, se obtiene como resultado un total de 1508 grupos linealizados, que comprenden desde 1 hasta 20 celdas. Además se obtiene un total de 2567 celdas (Tabla 4.4). En la se resumen las principales estadísticas de los resultados de DF.

Con el fin de representar la continuidad espacial de los datos de DF (Figura 4.3), se le aplica la herramienta de análisis espacial densidad de *kernel*, con una celda de salida de 15x15 y un radio de búsqueda de 100 m (Figura 4.4).Figura 4.4 Se observan las mayores concentraciones de densidad de fractura en el sector norte y noroeste del rajo. Las menores concentraciones de densidad de fractura se observan en el sector este del rajo (Figura 4.4).

Con el objetivo de clasificar lo datos cuantitativa y cualitativamente, se zonifican en tres categorías: alta, media y baja, con respecto a los valores de la densidad de *kernel* de la DF (Figura 4.5). Se observa que las zonas con mayores DF se sitúan en el sector noroeste, oeste y norte del rajo; las zonas con DF media ubican en el sector noroeste, norte y sureste del rajo; mientras que las zonas con DF menor se sitúan en el sector noreste, oeste y central del rajo (Figura 4.5).

### 4.2.2 Densidad de Fractura por familias estructurales

La cantidad de familias estructurales y sus rangos de Dip y Dipdir fueron determinados por el grupo de Geología Estructural del AMTC (Carrizo *et al.*, 2014). Los datos de Dip y Dipdir característico de cada familia (centroide ponderado), se obtienen mediante el software Dips (Tabla 4.3).

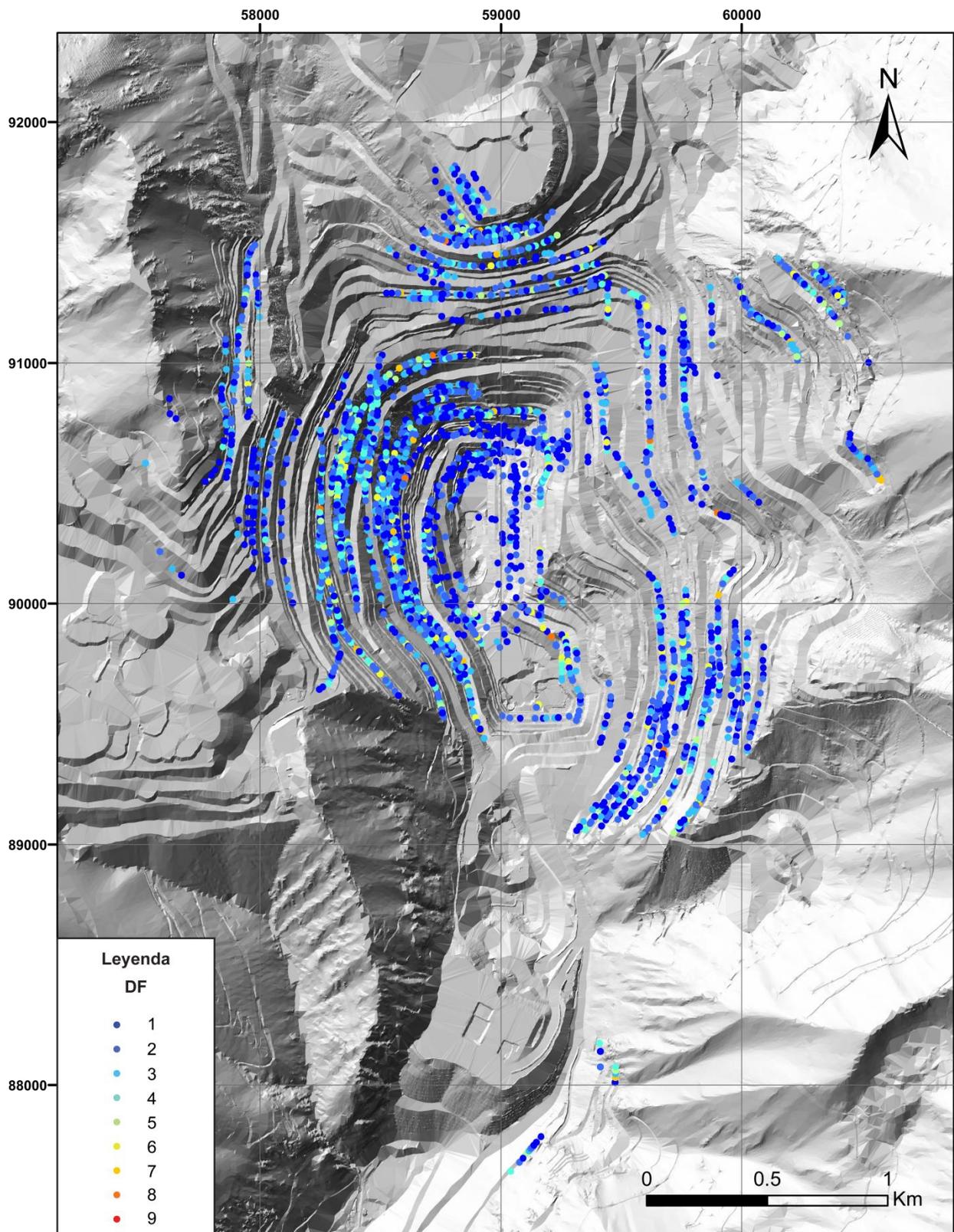
**Tabla 4.2:** Extracto de las características (metadata) de las bases de datos final. En azul se destacan los datos de Rumbo y Manteo de la base de datos original, en verde se destacan los id o número de grupo resultantes de la clusterización de datos, en rosado se muestran los datos resultantes de la linealización de datos y en morado se denotan los datos resultantes del cálculo de DF; N, E y Cota corresponden a las coordenadas del centroide de la celda, “Centroide” es la distancia de las coordenadas del centroide con respecto al origen del grupo, D es el tamaño de la celda, DF es el número de estructuras dentro de la celda, DF<sub>n\_ap</sub> es el número de estructuras por cada familia en la celda y DF<sub>n\_real</sub> es el número de estructuras de cada familia con el cálculo de DF real.

ID Cluster	N	E	Cota	Centroide	D	Rumbo	Manteo	NRumbo	NManteo	DF	DF1_ap	DF1_real
1	88172.651	59410.096	3129.5877	7.5	15	5	0	175.99101	9.9632155	4	0	0
2	88138.56	59412.48	3135.61	7.5	15	5	0	90	0	1	0	0
3	88073.915	59413.057	3140.652	7.5	15	5	0	1.740977	5.2940453	2	1	1.564167
4	88030.473	59476.72	3181.0432	7.5	15	5	0	178.14664	12.348677	7	1	1.6953351
4	88045.118	59476.246	3184.2511	22.5	15	5	0	178.14664	12.348677	3	1	1.6953351
4	88059.763	59475.772	3187.459	37.5	15	5	0	178.14664	12.348677	5	0	0
4	88074.408	59475.301	3190.6668	52.5	15	5	0	178.14664	12.348677	4	0	0
5	88009.71	59473.5	3198.76	7.5	15	5	0	90	0	1	1	1.3902964
6	90468.274	58358.223	3231.9973	7.5	15	5	0	7.9943306	6.025999	2	0	0
7	90492.431	58323.647	3275.1915	7.5	15	5	0	3.6937889	-0.10771744	5	0	0
7	90476.561	58322.622	3275.2214	22.5	15	5	0	3.6937889	-0.10771744	4	0	0
7	90408.33	58318.214	3275.3503	37.5	15	5	0	3.6937889	-0.10771744	1	0	0
8	90457.963	58296.395	3306.0618	7.5	15	5	0	5.1583007	0.27143273	5	0	0
8	90473.369	58297.785	3306.1351	22.5	15	5	0	5.1583007	0.27143273	5	0	0
8	90484.055	58298.749	3306.1859	37.5	15	5	0	5.1583007	0.27143273	1	0	0
8	90502.781	58300.44	3306.275	52.5	15	5	0	5.1583007	0.27143273	3	0	0
8	90517.719	58301.788	3306.346	67.5	15	5	0	5.1583007	0.27143273	1	0	0
9	90472.056	58336.56	3410	7.5	15	5	0	8.3966203	0	4	0	0
9	90486.895	58338.75	3410	22.5	15	5	0	8.3966203	0	1	0	0
9	90501.733	58340.941	3410	37.5	15	5	0	8.3966203	0	1	0	0
10	90500	58098	3442	7.5	15	9	0	90	0	2	0	0
11	90476.4	58029.194	3500.2411	7.5	15	9	0	9.158046	1.8349687	2	0	0
11	90491.202	58031.58	3500.7213	22.5	15	9	0	9.158046	1.8349687	1	0	0
12	90500.05	58033.01	3501	7.5	15	9	0	90	0	1	0	0
13	90578.791	57994.285	3561	7.5	15	9	0	8.7616126	0	2	0	0
13	90563.966	57992	3561	22.5	15	9	0	8.7616126	0	1	0	0

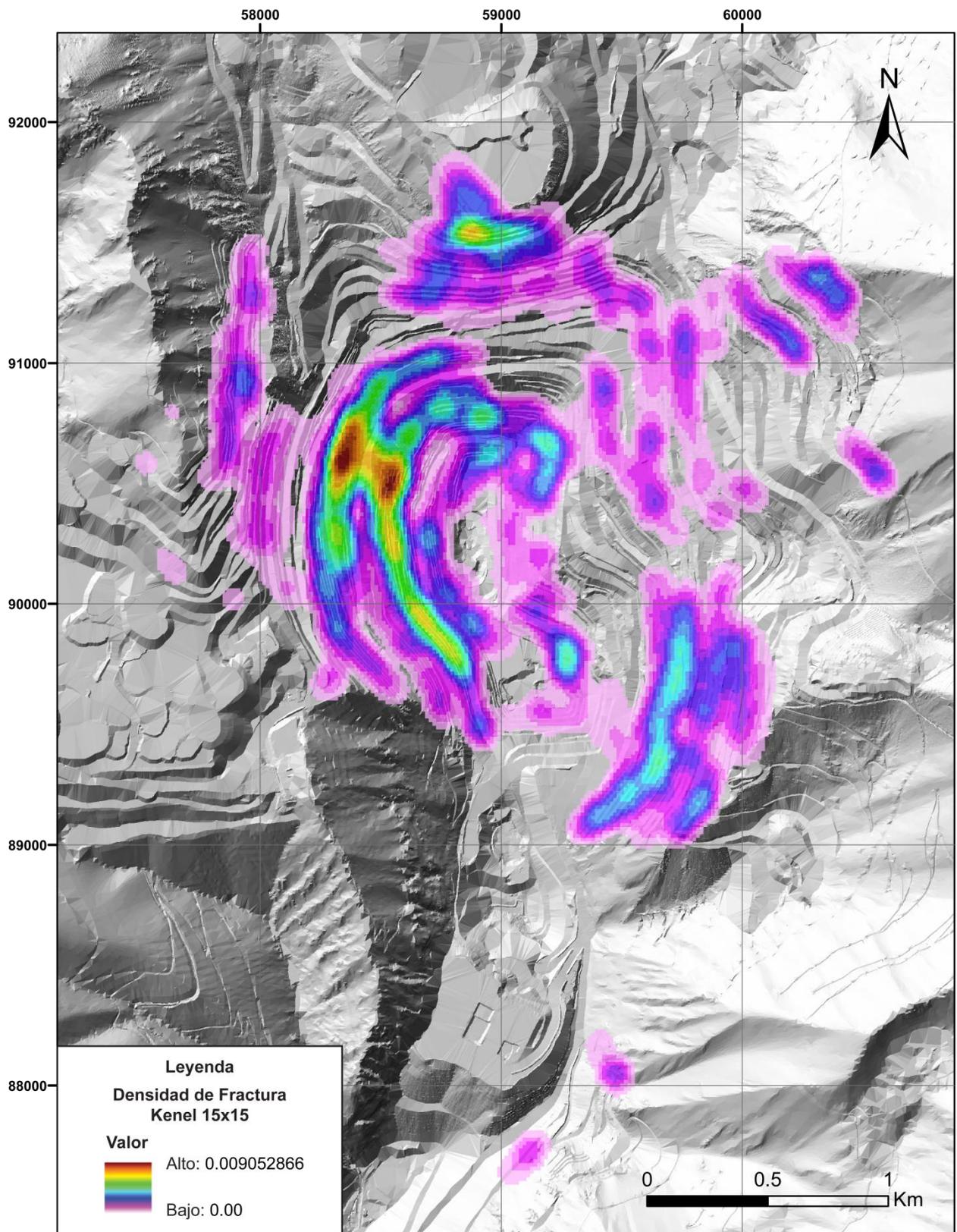
**Tabla 4.3:** Rangos de Dip y Dipdir de cada familia estructural, Dip y Dipdir característico (centroide ponderado) y número de estructuras pertenecientes a cada familia.

Familia	Dip	Dipdir	Dip centroide	Dipdir centroide	N° estructuras
1	21° – 49°	192° – 270°	36°	233°	366
2	40° – 61°	90° – 140°	51°	115°	869
3	30° – 60°	272° – 307°	43°	288°	156
4	34° – 64°	309° – 335°	48°	320°	85

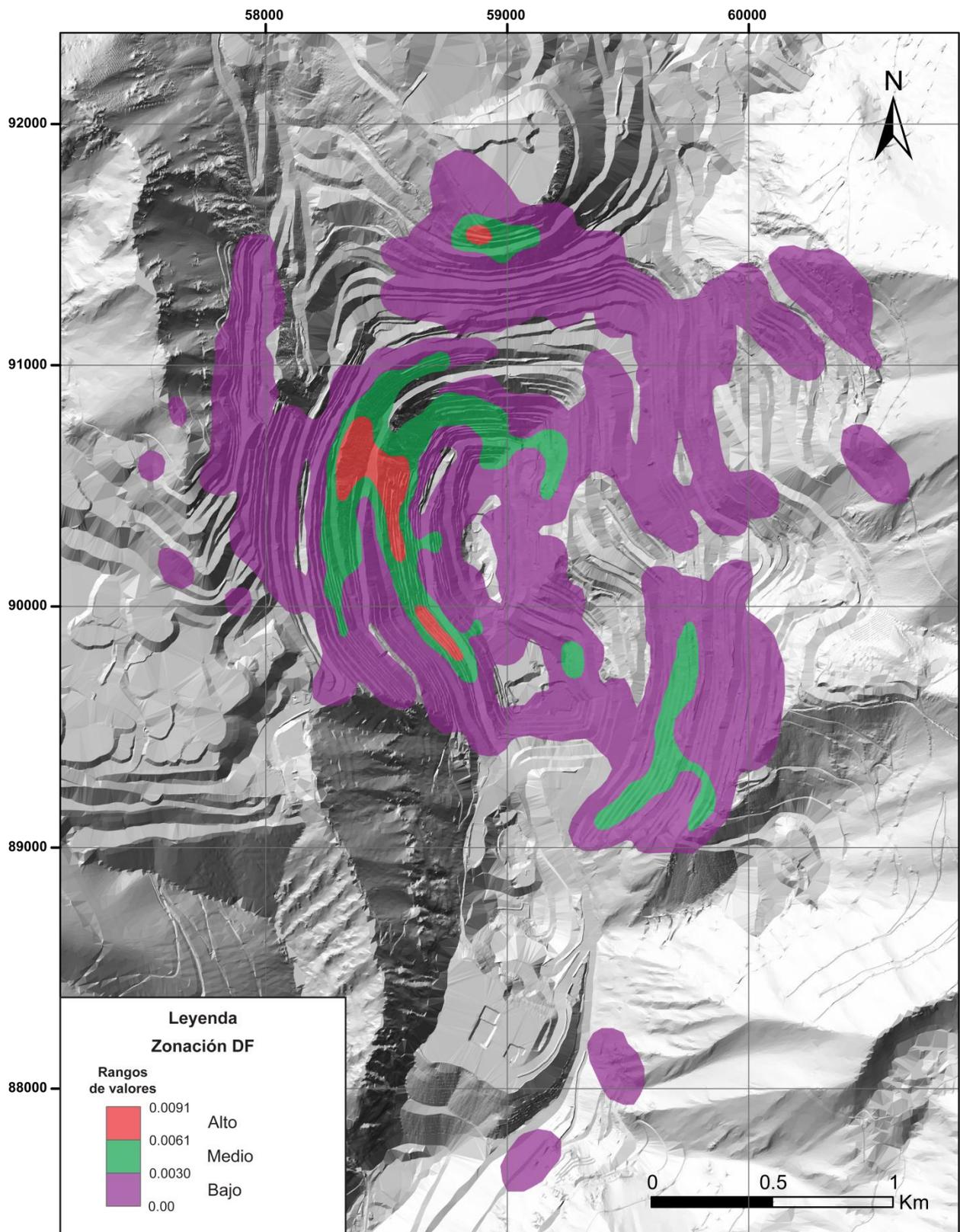
De la Tabla 4.3 se desprende que la familia 2 abarca una mayor cantidad de estructuras, le siguen la familia 1, la familia 3 y finalmente la familia 4. Además se observa que 1476 estructuras pertenecen a una familia, correspondientes al 25% del total de estructuras de la base de datos de Mapeo de Banco. El 75% de las estructuras restantes no pertenece a ninguna familia (Figura 4.6). Esto se debe a que las familias fueron determinadas sobre una base de datos estructural unificada que compila los datos de mapeo de banco, constituida por 5802 datos, y los datos de mapeo de sondaje, constituida por 20229 datos (Carrizo *et al.*, 2013).



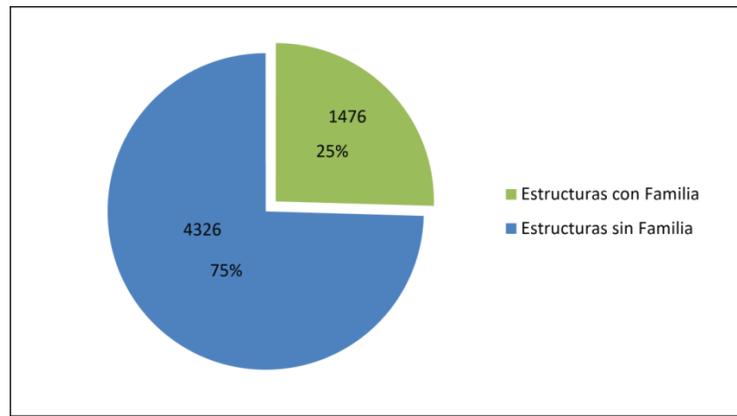
**Figura 4.3:** Distribución espacial de celdas con valores de DF en Los Pelambres. Cada punto representa una celda de 15 m de largo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.



**Figura 4.4:** Distribución espacial de densidad de *kernel* con celda de salida de 15x15 m y radio de búsqueda de 100 m., aplicada a la DF. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.



**Figura 4.5:** Distribución de zonación DF. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.



**Figura 4.6:** Distribución de la base de datos con respecto a las familias estructurales.

A continuación se resumen las principales estadísticas de los resultados de DF real por cada familia estructural en la siguiente tabla:

**Tabla 4.4:** Principales estadísticas de resultados de DF y DF por cada familia estructural.

	<b>DF</b>	<b>Familia 1</b>	<b>Familia 2</b>	<b>Familia 3</b>	<b>Familia 4</b>
<b>DF mínimo</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>DF máximo</b>	9.00	9.95	9.60	7.73	5.27
<b>DF medio</b>	2.26	2.26	2.55	3.04	2.00
<b>N° de celdas</b>	2567	323	690	150	80

De la Tabla 4.4 se desprende que la familia 2 es la que se presenta en una mayor cantidad de celdas, seguido de la familia 1, la familia 3 y finalmente la familia 4. La familia 1 presenta la mayor DF máxima de todas las familias, así como la familia 3 presenta el mayor DF medio de todas las familias.

Al igual que con los datos de DF, a los datos de DF de cada familia estructural (Figura 4.7) se le aplica la herramienta de análisis espacial densidad de *kernel*, con una celda de salida de 15x15 y un radio de búsqueda de 100 m (Figura 4.8). Para la familia 2 se observan las mayores concentraciones de DF en el sector noroeste del rajo y las menores concentraciones de DF en el sector E del rajo (Figura 4.8). Para la familia 1 se observan las mayores concentraciones de DF en el sector este del rajo, mientras que las menores concentraciones de DF se observan en el sector central y este del rajo (Figura 4.8). Para la familia 3 se observan las mayores concentraciones de DF en el sector sureste del rajo y las menores concentraciones de DF se en los sectores norte y

oeste del rajo (Figura 4.8). Para la familia 4 se observan las mayores concentraciones de DF en el sector sureste del rajo (Figura 4.8).

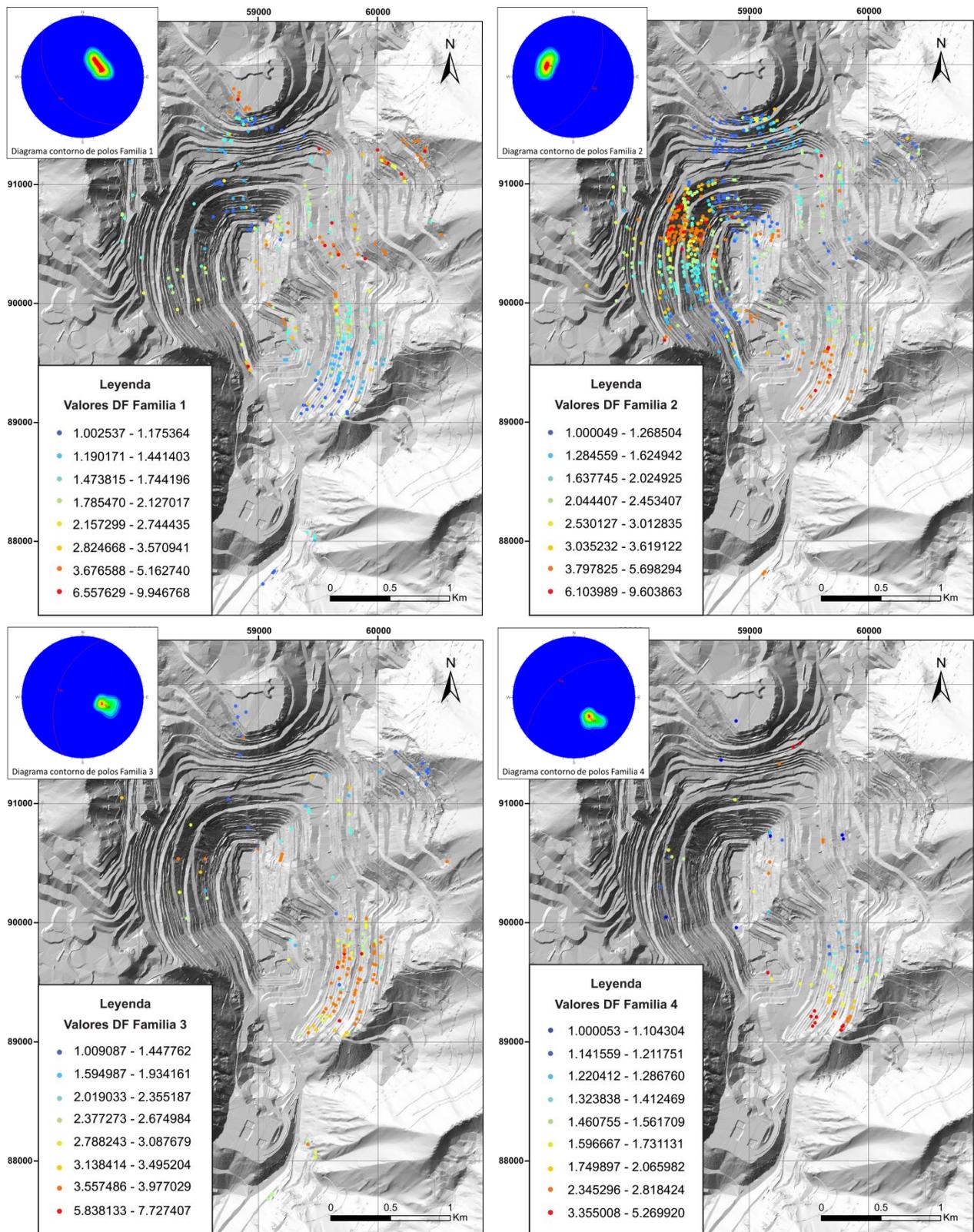
Con el objetivo de clasificar los datos de DF de cada familia estructural cuantitativa y cualitativamente, se zonifican en tres categorías: alta, media y baja, con respecto a los valores de la densidad de *kernel* de la DF de cada familia estructural (Figura 4.9). Para la familia 2 se observa que las zonas con mayores DF se sitúan en el sector noroeste, mientras que las zonas con DF menor se sitúan en el sector norte, sur y oeste (Figura 4.9). Para la familia 1 se observa que las zonas con mayores DF se sitúan en el sector centro este y noroeste del rajo, mientras que las zonas con menor DF se sitúan en el sector central y este del rajo (Figura 4.9). Para la familia 3 se observa que las zonas con mayores DF se sitúan en el sector sureste, mientras que las zonas con menor DF se sitúan en el sector norte y oeste del rajo (Figura 4.9). Para la familia 4 se observa que las zonas con mayores DF se sitúan en el sector sureste, mientras que las zonas con DF menor se sitúan en el sector norte y oeste (Figura 4.9).

### **4.3 Relación entre dominios del Modelo Estructural y el Modelo de Densidad de Fracturas**

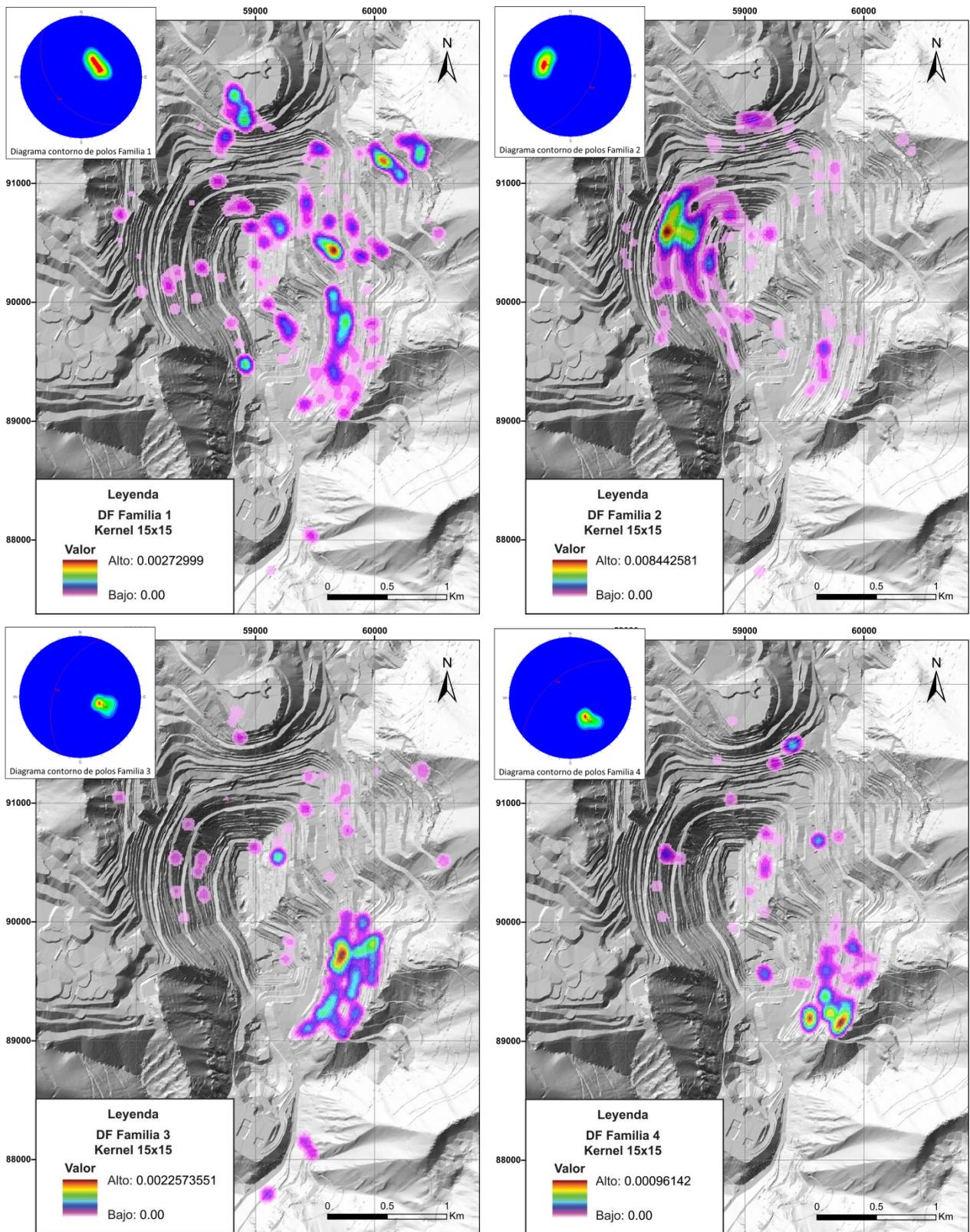
La zonación de Dominios Estructurales del modelo estructural 2014 define seis dominios cuyos límites son estructurales y litológicos. Los dominios son limitados por dos Fallas principales y 3 superficies subverticales asociadas a límites de carácter litológico. (Carrizo *et al.*, 2014) (Figura 4.10).

El Dominio Noroeste se basa en 1040 discontinuidades medidas y se caracteriza por presentar principalmente estructuras de orientación NE-SW con manteos entre  $55^\circ$  y  $70^\circ$  al SE, y en menor medida, estructuras de orientación NWW-SEE con manteos entre  $75^\circ$  y  $85^\circ$  al SW (Figura 4.10).

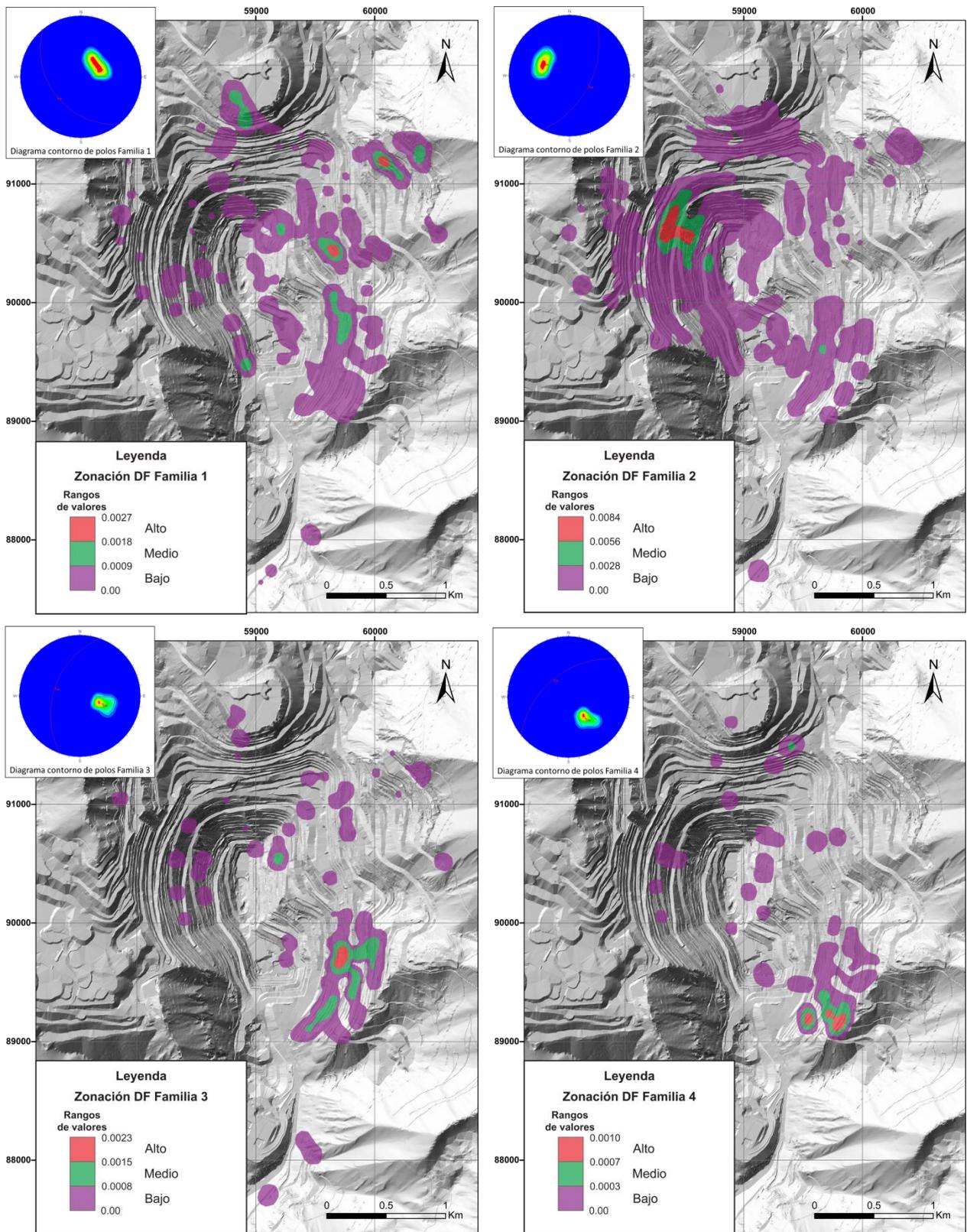
El Dominio Central se basa en 1415 discontinuidades medidas y se caracteriza por presentar principalmente estructuras de orientación NW-SE con manteos entre  $45^\circ$  y  $65^\circ$ , y en menor medida, estructuras de alto ángulo ( $80^\circ$  -  $90^\circ$ ) con orientación NWW-SEE (Figura 4.10).



**Figura 4.7:** Distribución espacial de celdas con valores de la DF por cada familia estructural y sus respectivos diagramas de contorno de polos en Los Pelambres. Cada punto representa una celda de 15 m de largo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.



**Figura 4.8:** Distribución espacial de densidad de *kernel* con celda de salida de 15x15 m y radio de búsqueda de 100 m., aplicada a la DF de cada familia estructural. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.



**Figura 4.9:** Distribución espacial de zonación de la DF por cada familia estructural y sus respectivos diagramas de contorno de polos. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente, la zona de color morado, a DF bajo. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.

El Dominio Noreste se basa en 440 discontinuidades medidas y se caracteriza por presentar principalmente estructuras de orientación NNE-SSW con manteos entre  $55^\circ$  y  $70^\circ$  al SE ,y en menor medida, estructuras con orientación NW-SE con manteos entre  $35^\circ$  y  $55^\circ$  al SW (Figura 4.10).

El Dominio Centro Este se basa en 233 discontinuidades medidas y se caracteriza por presentar principalmente estructuras de orientaciones NW-SE con manteos entre  $35^\circ$  y  $50^\circ$  al SW, y en menor medida, estructuras de rumbo NE-SW manteadando al NW y al SE (Figura 4.10).

El Dominio Sur se basa en 1217 discontinuidades medidas y se caracteriza por presentar un sistema conjugado de estructuras con un ángulo de manto de aproximadamente  $50^\circ$  y rumbo NE-SW. Además se reconoce una familia de estructuras de orientación NW-SE con manteos de alto ángulo ( $80^\circ$  -  $90^\circ$ ) (Figura 4.10).

El Dominio Centro Oeste se basa en 1457 discontinuidades medidas y se caracteriza por presentar principalmente estructuras de orientación NNE-SSW con manteos entre  $40^\circ$  y  $55^\circ$ , y en menor medida, estructuras de orientación NE-SW y NW-SE con manteos entre  $65^\circ$  y  $80^\circ$  al SE y NE respectivamente (Figura 4.10).

En cuanto a la distribución de las familias en los dominios estructurales; la familia 2 está presente en todos los dominios estructurales, la familia 1 se encuentra presente en todos los dominios estructurales con excepción del Dominio Centro Oeste, la familia 3 se encuentra en el Dominio Sur y Dominio Centro Este y la familia 4 está presente solamente en el Dominio Sur (Figura 4.11).

Para la zonación de DF (Figura 4.11) se observa que la zona de DF alta se sitúa principalmente en el dominio Centro Oeste, así como gran parte de la zona de DF media. La zona de DF alta del dominio Central se trunca al sur en el límite entre el dominio Central y el dominio Sur. La zona de DF media oriental del dominio Central tiende a truncarse al sur en el límite entre el dominio Sur y dominio Central. La zona de DF media oriental del dominio Sur tiende a truncarse al norte en el límite entre el dominio Sur y dominio centro este.

Para la zonación de DF familia 2 (Figura 4.12) se observa que la zona de DF está confinada al dominio Centro Oeste, truncándose al norte en el límite con el dominio Noroeste. Además se observa que la mayor parte de la zona de DF media se encuentra en este dominio truncándose al sur en el límite con el dominio Central.

Para la zonación de DF familia 1 (Figura 4.12) se observa que la zona de DF alta se sitúa en la parte norte del dominio Centro Este truncándose al norte con el límite entre el dominio Noreste

y Centro Este, además de ubicarse en la parte norte del dominio Noreste. La zona de DF media se sitúa en los dominios Noroeste, Noreste, Centro Este, Sur y central.

Para la zonación de DF familia 3 (Figura 4.12) se observa que la zona de DF alta se sitúa en la parte nororiental del dominio Sur, muy cercano al límite con el dominio Centro Este. La zona de DF media se ubica principalmente en la parte oriental del dominio Sur y en menor medida en la parte central del dominio Central. Al igual que para la zonación de DF familia 1, no se observa una relación concluyente entre la zonación de DF familia 3 y la zonación de dominios estructurales.

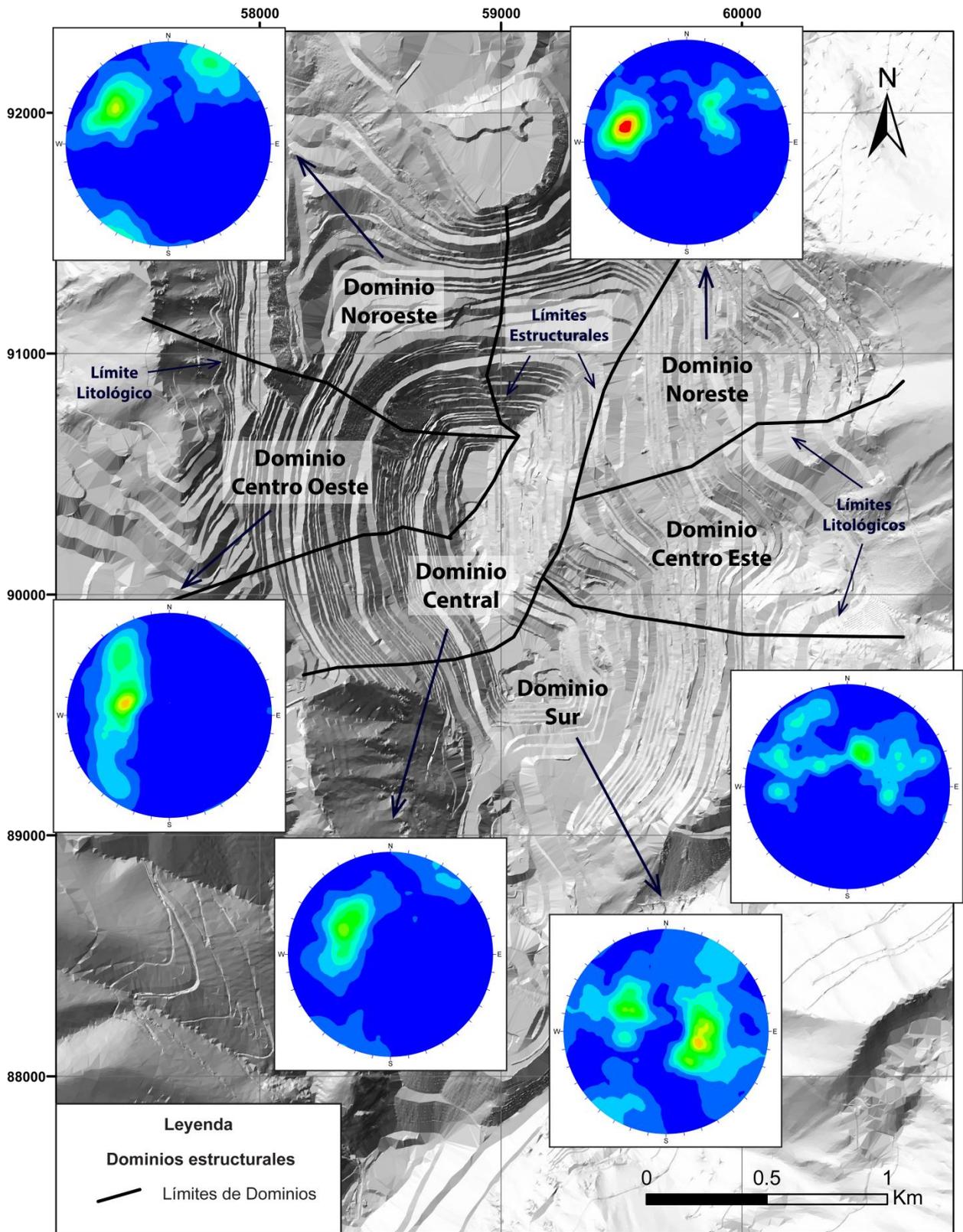
Para la zonación de DF familia 4 (Figura 4.12) se observa que la zona de DF alta está situada en la parte suroriental del dominio Sur al igual que la zona de DF media. Al igual que para la zonación de DF familia 3, no se observa una relación concluyente entre la zonación de DF familia 4 y la zonación de dominios estructurales.

## **4.4 Relación entre Modelo de Densidad de Fractura y geología de Los Pelambres**

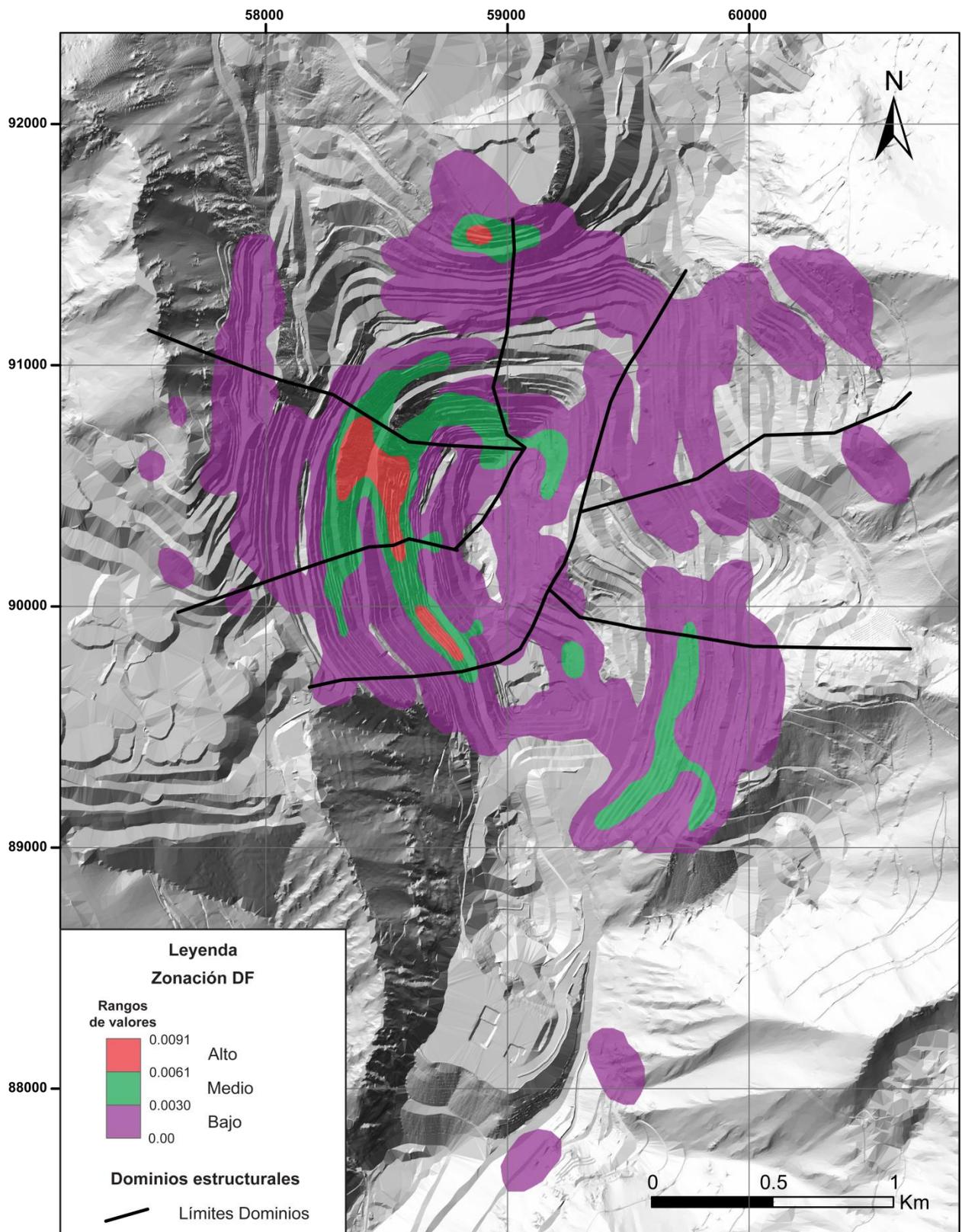
La siguiente correlación espacial se realizó entre Modelo de Densidad de Fractura obtenido en la presente memoria y la geología de Los Pelambres.

### **4.4.1 Geología distrital, lineamientos de arsénico (As) v/s Modelo de Densidad de Fractura**

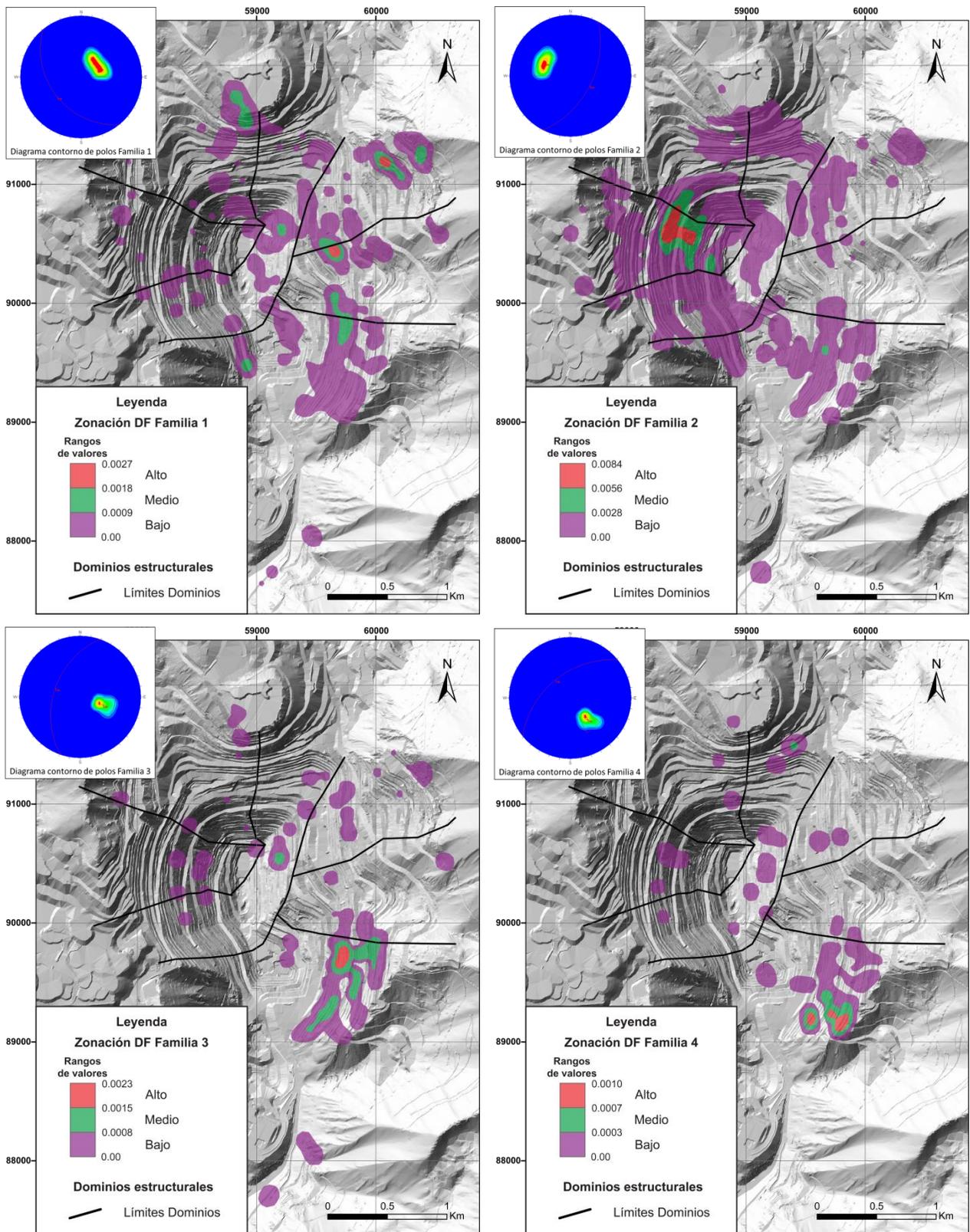
La zona de DF alta se encuentra ubicada principalmente en el Stock Los Pelambres, mientras que al norte se observa que la zona de DF alta se ubica en la Fm. Pachón muy cercana al contacto con el Stock Los Pelambres (Figura 4.13). La zona de DF medio también se encuentra ubicada principalmente en el Stock Los Pelambres y en el sector sureste del rajo se encuentra mayoritariamente en el pórfido B. No se observan DF mayores asociados a los cuerpos de brechas, a los Pórfidos A y B, ni a los bloques de composición andesítica de la Fm Pachón inmersos en el Stock Los Pelambres. No se observa una correspondencia evidente entre litología y zonación de DF.



**Figura 4.10:** Zonación de Dominios estructurales de Los Pelambres (Carrizo *et al.*, 2015) con sus respectivos diagramas de contorno de polos de estructuras: Dominio Noroeste, Dominio Centro Oeste, Dominio Central, Dominio Sur, Dominio Centro Este, Dominio Noreste. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.



**Figura 4.11:** Zonación DF y dominios estructurales. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. Las líneas negras denotan los límites de Dominios estructurales. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.



**Figura 4.12:** Zonación DF por real por familia v/s dominios estructurales. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. Las líneas negras denotan los límites de Dominios estructurales y en gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres.

Lo opuesto ocurre con las estructuras en el distrito de Los Pelambres. La zona de alta DF noroccidental se encuentra truncada al este y al oeste por el sistema de estructuras de rumbo NE, al igual que la zona media de DF de la parte noroeste del rajo (Figura 4.13 y Figura 4.14). En la zona media del rajo se observa este mismo sistema de estructuras NE limitando al sureste las zonas de alta y de media DF (Figura 4.13 y Figura 4.14). En la zona norte del rajo, se observa al sistema de estructuras NE limitando al noroeste la zona de media y de alta DF (Figura 4.13 y Figura 4.14). Además se observa una correspondencia entre la zona de DF alta y las concentraciones de As más occidentales (Figura 4.14).

#### **4.4.2 Alteración v/s Modelo de Densidad de Fractura**

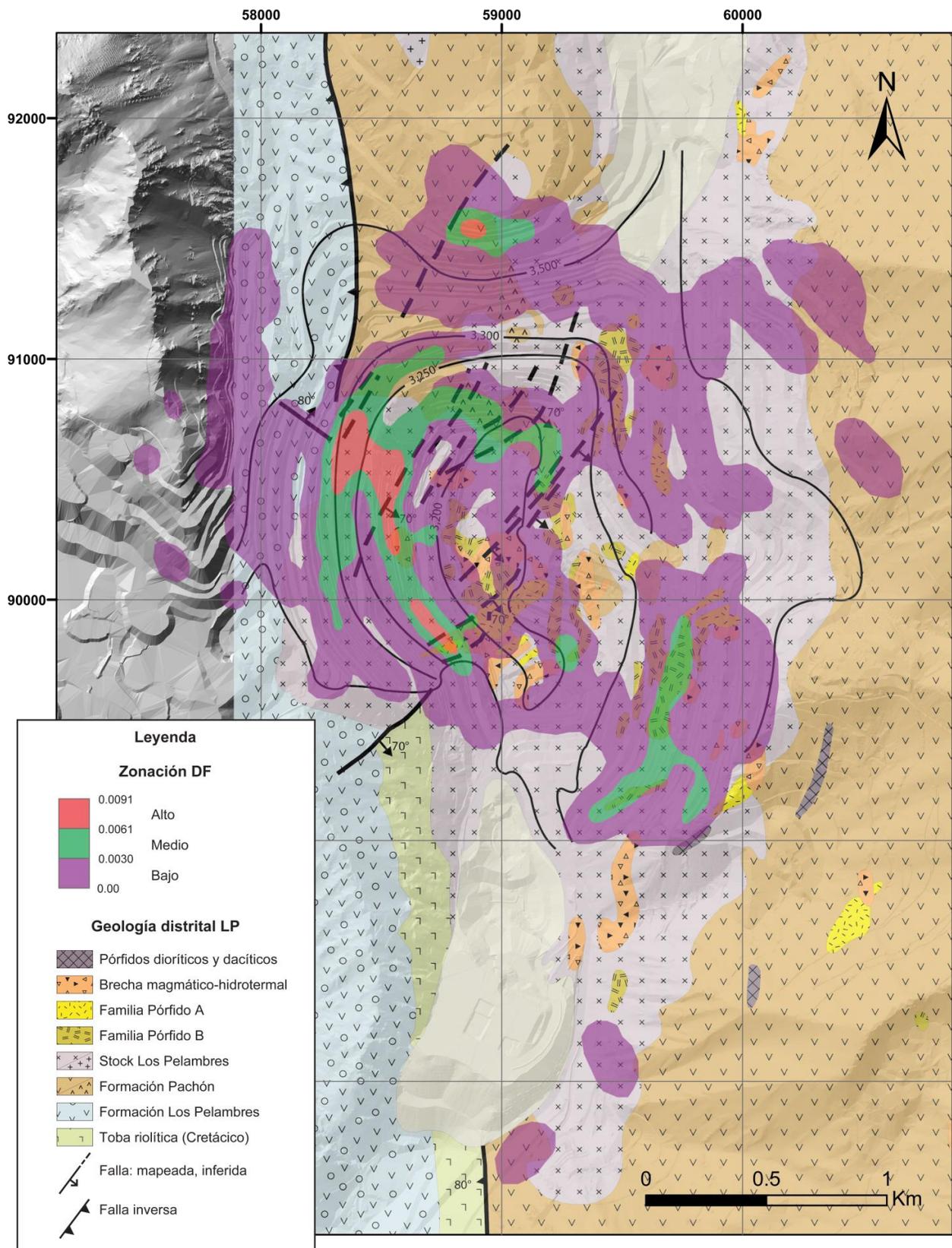
Se observa que la zonas con mayores DF, zona noroeste y norte del rajo, se ubican principalmente en la zona de alteración sericitica (Figura 4.15). Sin embargo y a pesar que la zona de alteración sericitica está estrechamente ligada al corredor estructural de tendencia NE, no se observa una relación concluyente ente la zonación de DF y la zonación alteración hidrotermal.

#### **4.4.3 Cobre (Cu) y Molibdeno (Mo) v/s Modelo de Densidad de Fractura**

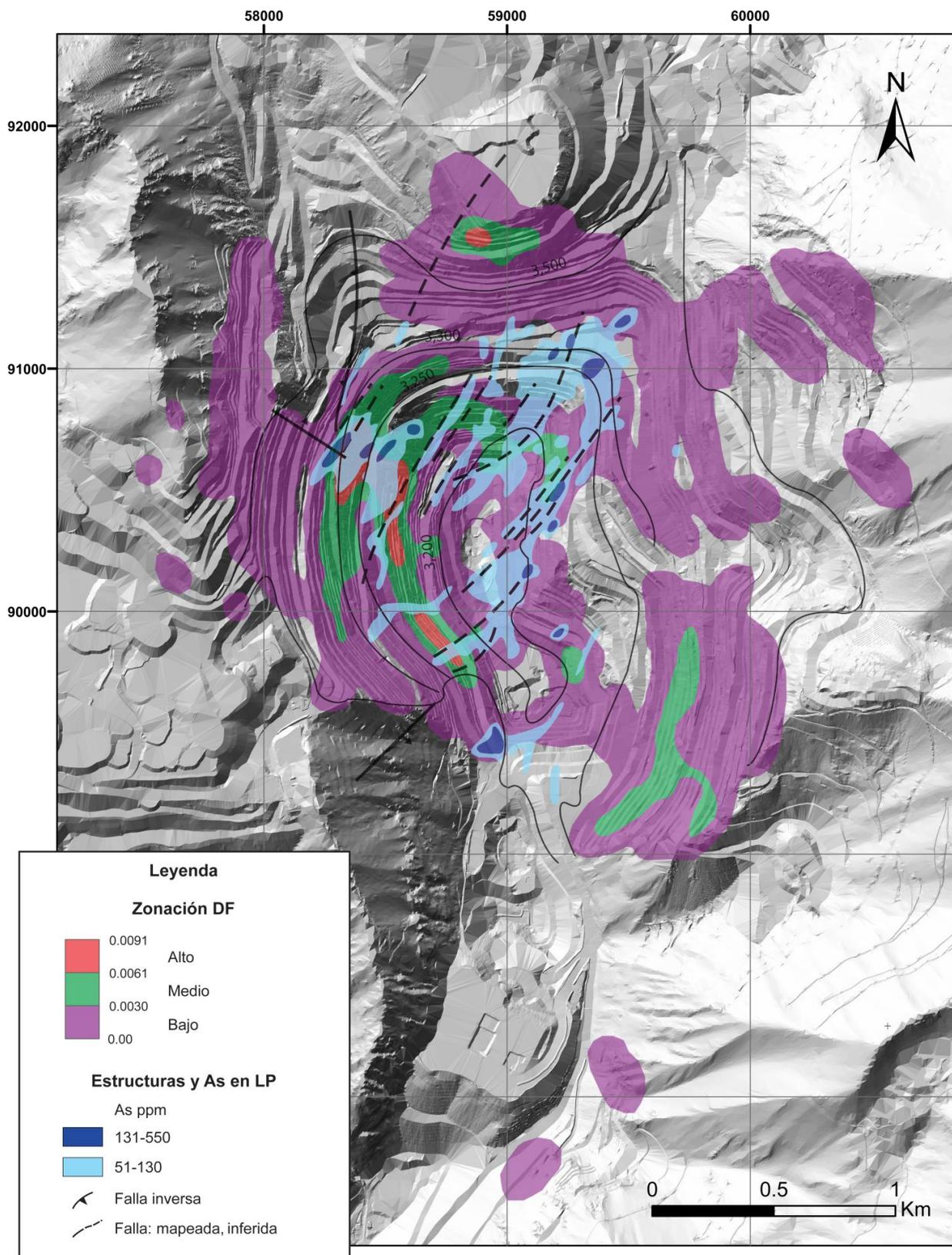
Las zonas con mayores DF se encuentran generalmente en zonas con bajas leyes de cobre (Figura 4.16, a). La misma situación ocurre con las concentraciones de Molibdeno (Figura 4.16, b). No se observa una relación concluyente ente la zonación de DF y las concentraciones de Cobre y Molibdeno, lo que indica que el fracturamiento o permeabilidad secundaria es un evento postmineralización.

#### **4.4.4 Vetillas tipo 4, A y B v/s Modelo de Densidad de Fractura**

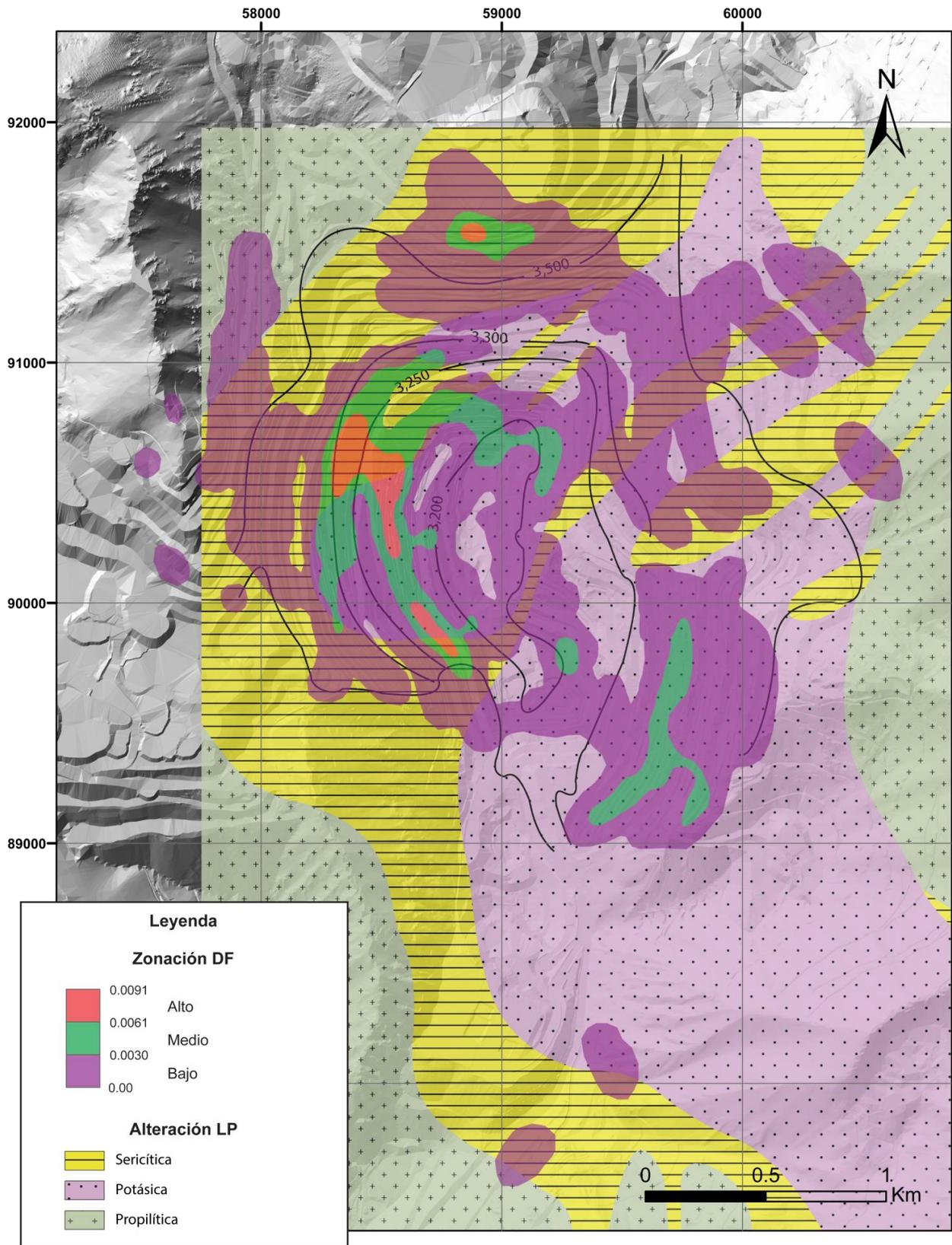
Al igual que con la mineralización de Cobre y Molibdeno, las zonas con mayores DF se encuentran generalmente en zonas con bajas intensidades de vetilleo (Figura 4.17). Por lo tanto, no se observa una relación concluyente ente la zonación de DF y las concentraciones de vetillas tipo 4, A y B. Esto indica que las vetillas tipo 4, A y B corresponden a vetillas cerradas que no participan en la permeabilidad secundaria.



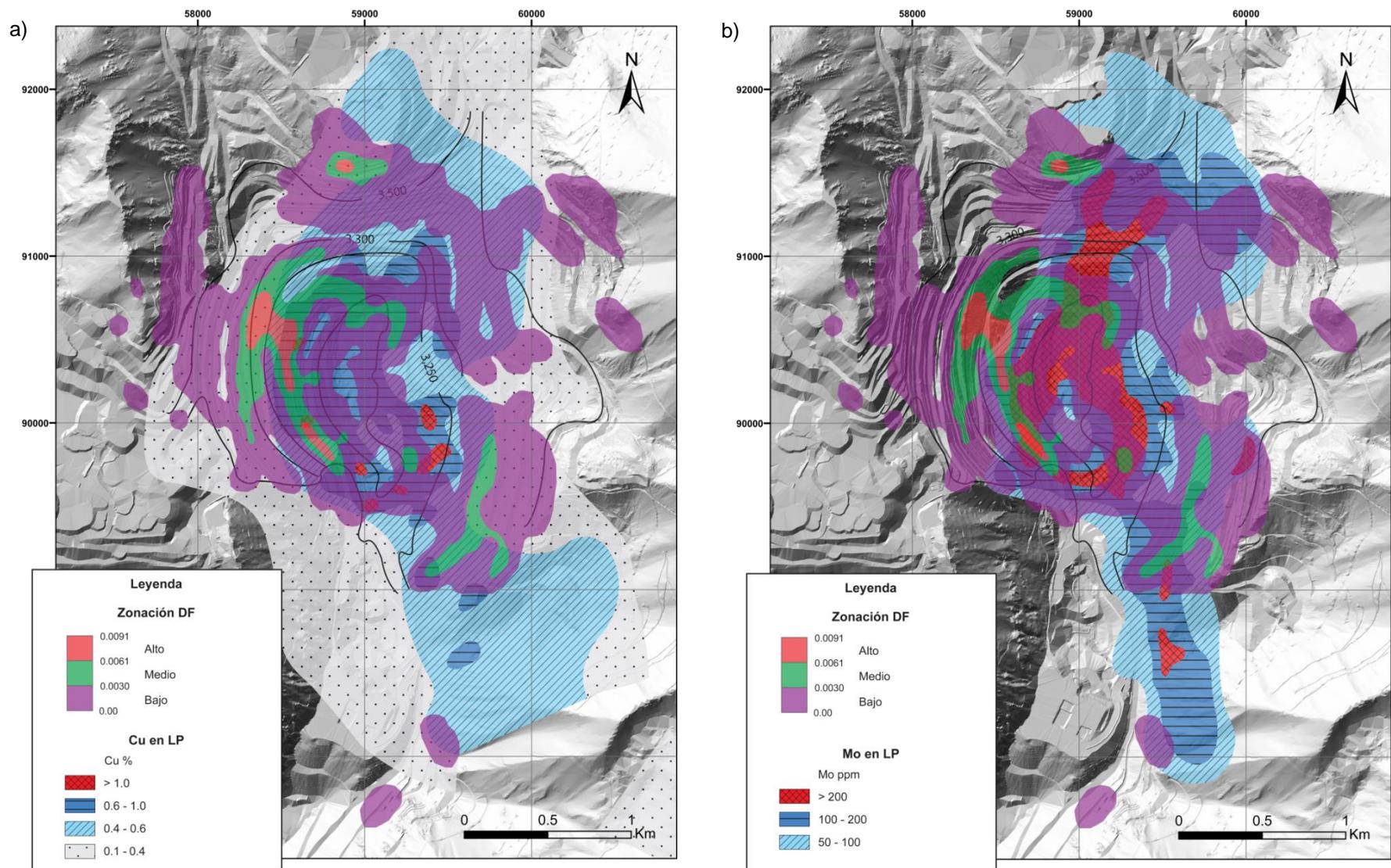
**Figura 4.13:** Zonación de DF v/s geología distrital de Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo



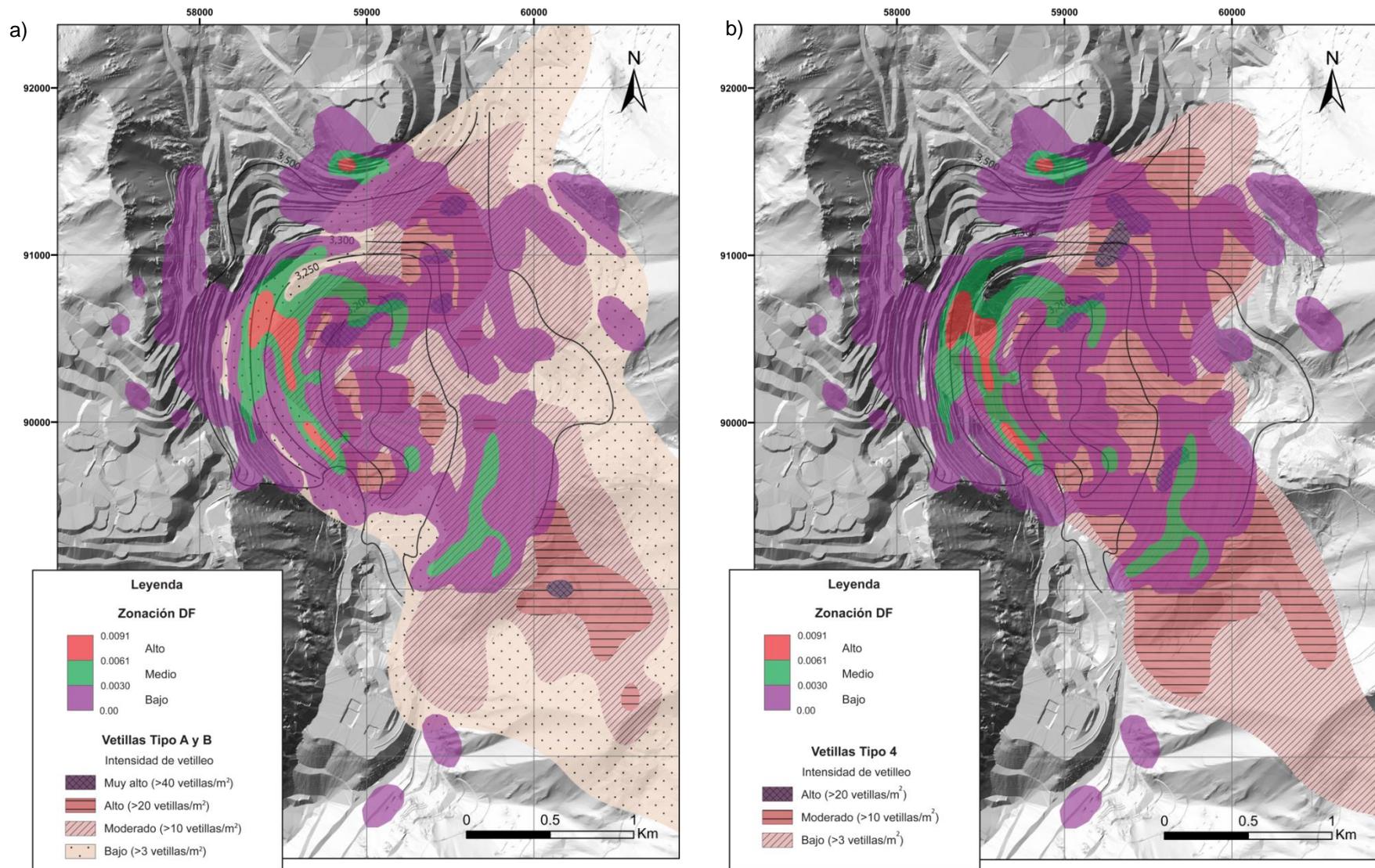
**Figura 4.14:** Concentraciones de arsénico v/s zonación de DF en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. En azul se representan las zonas con concentraciones de As entre 550 y 131 ppm, en celeste se representan las zonas de concentraciones de As entre 130 y 51 ppm, la falla inversa corresponde a la Falla Los Pelambres y las líneas segmentadas corresponden a fallas inferidas (Perelló *et al.*, 2012) en base a los lineamientos de As.



**Figura 4.15:** Zonación de DF v/s zonación de alteración hidrotermal de Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y, finalmente; la zona de color morado, a DF bajo. En cuanto a la alteración hidrotermal, en amarillo se distingue la alteración sericitica, en rosado, la alteración potásica y en verde, la alteración propilítica.



**Figura 4.16:** a) Zonación de DF v/s distribución de Cobre en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado, a DF bajo. En rojo se representan las zonas con concentraciones de Cu mayores al 1%, en azul se representan las zonas con concentraciones de Cu entre 0,6% y 1%, en celeste se representan las zonas con concentraciones de Cu entre 0,4% y 0,6% y en azul se representan las zonas con concentraciones de Cu entre 0,1% y 0,4%. b) Zonación de DF v/s distribución de Mo en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado, a DF bajo. En rojo se representan las zonas con concentraciones de Mo mayores a 200 ppm, en azul se representan las zonas con concentraciones de Mo entre 100 y 200 ppm y en celeste las zonas con concentraciones de Cu entre 50 y 100 ppm.



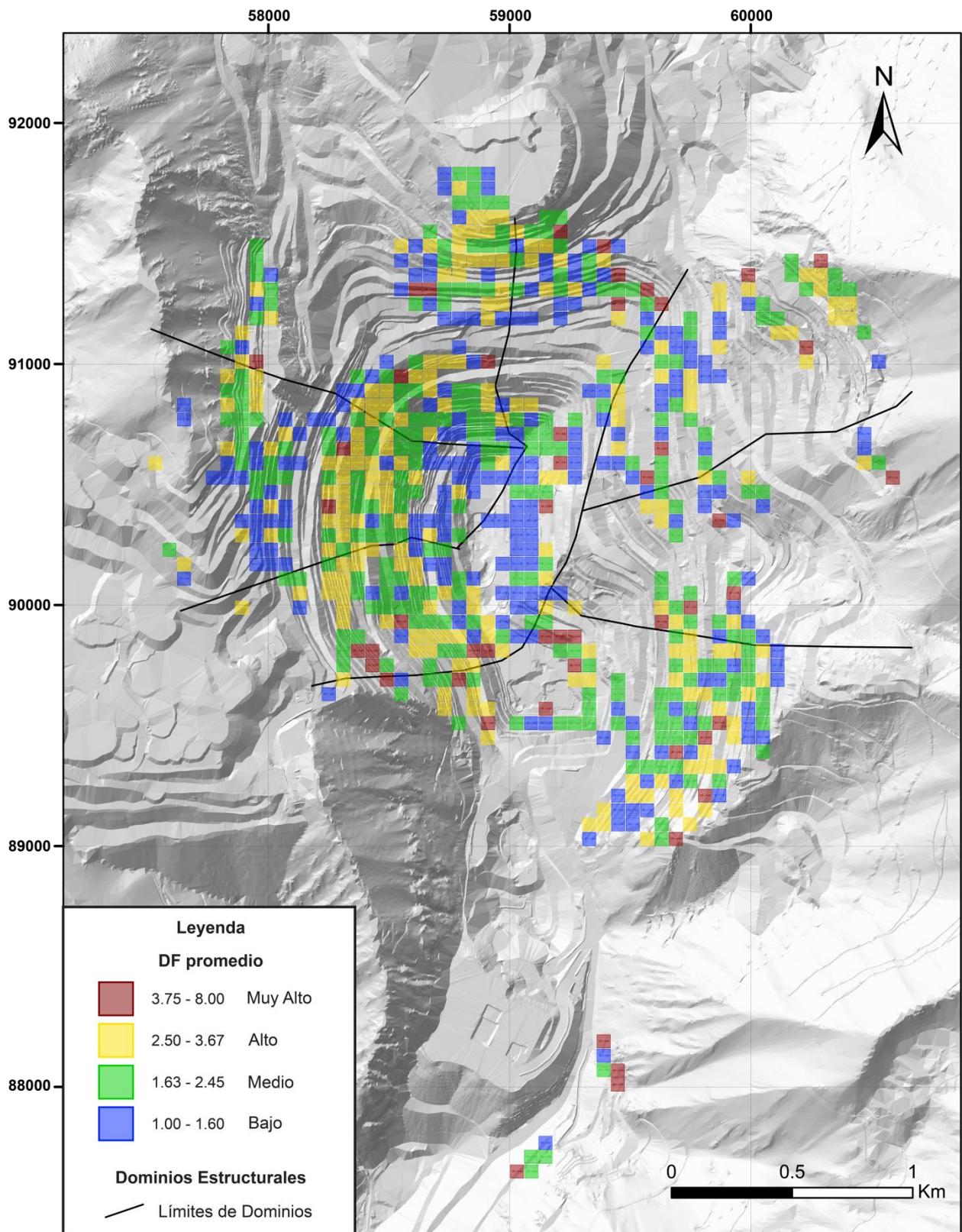
**Figura 4.17:** a) Zonación de DF v/s distribución de vetillas tipo A y B en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado a DF bajo. En morado oscuro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B muy altas, en rosado oscuro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B altas, en rosado se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B moderadas y en rosado claro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo A y B bajas. b) Zonación de DF v/s distribución de vetillas tipo 4 en Los Pelambres. La zona de color rojo corresponde a DF alto; la zona de color verde, a DF medio y la zona de color morado a DF bajo. En morado oscuro se representan las zonas intensidad de vetillas tipo 4 altas, en rosado oscuro se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo 4 moderada y en rosado se representan las zonas con intensidades de vetillas tipo 4 bajas.

## 5 Modelo Unificado

El modelo unificado busca complementar los modelos estructurales de dominios y los modelos geotécnicos de densidad de fracturas, combinando la zonación de dominios estructurales con la variación de la densidad de fracturas. Esto tiene como objetivo entender de mejor manera las heterogeneidades del macizo rocoso; describiendo por una parte la orientación o actitud de las discontinuidades (modelo de dominios) y por otro lado la frecuencia del fracturamiento o permeabilidad secundaria en los macizos (densidad de fracturas).

El modelo unificado de dominios estructurales-densidad de fracturas es construido a partir de un modelo de bloques del parámetro densidad de fractura con una grilla de 60x60 m. Lo anterior es realizado calculando la densidad de fracturas promedio dentro de cada bloque de la grilla. (Figura 2.14). Los bloques de densidad de fractura promedio son clasificados en 4 categorías: bajo, medio, alto y muy alto según el valor de densidad de fractura promedio (Figura 5.1). Los rangos de valores de cada categoría fueron determinados según el método de clasificación de cortes naturales de Jenks.

El modelo de bloques o grilla generado en esta memoria permite demostrar que a pesar que la zonación de dominios es relevante en términos geométricos, la distribución de la cantidad de discontinuidades en los macizos también lo es, mostrando las heterogeneidades dentro de cada dominio estructural. Por lo anterior, es posible evidenciar que para cada dominio, la densidad de fracturas varía notoriamente, lo que permite enriquecer la zonificación de dominios. En particular, el Dominio Central es posible dividirlo en tres zonas con respecto a los valores de la densidad de fractura, siendo la porción central de este dominio una zona de baja densidad de fractura con respecto a su entorno. A su vez, lo anterior es posible correlacionarlo con un control litológico de la DF.



**Figura 5.1:** Modelo unificado de dominios estructurales y modelo de bloques de densidad de fractura (DF). El modelo de bloques se realizó con los datos de DF promedio; los bloques azules corresponden a DF promedio baja, los bloques verdes a DF promedio media, los bloques amarillos a DF promedio alta y los bloques rojos a DF promedio muy alta. En los lugares donde no existen bloques, se carece de datos de DF para ser modelados. En gris se muestra el modelo numérico de relieve sombreado que representa la topografía de alta resolución de la Mina Los Pelambres

## 6 Discusiones

A continuación se discutirán los resultados obtenidos en este trabajo.

### **Limitaciones del modelo de dominios estructurales con respecto a la densidad de fractura**

Los modelos de dominios estructurales presentan limitaciones en la representación de las discontinuidades en los macizos rocosos asociadas a su distribución espacial. Esto se debe a que los modelos de dominios estructurales se construyen a partir del análisis de la distribución espacial de las actitudes de las estructuras (Dip y Dipdir), por lo tanto no es posible determinar la variación de la densidad de fracturas (DF) en el macizo, por esto la estimación de DF se torna un parámetro relevante que permite entender mejor las heterogeneidades en los macizos rocosos. Por otra parte, los modelos geotécnicos de densidad de fracturas determinan la variación de la distribución espacial de este parámetro, pero no consideran la actitud de las estructuras modeladas. Lo anterior expone la necesidad de generar modelos estructurales coherentes que consideren de mejor manera la caracterización de discontinuidades en los macizos rocosos, complementándose con los modelos geotécnicos de densidad de fracturas.

De lo anterior, es posible reconocer que la naturaleza de las discontinuidades de los macizos está controlada tanto por los esfuerzos tectónicos y por ende la naturaleza de la deformación (estilos estructurales), como por la naturaleza reológica de los macizos (dureza y fisibilidad). Ambos aspectos tienen una naturaleza común, por lo cual los modelos estructurales deben tender a poder representar de mejor manera ambos aspectos.

Este trabajo evidencia que la geometría de las estructuras refleja principalmente los estados de esfuerzos responsables de la deformación; sin embargo la densidad de fracturas tiene un control relacionado con la litología a la que afecta.

### **Relaciones entre Modelo de Densidad de Fractura y geología de Los Pelambres**

Existe una relación entre la zonación de densidad de fracturas y el sistema de fracturas de orientación NE evidenciada por la distribución del As, en particular, en la zona NW y N del rajo en donde se presenta la mayor densidad de datos estructurales. Por otro lado, el As se presenta en vetillas tipo D que corresponden a fases tardías de bajas temperaturas del sistema hidrotermal

(Gustafson & Hunt, 1975), por lo tanto, la generación permeabilidad secundaria se relaciona a fases tardías de deformación frágil de Los Pelambres. Probablemente existan más sectores con concentraciones altas de As que se correlacionen con zonas de alta densidad de fracturas, como el sector central y sur del rajo, pero debido a que existe un sesgo producto de la distribución y disponibilidad de datos estructurales esta correlación no se aprecia.

A pesar que Perelló *et al.* (2012) correlaciona el corredor estructural de tendencia NE con la alteración sericítica, no se aprecia una relación evidente entre esta última y la zonación de densidad de fracturas a excepción del sector NW y N del rajo. Según Hoek *et al.* (2000) el tipo de alteración hidrotermal influye en la calidad del macizo rocoso, en particular, la alteración sericítica hace que disminuya significativamente la resistencia de la roca intacta (Hoek *et al.*, 2000) y por lo tanto el macizo adquiere una mayor tendencia a fracturarse y/o fallarse. Pese a lo anterior, no se aprecia una relación evidente entre la alteración sericítica y las zonas con mayor densidad de fracturas a excepción del sector NW y N del rajo. Es probable que esta situación de deba, nuevamente, al sesgo producto de la distribución y disponibilidad de datos estructurales mencionado anteriormente.

Tampoco se logra establecer una relación entre la zonación de densidad de fracturas y la mineralización de Cu y Mo, por lo que se puede deducir que la permeabilidad secundaria asociada a las discontinuidades estudiadas está relacionada con la deformación tardía postmineralización. Lo anterior se corrobora al no observarse una relación entre la zonación de densidad de fracturas y el sistema de vetillas A, B y T4, se puede deducir este tipo de vetillas son de relleno duro (Jcc: fracturas cementadas cerradas) por lo que no participan en la generación de la permeabilidad secundaria.

### **El Modelo Unificado**

El modelo estructural unificado, complementa de manera coherente los modelos estructurales de dominios y los modelos geotécnicos de densidad de fracturas. Muestra de manera conjunta la zonación de dominios estructurales y la variación de densidad de fracturas en el depósito, enmendando la problemática de las limitaciones de los modelos estructurales discutida anteriormente. Como resultado se obtiene un modelo unificado estructural – geotécnico que expone de mejor manera las heterogeneidades en el macizo rocoso del depósito Los Pelambres. De esta manera, la zonación de dominios permite generar un modelo predictivo que describe de

buena manera la geometría de las estructuras; de manera complementaria, la DF complementa la zonación evidenciando zonas de mayor densidad y complejidad locales.

Lo anterior abre un umbral para la construcción y optimización de los modelos estructurales mineros, cuyas implicancias en escala pueden generar optimizaciones relevantes en la ingeniería de tronadura y diseño geomecánico.

### **El modelo estructural unificado y su fundamento geológico**

Considerando en general los antecedentes presentados en esta memoria es posible reconocer los siguientes aspectos estructurales fundamentales que contextualizan el modelo unificado presentado:

- i) El depósito se encuentra emplazado en un sistema de fallas inversas de orientación N-S, que deforman una caja volcánica según pliegues por propagación de fallas.
- ii) No se observan fallas de primer orden en el depósito.
- iii) El emplazamiento de los intrusivos y cuerpos subvolcánicos asociados a la mineralización están geoméricamente controlados por la estructura deformada de la caja volcánica según una orientación N-S a NE-SW.
- iv) La deformación en la roca de caja, visible en el rajo, está relacionada en naturaleza y escala a una deformación tardía, secundaria en la estructura de la caja, controlada en profundidad por el acortamiento EW que gobernó la propagación de las fallas inversas regionales. Lo anterior genera fallas discretas, de orientación preferencial NE-SW, que absorben de manera muy moderada la deformación (espesores pequeños y continuidad anastomosada) y su expresión es en general discreta. Estas estructuras pueden identificarse como sistemas de fracturas anastomosados cuya continuidad es difícil de trazar. Por último ellas son responsables de canalizar los fluidos tardíos (ej. As) y la deformación inducida por la construcción del rajo (sismicidad activa).
- v) La mayor concentración de fracturas está vinculada mayormente a las rocas de caja, en tanto que la disminución de fracturas está ligada espacialmente a las rocas intrusivas.

## 7 Conclusiones y recomendaciones

1. La presente memoria pone evidencia la urgente necesidad de implementar de manera sistemática los parámetros de distribución espacial de fractura en los modelos estructurales.
2. En términos metodológicos, los programas implementados son una herramienta innovadora, novedosa, fácil de utilizar, rápida, independiente y exitosa; se sustenta en una base matemática robusta y bien justificada con un algoritmo fácil de entender. En resumen, debido a las características anteriormente mencionadas, esta herramienta puede contribuir a disminuir los tiempos de generación de modelos de densidad de fractura y mejorarlos cualitativamente, mejorar cuantitativamente los modelos estructurales en un menor tiempo y, por ende, optimizar el desarrollo operacional de la mina.
3. La zonación de DF está estrechamente relacionada con el sistema de fallas discretas, evidenciadas por la distribución As de rumbo NE, correspondientes a fases hidrotermales tardías y de deformación frágil en el depósito Los Pelambres.
4. La geometría de las estructuras está controlada por el estilo estructural asociado a la parte alta de pliegues por propagación intruidos por cuerpos subvolcánicos, generando sistemas de fallas discretas de orientación NE principalmente, con aperturas discretas asociadas a desplazamientos laterales de acomodo, subordinados al acortamiento E-W principal.
5. La densidad de fracturas está controlada mayormente por la litología, siendo los macizos mayormente fracturados aquellos dominados por rocas volcánicas y los menos fracturados por rocas intrusivas.
6. No es posible detectar, en este trabajo, la influencia de la anisotropía vinculada tanto a la alteración de las rocas, como a la mineralización, concluyéndose que la deformación responsable de las discontinuidades estudiadas corresponde a un proceso tardío, posterior a la mineralización.
7. Los resultados del presente estudio están limitados por la distribución de las zonas de levantamiento de datos, sin embargo, fueron tratados con especial cuidado las zonas sin información, no realizando interpolaciones.

## 8 Bibliografía

- Atkinson, W. W., Souvirón, A., Vehrs, T. I., & Faunes G., A. (1996). Geology and Mineral Zoning of the Los Pelambres Porphyry Copper Deposit, Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 5, 131-155.
- Brockway, H., Perelló, J., Posso, H., & East, P. (2008). *Programa exploración Los Pelambres. Informe final*. Inédito.
- Candela, P. (1997). A review of shallow, ore-related granites: Textures, volatiles, and ore metals. *Journal of Petrology*, 38, 1619-1633.
- Carrizo, D., Comte, D., & Moreno, E. (2015). *Modelo Estructural 3D de la Mina Los Pelambres*. Inédito.
- Carrizo, D., Moreno, E., Townley, B., & Comte, D. (2013). *Modelo Estructural 3D de la Mina Los Pelambres: Avance - Dominios Estructurales - HITO 2: MELP251113*. Inédito.
- Carrizo, D., Moreno, E., Townley, B., & Comte, D. (2013). *Modelo Estructural 3D de la Mina Los Pelambres: Validación/diagnóstico de la base de datos Avance compilación de datos distritales - HITO 1: MELP081013*. Inédito.
- Carrizo, D., Moreno, E., Townley, B., & Comte, D. (2014). *Modelo estructural 3D de la Mina Los Pelmbres*. Informe de avance.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effects on recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimate of current plate motions. *Geophysical research letters*, 21(20), 2191-2194.
- Gustafson, L., & Hunt, J. (1975). The porphyry copper at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70, 857-912.

- Hoeck, E., Read, J., Karzulovic, A., & Chen, Z. (2000). Rock slopes in civil and mining engineering. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, 19-24.
- Lowell, J., & Guilbert, J. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65, 373-408.
- Maksaev, V. (2001). *Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina*.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., & Camus, F. (2007). Metallic ore deposits. En *The Geology of Chile* (págs. 179-199).
- Pardo-Casas, F., & Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since late Cretaceous time. *Tectonics*, 6, 233-248.
- Peña, D. (2002). Componentes principales. En D. Peña, *Análisis de datos multivariantes* (1 ed., págs. 133-170).
- Perelló, J., Sillitoe, R. H., Mpodozis, C., Brockway, H., & 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*, 16, 55-104.
- Sillitoe, R. H. (1973). Geology of the Los Pelambres Porphyry Copper Deposit, Chile. *Economic Geology*, 68, 1-10.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3-41.
- Silverman, B. (1986). Density Estimation for Statistics and Data Analysis. *Monographs on Statistics and Applied Probability*, London: Chapman and Hall.

Somoza, R., & Zaffarana, C. (2008). Mid-Cretaceous polar standstill of South America, motion of the Atlantic hotspots and the birth of the Andean Cordillera. *Earth and Planetary Science Letters*, 271, 267-277.

Zhang, L. (2006). Rock discontinuities. En L. Zhang, *Engineering Properties of Rocks* (págs. 53-97).