



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



# GEOLOGÍA Y MODELAMIENTO DEL SECTOR CARMEN ESTE, DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

**Benjamín Moreno Bizama**

**Profesor Patrocinante:** MSc. Abraham Elías González Martínez  
**Profesional Guía:** Sr. Alejandro Maldonado Maldonado  
**Profesores Comisión:** MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez  
Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Concepción, 2023



# ÍNDICE

	Página
<b>Resumen</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Generalidades</b> .....	1
<b>1.2. Objetivos, alcances y limitaciones</b> .....	1
1.2.1. Objetivo general .....	1
1.2.2. Objetivos específicos .....	1
1.2.3. Alcances .....	1
1.2.4. Limitaciones .....	2
<b>1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS</b> .....	2
<b>1.4. Metodología de trabajo</b> .....	4
1.4.1. Etapa de gabinete .....	4
1.4.2. Etapa de terreno .....	4
<b>1.5. Trabajos anteriores</b> .....	4
<b>1.6. Agradecimientos</b> .....	6
<b>2. GEOLOGÍA REGIONAL</b> .....	7
<b>2.1. Geología Estructural</b> .....	8
<b>2.2. Rocas Metamórficas</b> .....	9
<b>2.2.1. Carbonífero superior-Pérmico inferior</b> .....	9
2.2.1.1. Complejo Metamórfico Limón Verde (CPmlv) .....	9
<b>2.3. Rocas Intrusivas</b> .....	9
<b>2.3.1. Carbonífero superior-Pérmico</b> .....	9
2.3.1.1. Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (CPch) .....	9
<b>2.3.2. Triásico</b> .....	10
2.3.2.1. Complejo Intrusivo Elena (Tre) .....	10
<b>2.3.3. Cretácico-Paleoceno inferior</b> .....	11
2.3.3.1. Intrusivos hipabisales (KPh) .....	11
<b>2.3.4. Eoceno-Oligoceno inferior bajo</b> .....	11
2.3.4.1. Complejo Monzodiorítico-Monzonítico Los Picos (Elp) .....	11
2.3.4.2. Complejo Granodiorítico Fortuna (Ef) .....	12
2.3.4.3. Complejo Intrusivo Chuquicamata (EOch) .....	12
2.3.4.4. Complejo Intrusivo Ministro Hales (EOMh) .....	13
<b>2.4. Rocas Estratificadas</b> .....	13
<b>2.4.1. Carbonífero superior-Pérmico inferior</b> .....	13
2.4.1.1. Formación Collahuasi (CPC) .....	13
<b>2.4.2. Triásico</b> .....	14
2.4.2.1. Formación Quetena (Trq) .....	14
2.4.2.2. Formación Tuina (Trt) .....	14
<b>2.4.3. Jurásico</b> .....	15
2.4.3.1. Formación Moctezuma (Jimm) .....	15

2.4.3.2. Formación Cerritos Bayos (Jscb) .....	15
<b>2.4.4. Cretácico-Paleoceno inferior</b> .....	16
2.4.4.1. Formación Quebrada Mala (KPqm) .....	16
<b>2.4.5. Eoceno-Oligoceno inferior bajo</b> .....	16
2.4.5.1. Formación Icanche (Ei) .....	16
<b>2.4.6. Oligoceno inferior alto-Plioceno</b> .....	17
2.4.6.1. Formación Calama (Omc) .....	17
2.4.6.2. Formación Opache (MPo) .....	17
<b>2.4.7. Pleistoceno-Holoceno</b> .....	18
<b>3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO RADOMIRO TOMIC</b> .....	19
<b>3.1. Estructuras</b> .....	19
<b>3.1.1. Sistemas estructurales</b> .....	19
3.1.1.1. Sistema Kala .....	19
3.1.1.2. Sistema Ckaari .....	19
3.1.1.3. Sistema Kalatche .....	20
3.1.1.4. Sistema Corina .....	21
<b>3.2. Litología</b> .....	21
<b>3.2.1. Andesitas y metasedimentos (AND)</b> .....	21
<b>3.2.2. Granodiorita Elena (GDE)</b> .....	21
<b>3.2.3. Granodiorita Fortuna (GDF)</b> .....	22
<b>3.2.4. Complejo Intrusivo Chuquicamata (CPch)</b> .....	22
3.2.4.1. Pórfido Este (PFE) .....	22
3.2.4.2. Pórfido Fino (PFF) .....	22
3.2.4.3. Pórfido Oeste (PFW) .....	23
3.2.4.4. Pórfido Banco (PFB) .....	23
<b>3.2.5. Gravas (GRA)</b> .....	23
<b>3.3. Alteraciones y Mineralización</b> .....	24
<b>3.3.1. Mineralización hipógena</b> .....	24
3.3.1.1. Evento Tardimagmático .....	24
3.3.1.2. Evento Hidrotermal Temprano .....	25
3.3.1.3. Evento Hidrotermal Principal .....	26
3.3.1.4. Evento Hidrotermal Tardío .....	27
<b>3.3.2. Mineralización supérgena</b> .....	27
3.3.2.1. Zona Lixiviada .....	27
3.3.2.2. Zona Oxidada .....	28
3.3.2.3. Zona Mixta .....	28
3.3.2.4. Zona de Enriquecimiento .....	28
<b>3.4. Zonas Minerales</b> .....	28
<b>4. GEOLOGÍA DE CARMEN ESTE</b> .....	32
<b>4.1. Alteración</b> .....	32
<b>4.1.1. Alteración tipo skarn</b> .....	32

<b>5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b> .....	37
<b>5.1. Revisión de base de datos</b> .....	37
<b>5.2. Confección de base de datos</b> .....	37
<b>5.3. Análisis exploratorio de datos</b> .....	37
5.3.1. Localización de valores atípicos (outliers) .....	37
5.3.2. Estadígrafos básicos .....	39
5.3.3. Gráficos circulares .....	40
5.3.4. Gráficos de barras .....	41
5.3.5. Histogramas .....	42
<b>5.4. Análisis de deriva</b> .....	43
5.4.1. Análisis general .....	43
<b>5.5. Análisis de contacto</b> .....	46
<b>6. MODELO GEOLÓGICO DE CARMEN ESTE</b> .....	50
<b>6.1. Modelamiento implícito</b> .....	50
<b>6.2. Tipos de contactos</b> .....	50
6.2.1. Depósito .....	50
6.2.2. Contacto erosivo .....	50
6.2.3. Intrusión .....	51
<b>6.3. Dimensión</b> .....	51
<b>6.4. Base de datos</b> .....	52
6.4.1. Cantidad de sondajes .....	52
<b>6.5. Modelo litológico</b> .....	52
6.5.1. Contacto PFE-GDE .....	53
6.5.2. Pórfido Fino (PFF) .....	54
6.5.3. Pórfido Oeste (PFO) .....	55
6.5.4. Pórfido Banco (PFB) .....	56
6.5.5. Andesitas (AND) .....	57
6.5.3. Gravas (GR) .....	60
<b>6.6. Modelo de Zona Mineral</b> .....	62
6.6.1. Contacto Lixiviados-Primarios .....	63
6.6.1.1. Contacto LX-OX – OX .....	63
6.6.2. Primarios .....	65
6.6.2.1. Contacto CPY – EST-PPY .....	65
6.6.3. Sulfuros .....	66
6.6.4. Gravas .....	68
<b>6.7. Modelo de alteración</b> .....	70
6.7.1. Argílica Supérgena (AS) .....	70
6.7.2. Clorítica Marginal (CLM) .....	71
6.7.3. Early Dark Micaceous (EDM) .....	72
6.7.4. Potásica de Fondo (PF) .....	72
6.7.5. Sericita Selectiva (SS) .....	73
<b>6.8. Distribución del cobre</b> .....	74
6.8.1. Controles del Cu .....	76

<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	78
<b>8. REFERENCIAS</b> .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1. 1	Ubicación y accesos Mina Radomiro Tomic .....	3
2. 1	Mapa geológico del sector norte de Calama y Distrito Norte de CODELCO .....	7
3. 1	Esquema de los principales sistemas y estructuras del norte de Chuquicamata y rajo Radomiro Tomic .....	20
4. 1	Skarn de magnetita .....	33
4. 2	Skarn .....	34
4. 3	Skarn de granate .....	35
4. 4	Skarn de magnetita .....	36
5. 1	Localización de los valores atípicos para las litologías principales presentes en el área de estudio .....	39
5. 2	Gráficas circulares .....	41
5. 3	Gráfico de barras de CuT% y CuS% por litología .....	42
5. 4	Histogramas para las principales litologías del área de estudio .....	43
5. 5	Análisis general de deriva en la coordenada X (este) para el área de estudio .....	44
5. 6	Análisis general de deriva en la coordenada Y (norte) para el área de estudio .....	45
5. 7	Sección transversal en coordenada Y=6680 .....	45
5. 8	Análisis general de deriva en la coordenada Z (profundidad) para el área de estudio .....	46
5. 9	Perfil de contacto entre Andesitas y Granodiorita Elena .....	47
5. 10	Perfil de contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena .....	48
5. 11	Zona de contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena en coordenada Y=6504 .....	48
5. 12	Perfil de contacto entre Pórfido Este y Andesitas .....	49
5. 13	Zona de contacto entre Pórfido Este y Andesitas en coordenada Y=6706. ....	49
6. 1	Box de trabajo .....	51
6. 2	Columna de litologías agrupadas .....	53
6. 3	Creación de contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena .....	54
6. 4	Contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena .....	54
6. 5	Contactos Pórfido Fino .....	55
6. 6	Contactos Pórfido Oeste .....	56
6. 7	Contactos Pórfido Banco .....	56
6. 8	Creación contacto oeste entre Andesitas y Granodiorita Elena .....	57
6. 9	Contacto entre Andesitas y Granodiorita Elena en Leapfrog Geo .....	58
6. 10	Creación de contacto este entre Andesitas y Granodiorita Elena .....	58
6. 11	Modelo de Andesitas .....	59
6. 12	Contactos litología Gravas .....	59
6. 13	Modelo final de Litología .....	60
6. 14	Columna de Zonas Minerales agrupadas .....	61
6. 15	Contacto Lixiviados-Primarios .....	62
6. 16	Contactos Zona Mineral LX-OX .....	62
6. 17	Contactos Zona Mineral OX .....	63

6.	18	Sólidos LX-OX y OX .....	63
6.	19	Creación de contactos entre CPY y EST-PPY .....	64
6.	20	Modelo Primarios .....	65
6.	21	Creación contactos Sulfuros .....	66
6.	22	Sólidos de Sulfuros .....	66
6.	23	Modelo de Zona Mineral Gravas .....	67
6.	24	Modelo de Zona Mineral .....	67
6.	25	Gráfico de alteración predominante en porcentaje .....	68
6.	26	Alteración Argílica Supérgena .....	69
6.	27	Contactos Alteración Clorítica Marginal .....	69
6.	28	Contactos Alteración Early Dark Micaceous .....	70
6.	29	Contactos Alteración Potásica de Fondo .....	71
6.	30	Contactos Alteración Sericita Selectiva .....	71
6.	31	Modelo de Alteración .....	72
6.	32	Modelo de distribución de Cu .....	73
6.	33	Sección 6300N de modelo de Cu .....	74
6.	34	Control estructural de Cu .....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1.	1 Resumen de las zonas minerales presentes en Radomiro Tomic con sus definiciones .....	31
2.	1 Valores atípicos para las principales litologías .....	38
3.	1 Estadígrafos básicos .....	40
4.	1 Límites del box de trabajo en coordenadas locales .....	51
5.	1 Cantidad de sondajes clasificados según el tipo de información que contienen	52

## Resumen

El presente trabajo consiste en la elaboración de un modelo geológico, considerando zonas minerales, litología y alteraciones, del sector Carmen Este de la División Radomiro Tomic, ubicada en el Desierto de Atacama en la Provincia El Loa, región de Antofagasta, a 40 km al NE de la ciudad de Calama, además de obtener información acerca de la alteración tipo skarn presente en el sector. El yacimiento Radomiro Tomic es un depósito tipo pórfido cuprífero que se emplaza en el segmento norte de la Cordillera de Domeyko durante el Eoceno superior-Oligoceno inferior (35 Ma) asociado a la intrusión del Complejo Intrusivo Chuquicamata. Está flanqueado por dos fallas de escala regional, la falla Oeste y la falla Mesabi. A nivel local, está dominado por estructuras mayores de orientación norte sur, las fallas Kala y Ckaari, las cuales forman sistemas estructurales conjugados NE-SW y NW-SE correspondientes a los sistemas Kalatche y Corina respectivamente. El sector Carmen Este se ubica en el extremo sureste del rajo Radomiro Tomic, cercano al rajo Chuquicamata, en donde afloran rocas del Complejo Intrusivo Chuquicamata al oeste, la Granodiorita Elena al este y la Formación Tuina al centro, de elongación norte sur, la cual se encuentra como *roof pendant* entre las fallas principales Mesabi de rumbo NNE y Estanque Blancos de rumbo NE. En este trabajo se utilizó la base de datos facilitada por el área de modelamiento actualizada a la fecha 17 de enero de 2023 contemplando 42 sondajes con 12.926 metros de perforación, la cual fue tratada previamente a ser utilizada mediante una depuración para descartar datos sin información geológica para los distintos modelos. Posterior a la depuración se realizó un análisis exploratorio de datos mediante los softwares Microsoft Excel, Minitab y Maptek Vulcan para obtener una estadística de ellos. Los modelos 3D correspondientes a Alteración, Litología y Zona Mineral se elaboraron mediante el software Leapfrog Geo. Se revisaron sondajes históricos, cortes transparentes y pulidos para obtener información acerca de la alteración tipo skarn en donde hay presencia de granates tipo andradita y grosularia, además de hematita y magnetita. El control de la mineralización es mediante estructuras NW-SE, las cuales definen el emplazamiento de las zonas minerales de mayor ley, como los oxidados en superficie y la zona de calcopirita en profundidad.

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. GENERALIDADES**

Este trabajo surge de la necesidad de obtener más información acerca del sector Carmen Este, su alteración tipo skarn y su mineralización, además de generar un modelo geológico que abarque las variables de alteración, zona mineral y litología. Se desarrolla en las instalaciones de la Gerencia de Recursos Minerales y Desarrollo, financiado por la División Radomiro Tomic, CODELCO.

## **1.2. OBJETIVOS, ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.2.1. Objetivo general**

Generar un modelo que permita conocer la distribución y leyes de Cu en el sector Carmen Este a partir de información de sondajes.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Conocer la geología de Carmen Este.
- Describir estructuras, litologías, alteraciones y mineralización del sector Carmen Este.
- Elaboración de base de datos para el modelo geológico.
- Conocer los controles geológicos para el cobre.
- Elaborar un modelo geológico del sector Carmen Este.
- Conocer la relevancia de la alteración tipo skarn.

### **1.2.3. Alcances**

El presente trabajo tiene los siguientes alcances:

- Conocer los controles del cobre en el sector.

-Generar modelos en tres dimensiones del sector.

#### **1.2.4. Limitaciones**

-Información limitada en cuanto a cantidad de sondajes, sobretodo en la zona de la alteración tipo skarn.

-Pistolas de fluorescencia de rayos X no estaban operativas al momento de la realización del trabajo.

-Por temas de contagio de COVID 19 hubo dos semanas sin poder subir a faena.

### **1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS**

El Yacimiento Radomiro Tomic está ubicado en el Desierto de Atacama en la Provincia El Loa, región de Antofagasta, a 40 km al NE de la ciudad de Calama y a 1.670 km de la ciudad de Santiago, en el sector septentrional de la Cordillera de Domeyko, a una altura aproximada de 3.000 m s.n.m (Figura 1.1). Sus coordenadas UTM WGS84 19S son: 7.536.000-7.550.000 S y 508.000-519.600 E. Las coordenadas locales son: 5.900-19.000 N y 500-11.400E, que corresponden a una codificación de las coordenadas reales.

El acceso al yacimiento desde Calama es por la ruta 21, situada en la salida NE de Calama, por la que se sigue 5 km y virar hacia el norte por la Ruta Radomiro Tomic y seguir unos 35 km por dicha ruta, la cual se encuentra pavimentada y en buenas condiciones.

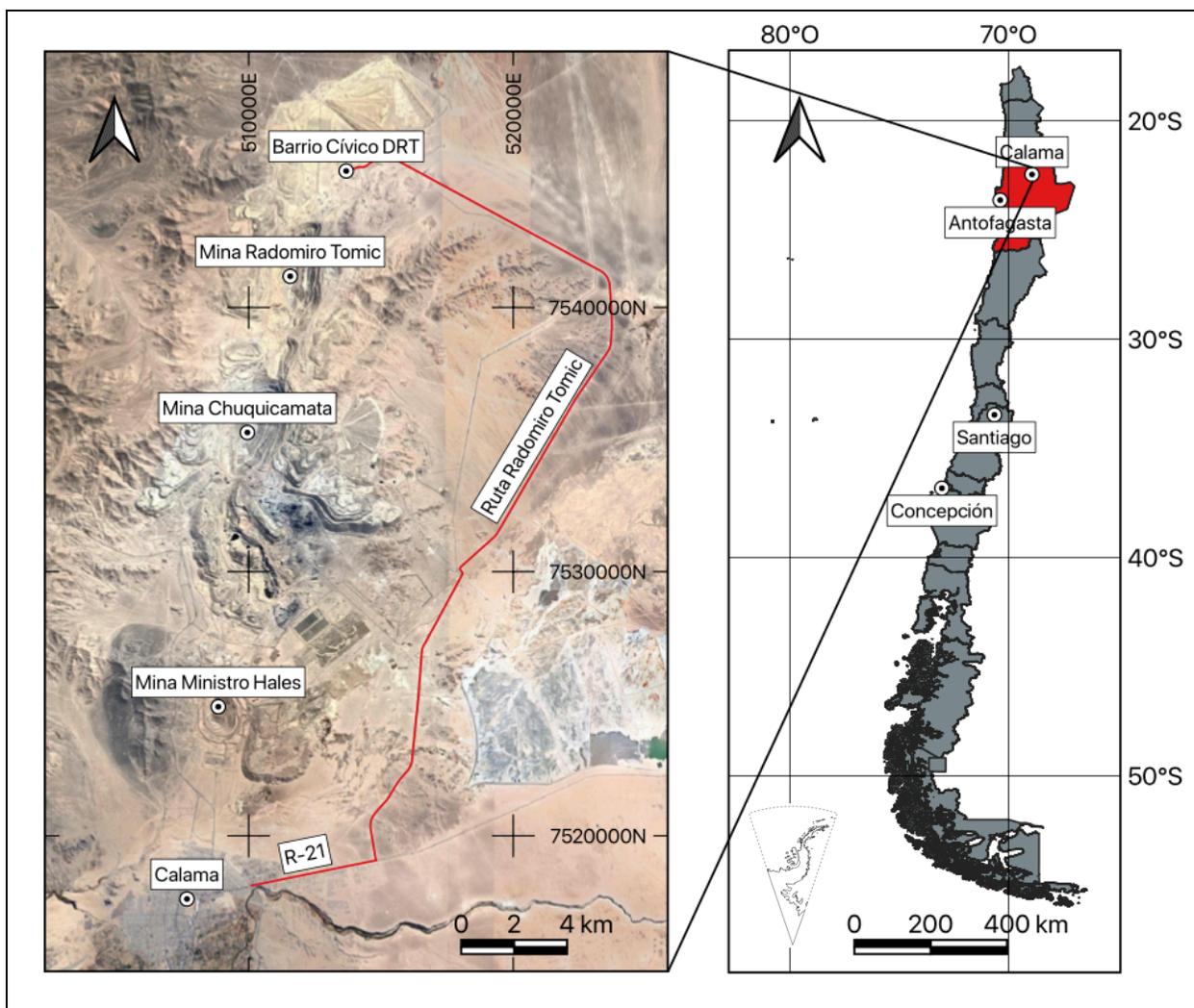


Figura 1.1: Ubicación y accesos Mina Radomiro Tomic.

## 1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 1.4.1. Etapa de gabinete

Se realiza una recopilación bibliográfica que abarca información relacionada al yacimiento para redactar el marco teórico y geológico. Se realiza la recopilación de los datos de sondajes del área de estudio para poder depurarla y hacer una base de datos para el modelamiento.

Se realiza un análisis exploratorio de datos con la base de datos previamente elaborada para ver alguna posible relación entre las leyes de cobre y alteración, zona mineral y/o litología utilizando los softwares *Maptek Vulcan* para la composición de la base de datos de sondajes cada 3m, confección de gráficos de deriva y de contacto, *Microsoft Excel* para la depuración de la base de datos y finalmente *Minitab* para la confección de gráficos estadísticos.

La última etapa corresponde a la confección de los tres modelos implícitos en software *Leapfrog Geo*: modelo de alteración, modelo litológico y modelo de zona mineral, integrando información de 42 sondajes para finalmente analizar la relación espacial de las zonas minerales con otras variables, como por ejemplo litología o estructuras.

#### **1.4.2. Etapa de terreno**

La etapa de terreno corresponde a la revisión de sondajes alojados en la muestrera de Radomiro Tomic, operada por el personal de DERK para obtener información acerca de la litología y mineralización del área de estudio.

### **1.5. TRABAJOS ANTERIORES**

- Cuadra y otros (1997) realizan dataciones radiométricas en el yacimiento Radomiro Tomic con información de sondajes y galerías subterráneas mediante los métodos K/Ar y Ar/Ar definiendo un desarrollo hidrotermal distinto al de Chuquicamata.
- Neimeyer y Leiva (1999) definen estructuras principales en el rajo Radomiro Tomic mediante el levantamiento de estructuras frágiles en la zona de oxidación del Pórfido Chuqui concluyendo un control estructural por fallas maestras de rumbo N-S a NNE relacionadas al sistema principal de la Falla Oeste.
- Leiva y otros (2000) actualizan el modelo estructural de Radomiro Tomic definiendo por primera vez sistemas y dominios estructurales del yacimiento.
- Proffett (2005) realiza un mapeo superficial del sector Mina Carmen además de buscar diferencias entre el Pórfido Chuqui y la Granodiorita Elena, su distribución y relaciones de contacto.

- Meinert (2011) revisa el potencial de los prospectos de Carmen y el Cluster Toki a partir de mapeo superficial y de sondajes.
- Payauna y Parra (2012) realiza una caracterización de la mena primaria y determina la ocurrencia de diversas asociaciones de sulfuros a partir de estudios calcográficos, además determina dominios mineralógicos de acuerdo con la abundancia de las especies.
- Ainol (2016) realiza una actualización del modelo estructural de Radomiro Tomic y redefine estructuras presentes, relacionándolas con los eventos de alteración.
- Verdugo (2019) interpreta la evolución de los sistemas Carmen y Corina en el yacimiento Radomiro Tomic a partir de análisis mineralógico, de alteración hidrotermal, geoquímico y estructural.
- Rojas (2020) realiza un modelamiento estructural de largo plazo del yacimiento a partir de bases de datos de mapeo de bancos, sondajes geológicos, pozos de tronadura y modelos de bloques con énfasis en el control de la mineralización.
- Carvajal (2022) realiza un modelo de las fases marginales del yacimiento Radomiro Tomic a partir de base de datos de sondajes indicando el principal control de la ley de cobre.
- Peña (2022) realiza un modelo estructural de la Fase 35 del yacimiento Radomiro Tomic a partir de base de datos de mapeo de bancos, sondajes y pozos de tronadura definiendo 10 dominios estructurales en la Fase 35.

## 1.6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a CODELCO, División Radomiro Tomic y a la Superintendencia de Geología por permitirme y darme la oportunidad de desarrollar mi memoria de título dentro de sus instalaciones y de facilitarme las herramientas necesarias. A todo el personal de la GRMD, en especial a mi tutor Alejandro Maldonado por aconsejarme y apoyarme a lo largo de toda mi estadía en las instalaciones de la División, a Claudio Rojas y Gonzalo Diaz por apoyar el tema de mi memoria y quienes me recibieron desde el primer día, a Sebastián Ainol por enseñarme tareas de terreno, a Wilson Mánquez, Silverio Muñoz y Álvaro Moya quienes me ayudaron a la hora de transportarme, a Sebastián de la Fuente quien me apoyó en el último tramo de mi estadía con mucha paciencia y dedicación, al personal de DERK Víctor Cid, José Ulloa y

Diego Cortés quienes me apoyaron con la base de datos de sondeos y la muestrera. A Valeria y Verónica por ayudarme con todos mis problemas computacionales. También a las personas con las que compartí en la empresa, a Catalina Verdugo, mi gemela perdida, a Cesar Briceño con quien compartimos buenos momentos dentro y fuera del trabajo, a Franklin Castro y José Mercado por esas tardes de pádel después del trabajo. Finalmente, a los amigos que hice en Calama, a mi roomie Francisca, a Tais quien me adoptaba los fines de semana y a Katerine mi compañera de oficina por las entretenidas tardes.

A mi profesor guía Abraham González por su apoyo y confianza desde el día en que le presenté el proyecto. A los jefes de carrera que estuvieron durante mi estadía en la universidad, Arturo Quinzio quien nos recibió como mechones, posteriormente a Verónica Oliveros quien me ayudó bastante durante mi proceso de inscripción de práctica y posterior memoria y finalmente a Fernanda Álvarez con la gestión de licencias.

A los amigos que hice durante mi etapa universitaria, en especial a Vicente, mi compañero en la gran mayoría de los trabajos y posteriores salidas en bicicleta. A mi polola Michell quien me ha apoyado desde las tardes de paleontología y con todas las tonteras que se me han ido ocurriendo durante estos años. Finalmente, a mi familia, a mis padres, quienes siempre me han apoyado y me han dado las herramientas para poder lograr todas mis metas.

## 2. GEOLOGÍA REGIONAL

El distrito de Chuquicamata (Figura 2.1) alberga los yacimientos de pórfidos de cobre de Chuquicamata, Radomiro Tomic y Ministro Hales, además de numerosos prospectos menores (Rivera y otros, 2009, 2012). Se encuentran en el cinturón de pórfidos de cobre de finales del Eoceno y principios del Oligoceno (43-31 Ma), de más de 1.000km de longitud, que define la Cordillera de Domeyko (Sillitoe y Perelló, 2005).

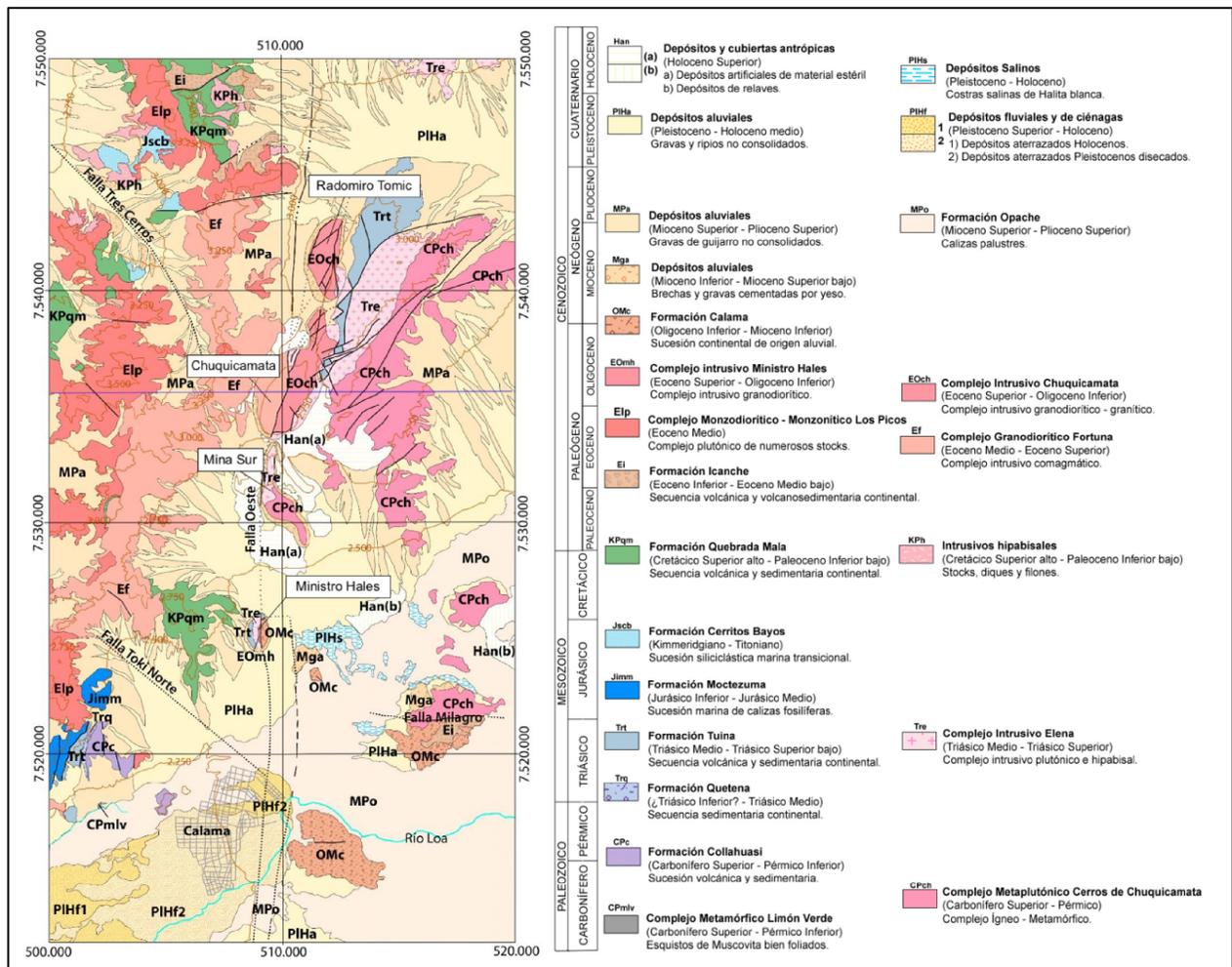


Figura 2.1: Mapa geológico del sector norte de Calama y Distrito Norte de CODELCO.

La geología del área de estudio está constituida por unidades que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cenozoico. El basamento incluye unidades metamórficas, plutónicas, volcánicas y sedimentarias del Carbonífero superior-Pérmico inferior, las cuales son el Complejo Metamórfico Limón Verde

(CPmlv), Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (CPch) y la Formación Collahuasi (CPc). Sobre el basamento se depositan unidades volcánicas, sedimentarias marinas y continentales del Mesozoico, las cuales son las formaciones Quetena (Trq) y Tuina (Trt) del Triásico, Moctezuma (Jimm) y Cerritos Bayos (Jscb) del Jurásico y Quebrada Mala (KPqm) del Cretácico-Paleoceno inferior. El Complejo Intrusivo Elena (Tre) del Triásico y los Intrusivos Hipabisales (KPh) del Cretácico-Paleoceno inferior representan el magmatismo del Mesozoico. Las unidades volcánicas y sedimentarias del Cenozoico son las formaciones Icanche (Ei), Calama (OMc), Opache (MPo) y los depósitos aluviales, antrópicos y fluviales. El magmatismo del Eoceno está representado por los complejos intrusivos Los Picos (Elp), Fortuna (Ef), Chuquicamata (EOch) y Ministro Hales (EOmh).

La descripción de las unidades se hace en base a La Carta Calama (Tomlinson y otros, 2018).

## **2.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

La precordillera de Calama se compone de bloques corticales o dominios de distinta índole estructural. Al interior de un dominio la geología del Paleozoico y Paleógeno es relativamente homogénea, la cual se contrasta, en grados variables, con la geología de los bloques y dominios adyacentes. Los límites de estos dominios son estructuras reconocibles en terreno, que en algunos casos pueden estar ocultos por intrusiones del Eoceno-Oligoceno o cubiertos por unidades del Neógeno (Tomlinson y Blanco, 2008).

En la Carta Calama se reconocen en total ocho dominios geológico-estructurales, cuatro situados al este de la falla Oeste, denominados de norte a sur, El Abra-Paqui, Arkansas, cerros de Chuquicamata y cerros Calama-Milagro y cuatro situados al oeste de la falla Oeste, denominados, San Lorenzo Norte, cerro Negro-MMH (Mina Ministro Hales), el bloque Toki-pampa Limón Verde y el dominio Montecristo-cerritos Bayos.

## **2.2. ROCAS METAMÓRFICAS**

### **2.2.1. Carbonífero superior-Pérmico inferior**

#### **2.2.1.1. Complejo Metamórfico Limón Verde (CPmlv)**

El nombre Complejo Metamórfico Limón Verde fue utilizado por Montañó en 1976 para referirse a las rocas metasedimentarias de bajo grado que afloran en el lado sur del cerro Limón Verde, al sur de la Carta Calama. Actualmente se utiliza este término para referirse a los esquistos y anfibolitas de alto grado que afloran en la falda occidental de la sierra de Limón Verde, descritos por Baeza en 1976. La unidad se encuentra en contacto erosivo bajo la Formación Quetena y al SE está limitada por un filón manto riolítico de 15m de espesor con un manteo subvertical, separándola de la Formación Quetena (Tomlinson y otros, 2018). Corresponde a esquistos de cuarzo y muscovita bien foliados con alteración filica (Tomlinson y otros, 2018). La composición mineralógica y química de los esquistos micáceos sugiere un protolito sedimentario pelítico-psamítico (Baeza y Venegas, 1984; Soto, 2013). Isócronas Rb-Sr indican una edad de  $300\pm 20$  Ma (Cordani y otros, 1988 en Tomlinson y otros, 2018) y dataciones U-Pb indican una edad de metamorfismo de  $280\pm 2$  Ma (Soto, 2013; Pankhurst y otros, 2016 en Tomlinson y otros 2018).

## **2.3. ROCAS INTRUSIVAS**

### **2.3.1. Carbonífero superior-Pérmico**

#### **2.3.1.1. Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (CPch)**

Tomlinson y otros (2018) proponen el nombre de Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata para diferenciarlo del nombre Complejo Metamórfico de Chuquicamata propuesto por Marinovic y Lahsen en 1984 para evitar confusión con el Complejo Intrusivo Chuquicamata (Tomlinson y otros, 2018). Se define como el conjunto de rocas plutónicas y metaplutónicas asociadas, de composición diorítica-gabroica a granítica, que afloran en los cerros de Chuquicamata y también en las colinas situadas al oeste del relave Talabre, la pampa Grama y en

la Mina Sur (Tomlinson y otros, 2018). El complejo se divide en tres unidades (1) Granito Mesa (CPch(g)) de 305-297 Ma, (2) dioritas y metadioritas anfibolíticas (CPch(d)) de 287 Ma y (3) Tonalita Cere (CPch(t)) del Pérmico (Tomlinson y otros, 2018). Es intruido por diques y stocks hipabisales micrograníticos y riolíticos del Pérmico superior, granodioritas, diques y stocks micromonzodioríticos, andesíticos y dacíticos del Complejo Intrusivo Elena del Triásico y diques y stocks hipabisales del Cretácico superior-Paleoceno inferior.

### **2.3.2. Triásico**

#### **2.3.2.1. Complejo Intrusivo Elena (Tre)**

Definido por Thomlinson y otros en 2018 para denominar el conjunto de rocas plutónicas e hipabisales triásicas de composición principalmente granodiorítica, granítica, micromonzodiorítica, dacítica y andesítica, que afloran en los cerros de Chuquicamata y Paqui, la pampa Grama, los morros Los Cerrillos y en los rajes de Chuquicamata, Radomiro Tomic y Ministro Alejandro Hales. Su nombre se debe al intrusivo más icónico del complejo, la Granodiorita Elena, que corresponde a la roca huésped del Complejo Intrusivo Chuquicamata (Tomlinson y otros, 2018). Se reconocen cuatro litofacies, las cuales son denominadas por su litología dominante: (1) granodioritas equigranulares, de grano medio con biotita y hornblenda, (2) granitos Bayo y Conchi, de biotita y hornblenda respectivamente, (3) micromonzodioritas y andesitas hipabisales correspondientes a diques y stocks irregulares hipabisales de color negro, pardo verdoso, y gris verdoso, de composición principalmente intermedia con textura microfanerítica o microafanítica y (4) dacitas, riolitas y microgranodioritas hipabisales correspondientes a diques, filones mantos y stocks irregulares de dacita y subordinadamente riolita y microgranodiorita (Tomlinson y otros, 2018). Intruye a las rocas del Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata y a la Formación Tuina y son intruidas por dioritas y andesitas del Cretácico Superior-Paleoceno inferior y por los complejos intrusivos del Eoceno-Oligoceno Chuquicamata, Ministro Hales, Los Picos, Fortuna y Miranda (Lindsay, 1997; Ossandón y otros, 2001; Camus, 2003; Boric y otros, 2009; Marquardt y otros, 2009; Rivera y otros, 2012; Zentilli y otros). Para el Complejo Intrusivo Elena se tienen 21 dataciones U-Pb en circones con un rango de entre 239 a 222 Ma, correspondiente al Triásico Superior medio (Tomlinson y otros, 2018).

### **2.3.3. Cretácico-Paleoceno inferior**

#### **2.3.3.1. Intrusivos hipabisales (KPh)**

Corresponden a un conjunto de stocks, diques y filones mantos hipabisales de composición principalmente andesítica, riolítica, microdiorítica y micromonzonítica cuarcífera, que afloran en los cerros Genoveva y Quetena. Se reconocen cuatro litofacies: (1) andesítica, (2) microdiorítica, (3) micromonzonítica cuarcífera y (4) riolítica y microgranítica. Intruye a las formaciones Collahuasi, Quetena, Tuina, Moctezuma, Quebrada Mala, Tolar y al Complejo Metaplutónico Chuquicamata y Complejo Intrusivo Elena. Es intruido por el Complejo Monzodiorítico-Monzonítico Los Picos. Dataciones U-Pb en circón, K-Ar y Ar/Ar indican edades entre 69 y 66 Ma (Tomlinson y otros, 2018).

### **2.3.4. Eoceno-Oligoceno inferior bajo**

#### **2.3.4.1. Complejo Monzodiorítico-Monzonítico Los Picos (Elp)**

Definida por Thomas en 1978 y enmendada por Tomlinson y otros en 2018 para denominar a un conjunto de intrusivos de composición monzodiorítica, monzodiorítica cuarcífera, diorítica, diorítica cuarcífera, monzonítica y monzonítica cuarcífera, con augita y biotita como máficos principales, cuyas unidades son Monzodiorita cuarcífera Aralar, Monzonita-monzodiorita cuarcífera Atahualpa y Micromonzonita cuarcífera Valti (Tomlinson y otros, 2018). Los stocks del complejo intruyen a las formaciones Collahuasi, Quetena, Tuina, Moctzuma, Cerritos Bayo, Quebrada Mala e Icanche, y a stocks andesíticos del Cretácico Superior-Paleoceno. El complejo es intruido por el Complejo Granodiorítico Fortuna. Las edades de las unidades Monzodiorita cuarcífera Aralar y Monzonita-monzodiorita cuarcífera Atahualpa se obtuvieron mediante dataciones U-Pb, K-Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , indicando edades de 45-42 Ma (Marquardt y otros, 2009; Tomlinson y otros, 2010; Rivera y otros, 2012) y 43-42 Ma (Tomlinson y otros, 2018) respectivamente, mientras que la edad de la Micromonzonita cuarcífera Valti se obtuvo mediante contacto gradacional con la Monzonita-monzodiorita cuarcífera Atahualpa e intrusión de la

Granodiorita Antenta del Complejo Granodiorítico Fortuna, su asociación espacial y contactos sugieren que son intrusivos congénitos, por lo que la edad de la Micromonzonita cuarcífera Valti es 43-42 Ma (Tomlinson y otros, 2018).

#### **2.3.4.2. Complejo Granodiorítico Fortuna (Ef)**

Definida por Ambrus en 1979, como un conjunto de intrusivos de composición principalmente granodiorítica y subordinadamente granítica y monzodiorítica cuarcífera, con hornblenda y biotita como máficos principales (Tomlinson y otros, 2018). Se divide en cuatro unidades principales: (1) Granodiorita Antena (40-39 Ma), (2) Granodiorita Fiesta (39-37 Ma), (3) Granitos aplíticos Tetera (40-37 Ma) y (4) Pórfidos granodioríticos San Lorenzo (38-37 Ma), siendo las últimas tres unidades contemporáneas (Tomlinson y otros, 2018). Intruye a las formaciones Tuina y Moctezuma y al Complejo Monzodiorítico-Monzonítico Los Picos y en subsuperficie a la Formación Collahuasi (Rivera y otros, 2012; Barra y otros, 2013), y a las formaciones Cerritos Bayos e Icanche (Tomlinson y otros, 2018). Las edades se obtuvieron mediante dataciones radiométricas U-Pb, K-Ar,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y (U-Th)/He (Ambrus, 1979; Boric y otros, 1990; Maksaev, 1990; Cuadra y otros, 1997b; Dilles y otros, 1997; Maksaev y Zentilli, 1999; McInnes y otros, 1999; Ballard, 2001; Tomlinson y otros, 2001; Arnott, 2003; Campbell y otros, 2006; Tomlinson y otros, 2010; Barra y otros, 2013, en Tomlinson y otros, 2018).

#### **2.3.4.3. Complejo Intrusivo Chuquicamata (EOch)**

Definido por Lindsay y otros en 1995, corresponde a rocas principalmente granodioríticas, que varían desde monzodiorita cuarcífera a monzogranito y monzonita cuarcífera (Aracena, 1981; Lindsay, 1997; Cabrera, 2011) que hospedan y están relacionadas con la génesis de la mineralización de cobre y molibdeno en los yacimientos de Chuquicamata y Radomiro Tomic. En la mina Chuquicamata se han definido los pórfidos Este ( $36,2 \pm 0,4$ - $34,3 \pm 0,3$  Ma), Oeste ( $34,1 \pm 0,3$ - $33,1$  Ma), Banco y de Textura Fina (Hunt, 1962; Langerfeldt, 1964; Ossandón y otros, 2001 en Tomlinson y otros, 2018) y en Radomiro Tomic se reconoce el mismo Pórfido Este y otras variedades, denominadas Pórfido Fino RT y Pórfido Oeste RT para evitar confusiones. Intruye a la Granodiorita Elena (Ambrus, 1979; Díaz y otros, 2009; Rivera y otros, 2012) y está en contacto

por falla con la misma granodiorita y el Grupo Caracoles (Lindsay, 1997; Ossandón y otros, 2001; Faunes y otros 2005; Rivera y otros, 2012). Las dataciones se hicieron mediante U-Pb (Ballard, 2001; Ballard y otros 2001; Campbell y otros, 2006; Proffett y Dilles, 2007) debido a la dificultad de los métodos en base de minerales potásicos a causa de la alteración hidrotermal pervasiva.

#### **2.3.4.4. Complejo Intrusivo Ministro Hales (EOmh)**

Definido por Boric y otros en 2009, corresponde a un complejo intrusivo, principalmente granodiorítico, compuesto de stocks filonianos y diques porfíricos, asociado a la mineralización y alteración hidrotermal del yacimiento Ministro Hales (Boric y otros, 2009; Diaz, 2010, Rivera y otros, 2012 en Tomlinson y otros, 2018) e incluye a las variedades Pórfido MM, Pórfido Cuarífero MM y diques de Pórfido Dacítico MM (Sillitoe y otros, 1996; Boric y otros, 2009; Zentilli y otros 2015, 2018). Tiene forma de dique con rumbo N-S, subparalelo a la falla Oeste, manteo de 75-80°W, longitud de 7 km, ancho de 200-320 m y está reconocido por más de 1200 m en profundidad (Boric y otros, 2009; Diaz, 2010; Rivera y otros, 2012). Se encuentra cubierto por gravas aluviales del Mioceno-Holoceno. Dataciones U-Pb en circones indican una edad de cristalización entre los 35-33 Ma (Boric y otros, 2009; Rivera y otros, 2012; Zentilli y otros 2015, 2018), donde los pórfidos MM y Cuarífero MM cristalizaron primero que los diques del Pórfido Dacítico MM (Tomlinson y otros, 2018).

## **2.4. ROCAS ESTRATIFICADAS**

### **2.4.1. Carbonífero superior-Pérmico inferior**

#### **2.4.1.1. Formación Collahuasi (CPc)**

Definida por Vergara en 1978 para designar las rocas volcánicas e intrusivos subvolcánicos asociados de composición dacítica y riolítica que afloran en las inmediaciones de la localidad de Collahuasi (Tomlinson y otros, 2018). Los afloramientos en la Carta Calama se localizan al oeste y noroeste de la ciudad de Calama, en el cerro La Cruz, en las colinas situadas al este del cerro Quetena y cerca del límite norte de la carta, en la pampa Chuquicamata (Tomlinson y otros, 2018).

Su base está cubierta discordantemente por la Formación Quetena. Dataciones U-Pb indican una edad entre  $303,9\pm 0,1$  Ma (Tomlinson y otros, 2010) y  $273\pm 11$  Ma (Rivera y otros, 2012).

## **2.4.2. Triásico**

### **2.4.2.1. Formación Quetena (Trq)**

Definida por Lira en 1989 como unidad Estrados de Quetena y elevada a Formación por Tomlinson y otros (2018) para referirse a los conglomerados y areniscas sobreyacentes dominados por clastos metamórficos. Corresponde principalmente a conglomerados y areniscas de grano grueso. Sobreyace en inconformidad al Complejo metamórfico Limón Verde y en discordancia angular a las Formaciones Collahuasi e infrayace concordantemente a la Formación Tuina (Tomlinson y otros, 2018). Su posición estratigráfica permite acotar su edad al Triásico Medio-Triásico Medio (Tomlinson y otros, 2018).

### **2.4.2.2. Formación Tuina (Trt)**

Definida por Raczyński en 1963 para describir una sucesión de rocas volcánicas (andesitas, riolitas, brechas y tobas) y sedimentarias clásticas (conglomerados, areniscas y lutitas), divididas en dos miembros volcánicos (inferior y superior) y uno sedimentario (intermedio). Sobreyace concordantemente a la Formación Quetena, en inconformidad al Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata e infrayace discordantemente a la Formación Quebrada Mala. Se encuentra en contacto por falla con la Formación Moctezuma y está intruida por el Complejo Intrusivo Elena (Boric y otros, 2009; Diaz, 2010; Zentilli y otros, 2018 en Tomlinson y otros, 2018). Dataciones U-Pb indican una edad máxima de  $245,3\pm 1,4$  Ma y una edad mínima de  $230,9\pm 1,3$  Ma.

### **2.4.3. Jurásico**

#### **2.4.3.1. Formación Moctezuma (Jimm)**

Definida por Herrington en 1961 como una sucesión de calizas azuladas y margas pardas claras y pardo amarillentas, con subordinadas y delgadas intercalaciones de tobas andesíticas gris verdosas en la base (Harrington, 1961), las cuales son afectadas por metamorfismo de contacto (Tomlinson y otros, 2018). Se encuentra sobre la Formación Tuina en contacto por falla, mientras que su techo no aflora, es intruida por stocks hipanisaes andesíticos y microdioríticos del Cretácico Superior y stocks del Complejo intrusivo Los Picos (Tomlinson y otros, 2018). Mediante e registro fosilífero de generos y especies indeterminadas de Rhynchonellidae y Ammonoidea, se le asigna una edad del Jurásico Inferior-Jurásico Medio.

#### **2.4.3.2. Formación Cerritos Bayos (Jscb)**

Definida por García en 1967 para designar una secuencia de lutitas grises, con bancos de calizas y una sucesión de yeso en la parte basal de la unidad, Duhart y otros (2018) corrigen la definición de García (1967) y eliminan la sección calcárea y yesífera de la formación (Tomlinson y otros 2018). Se conforma por sucesiones rítmicas decamétricas de areniscas y fangolitas con ondulitas de corriente, sucesiones grano y estrato crecientes métricas a decamétricas de areniscas con ondulitas de corriente con intercalaciones subordinadas de limonitas y sucesiones grano y estrato decrecientes de limonitas métricas con laminación plana con intercalaciones de areniscas decimétricas con ondulitas de corriente (Tomlinson y otros, 2018). Se encuentra concordantemente sobre la Formación Honda y subyace en discordancia erosiva a la Formación Tolar, en discordancia angular a la Formación Quebrada Mala y concordantemente a la Formación San Salvador. Se encuentra intruida por stocks del Complejo Monzodiorítico-Monzonítico Los Picos y sotcks hipabisales del Cretácico Superior-Paleoceno (Tomlinson y otros, 2018). A partir de relaciones estratigráficas, sobre la Formación Honda (Kimerigdiano) y bajo la Formación San Salvador (Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Moreno y otros, 2004; Duhart y otros, 2018)), se le asigna una edad de Kimerigdiano-Titoniano (Tomlinson y otros, 2018).

#### **2.4.4. Cretácico-Paleoceno inferior**

##### **2.4.4.1. Formación Quebrada Mala (KPqm)**

Definida por Montañó en 1976 para referirse a una secuencia continental de conglomerados, areniscas, andesitas, brechas andesíticas y tobas que se dividen en dos miembros: (1) el miembro inferior, en el que se reconocen litofacies de conglomerados y areniscas subordinadas, areniscas y brechas piroclásticas y volcanosedimentarias dacíticas, (2) el miembro superior, en el que se reconocen litofacies de brechas volcanosedimentarias con intercalaciones subordinadas de brechas piroclásticas y otra litofacie de areniscas finas y fangolitas (Tomlinson y otros, 2018). Sobreyace en discordancia angular a la Formación Tuina, Formación Cerritos Bayo y Formación Tolar. Es intruida por cuerpos ígneos del Cretácico Superior-Paleoceno inferior, un stock de monzodiorita cuarcífera del Eoceno y por los complejos plutónicos Los Picos y Fortuna del Eoceno (Tomlinson y otros, 2018). Para determinar la edad se utilizaron los métodos U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K-Ar, las cuales indican edades entre  $71,6\pm 1,7$  y  $66,5\pm 1,0$  Ma (Cretácico Superior alto-Paleoceno inferior bajo) (Tomlinson y otros, 2018).

#### **2.4.5. Eoceno-Oligoceno inferior bajo**

##### **2.4.5.1. Formación Icanche (Ei)**

Definida por Makshev en 1978 para designar una secuencia de rocas volcánicas andesíticas. Se reconocen tres litofacies: andesitas, brechas volcanosedimentarias y conglomerados subordinados y lavas y domos dacíticos (Tomlinson y otros, 2018). Sobreyace en paraconformidad y discordancia angular a la Formación Tolar (Makshev, 1978; Tomlinson y otros, 2001; Tomlinson y Blanco, 2008), en paraconcordancia a la Formación Quebrada Mala, e infrayace en concordancia y discordancia a la Formación Sihal (Makshev, 1978; Blanco y Tomlinson, 2006) y en discordancia angular a la Formación Calama. Es intruida por un stock dacítico del Eoceno, Monzodiorita Aralar y la Monzonita-Monzodiorita cuarcífera Atahualpa (Tomlinson y otros, 2018). Para determinar la edad se utilizaron los métodos U-Pb, K-Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , las cuales indican edades entre 52 y 47 Ma (Eoceno Inferior-Eoceno Medio) (Tomlinson y otros, 2018).

## **2.4.6. Oligoceno inferior alto-Plioceno**

### **2.4.6.1. Formación Calama (Omc)**

Definida por Naranjo y Paskoff en 1981, corresponde a conglomerados medianamente consolidados, divididos en dos miembros separados por una discontinuidad erosiva: (1) Miembro Topater que corresponde a conglomerados de grano grueso a muy grueso y areniscas gruesas de color pardo amarillento claro y (2) Miembro Chorrillos que corresponde a conglomerados de grano fino a grueso de color gris verdoso oscuro (Tomlinson y otros, 2018). Se encuentra en discordancia angular sobre la Formación Icanche y en inconformidad sobre el Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata y subyace en discordancia angular a la Formación Jalquinche (May, 1997; May y otros, 2005; Blanco). Su posición estratigráfica entre las formaciones Icanche y Jalquinche, en conjunto con dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , permiten acotar el rango de edad entre el Oligoceno inferior a Mioceno inferior (Tomlinson y otros, 2018).

### **2.4.6.2. Formación Opache (MPo)**

Definida por May en 1997 para denominar a un conjunto de rocas carbonatadas, conglomerados y areniscas con cemento carbonatado. Se constituye de areniscas calcáreas de grano fino a grueso, calizas arenosas, margas, areniscas ferruginosas negras, diatomitas laminadas, con bandas de arenas grises y lentes irregulares (Tomlinson y otros, 2018). Su base es diacrónica, por lo que sobreyace en conformidad y engrana lateralmente a la Formación Chiquinaputo (May, 1997; May y otros 2005) y a la Ignimbrita Caracoles (Baker, 1977 en Tomlinson y otros, 2018), en discordancia a la Formación Lasaña y engrana lateralmente con los depósitos aluviales del Mioceno. Subyace discordantemente a la Formación Chiuchiu y cortada por los depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno medio (Tomlinson y otros, 2018). A partir de su posición estratigráfica y dataciones radiométricas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , se le asigna una edad Mioceno superior-Plioceno superior (May, 1997; May y otros, 2005; Blanco y Tomlinson, 2009).

#### **2.4.7. Pleistoceno-Holoceno**

Las unidades que abarcan este periodo corresponden a depósitos sedimentarios continentales, aluviales y fluviales del Pleistoceno superior-Holoceno (PIHf), depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno medio (PIHa), depósitos salinos (PIHs) y depósitos y cubiertas antrópicas del Holoceno superior (Han) (Tomlinson y otros, 2018)

## **3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO RADOMIRO TOMIC**

### **3.1. ESTRUCTURAS**

En el distrito Chuquicamata, la principal estructura es la falla Oeste, cuyo rumbo general es norte-sur con manteo subvertical con leve inclinación al oeste. Corresponde a una falla de primer orden, translitosférica, que controla la ubicación regional de los principales pórfidos eoceno-oligocénicos del norte de Chile (Richards, 2003). Al este de la falla Oeste se reconoce un sistema de fallas distritales mayores que controlan el emplazamiento y distribución de la mineralización del yacimiento Radomiro Tomic (Lindsay y otros, 1995; Lindsay, 1997; Niemeyer y Leiva, 2000; Leiva y otros, 2000; Ainol 2016), denominados Kala y Ckaari, también de orientación norte-sur y forman parte de un sistema transtensional dextral generando el sistema conjugado Kalatche de rumbo NE y el sistema de fallas Estanques Blancos al SE y S del yacimiento (Rojas, 2020).

#### **3.1.1. Sistemas estructurales**

A partir de la información geológica-estructural recopilada durante todo el desarrollo minero del yacimiento, se define que la mineralización en Radomiro Tomic está controlada por cuatro sistemas estructurales principales (Figura 3.1): Sistema Kala, Sistema Ckaari, Sistema Kalatche y Sistema Corina (Rojas, 2020).

##### **3.1.1.1. Sistema Kala**

Son estructuras subverticales de orientación norte-sur, ubicadas en el dominio occidental de Radomiro Tomic. Su traza principal genera un salto topográfico del orden de 50m en las gravas, por lo que sugiere reactivaciones recientes (Rojas, 2020).

##### **3.1.1.2. Sistema Ckaari**

Es un sistema de fallas norte-sur con un manteo de entre 80° y 90°E, ubicado en el flanco oriental del rajo Radomiro Tomic. Este sistema tiene gran continuidad longitudinal y está formado por

múltiples planos de fallas y fracturas norte-sur de alto ángulo, los cuales están rellenos con arcilla-limonita. Estos dos primeros sistemas, Kala y Ckaari, forman parte del sistema norte-sur de la falla Oeste (Ainol, 2016; Rojas, 2020).



**Figura 3.1: Esquema de los principales sistemas y estructuras del norte de Chuquicamata y rajo Radomiro Tomic.** La línea punteada roja representa la topografía del pit final 2019 (Rojas, 2020)

### 3.1.1.3. Sistema Kalatche

Corresponde a un sistema de fallas rumbo NE con inclinaciones subverticales y leves cambios de rumbo cuando converge hacia los sistemas NS, de gran extensión longitudinal ubicado en el sector central del yacimiento. Es un sistema conjugado de las fallas maestras Kala y Ckaari de rumbo y es uno de los principales controladores de la mineralización hipógena (Leiva, 2000; Leiva y otros, 2000; Ainol 2016; Rojas, 2020). La geometría de Kalatche se interpreta como un “*jog* estructural” (extensión de escala menor a la de la deformación principal con forma romboédrica) con respecto

a las fallas maestras, lo que genera dilataciones que favorecen la introducción de fluidos hidrotermales (Rojas, 2020).

#### **3.1.1.4. Sistema Corina**

Corresponde a un sistema de falla rumbo NW con un manteo cercano a los 65°SW que se ubica preferentemente en la parte central y oriental del yacimiento. También tiene estructuras subverticales y otras de hasta 45° de manteo. Estas estructuras cortan al Sistema Kalatche y controlan la ocurrencia de mineralización de cobre exótico (Leiva, 2000; Ainol, 2016; Rojas, 2020).

## **3.2. LITOLOGÍA**

Las unidades litológicas que se han descrito en el yacimiento Radomiro Tomic corresponden a Andesitas y Metasedimentos (AND), Granodioritas de caja (GDE), Pórfido Este (PFE), Pórfido Fino (PFF), Pórfido Oeste (PFW), Pórfido Banco (PFB) y Gravas (GRA). (Rojas, 2019)

### **3.2.1. Andesitas y metasedimentos (AND)**

Son una unidad informal que agrupa rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas de las unidades Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (CPch) y Formación Tuina (Trt), que son intruidas por la Granodiorita Elena (GDE). Es una unidad estéril que aflora en el borde este del yacimiento (Maldonado, 2021).

### **3.2.2. Granodiorita Elena (GDE)**

Corresponde a la roca caja afectada por alteración clorítica, potásica y cuarzo sericita, es una granodiorita equigranular de grano medio a grueso que aflora al oeste y este del Complejo Intrusivo Chuquicamata (CPch) (Chong y Pardo, 1993). Agrupa a las unidades formales Complejo Intrusivo Elena y el Complejo Monzonítico-Monzodiorítico Los Picos.

### **3.2.3. Granodiorita Fortuna (GDF)**

La Granodiorita Fortuna se distribuye al oeste del Complejo Intrusivo Chuquicamata. Corresponde a una granodiorita a monzonita de color gris claro, de grano grueso a medio con textura hipidiomorfa granular. Al acercarse a la falla Oeste su textura varía a cataclástica (Chong y Pardo, 1993).

### **3.2.4. Complejo Intrusivo Chuquicamata (CPch)**

Corresponde al conjunto de pórfidos granodioríticos, monzograníticos y monzodioríticos alterados que constituyen la roca huésped de la mineralización en el distrito (Maldonado, 2021), compuesto por el Pórfido Este (PFE), Pórfido Fino (PFF), Pórfido Oeste (PFW) y Pórfido Banco (PFB) (Ossandon y otros, 2001).

#### **3.2.4.1. Pórfido Este (PFE)**

El Pórfido Este es la litología predominante del complejo y la principal roca huésped de la mineralización. Intruye a la Granodiorita Elena (GDE) en el flanco oriental (Rivera y otros, 2012) y a su vez, es intruido por los pórfidos Fino (PFF), Oeste (PFW) y Banco (PFW) (Cabrera, 2011). Corresponde a una granodiorita y monzodiorita cuarcifera de color gris rosado claro y de grano medio a grueso sin masa fundamental (Cabrera, 2011). Se diferencia de la Granodiorita Elena por la presencia de esfeno alterado color miel en el pórfido. (DERK 2022). Dataciones U-Pb en circones indican una edad  $35 \pm 0.3$  Ma (SHRIMP) (Campbell y otros, 2006).

#### **3.2.4.2. Pórfido Fino (PFF)**

El Pórfido Fino corresponde a un grupo de cuerpos intrusivos de textura porfídica idiomórfica de grano medio, con masa fundamental fanerítica fina a afanítica microcristalina y aflora en la parte centro – oeste del rajo RT (Cabrera, 2011). Es una microgranodiorita de biotita de color gris claro. No tiene magnetismo y contiene sulfuros diseminados (Cabrera, 2011). Intruye al Pórfido Este y

es intruido por el Pórfido Oeste (Tomlinson y otros, 2018). Campbell y otros (2006) mediante dataciones U-Pb le asignan una edad de  $33.9 \pm 0.4$  Ma.

#### **3.2.4.3. Pórfido Oeste (PFW)**

El Pórfido Oeste es un conjunto de diques de textura porfídica idiomórfica de grano medio y masa fundamental afanítica microcristalina que aflora en la parte centro – este del rajo RT. Se presenta mayoritariamente como diques centimétricos, alcanzando potencias de  $\sim 7$  m que intruyen a los pórfidos Este y Fino. (Cabrera, 2011). Corresponde a una microgranodiorita a micromonzodiorita cuarcífera de biotita. Ballard y otros (2001) le asignan edades de 33.5 Ma y de  $31.8 \pm 0.9$  mediante dataciones U-Pb y K-Ar respectivamente.

#### **3.2.4.4. Pórfido Banco (PFB)**

El Pórfido Banco corresponde a un dique de textura porfídica idiomórfica de grano medio, con masa fundamental afanítica microcristalina, de espesor aparente  $\geq 15$  m en el margen E de la Mina RT. Es una leuco-granodiorita que presenta 2 poblaciones de fenocristales, una de tamaño mayor a 3 mm y otra entre 1 y 2 mm (Cabrera, 2011). No se han determinado edades dentro del yacimiento de Radomiro Tomic, sin embargo, Campbell y otros (2006) registraron edades U-Pb en circones, indicando una edad de  $34.1 \pm 0.3$  Ma y de  $33.1 \pm 0.3$  Ma en el yacimiento de Chuquicamata.

#### **3.2.5. Gravas (GRA)**

Corresponde a los sedimentos no consolidados o parcialmente consolidados, que forman una cobertura sobre el basamento ígneo (granodioritas de caja y Pórfido Chuqui). Se constituye de una matriz arenosa (fina a gruesa) y clastos de diferentes formas y tamaños, mono o polimíctica. La presencia o no de mineral y la ocurrencia de este, la diferencia en Grava Estéril, Grava Exótica y Grava mineralizada.

### **3.3. ALTERACIONES Y MINERALIZACIÓN**

Las alteraciones definidas en Radomiro Tomic son: Potásico de Fondo (PF), Clorítico Marginal (CMH), Early Dark Micaceous (EDM), Sericita Gris-Verde (SGV), Sericita Verde Calcopirita (SVCP), Cuarzo-Sericita Penetrativa (QSP) y Argílica Avanzada (AA). La mineralización primaria (bornita y calcopirita) se encuentra principalmente en las alteraciones PF, EDM y SGV, en SVCP predomina la calcopirita por sobre la pirita y en QSP ocurre lo contrario (Payauna y Parra, 2012). En menor cantidad se encuentran las alteraciones CMH y AA.

#### **3.3.1. Mineralización hipógena**

Según Ortega y otros (2006), la mineralización hipógena en Radomiro Tomic está asociada a cuatro eventos principales: Evento tardimagmático, Evento hidrotermal temprano, Evento hidrotermal principal y Evento hidrotermal tardío.

##### **3.3.1.1. Evento Tardimagmático**

###### **A. Potásica de fondo (PF)**

La alteración Potásica de Fondo es el evento de alteración y mineralización más temprano, que afecta a las unidades del Pórfido Chuqui, se caracteriza por el reemplazo selectivo de máficos por biotita secundaria y por plagioclasas alteradas parcialmente a feldespato potásico, cuyos minerales accesorios son cuarzo, magnetita, sericita y clorita (Maldonado, 2021).

Asociada a esta alteración, hay dos tipos de vetillas: (1) Vetillas tipo A, caracterizadas por ser de cuarzo con halos de feldespato potásico y poco contenido de sulfuros diseminados en el halo y sutura, la bornita predomina por sobre la calcopirita; (2) vetillas Early Dark Micaceous (EDM) caracterizadas por tener cuarzo en la sutura y un halo con agregado fino de cuarzo, feldespato potásico, biotita y sericita subordinada (Maldonado, 2021). Los minerales primarios son bornita, calcopirita y digenita y en menor cantidad esfalerita, pirita, molibdenita y calcosina (Payauna y Parra, 2012).

## **B. Clorítico Marginal (CMH)**

La alteración Clorítico Marginal corresponde a la alteración propilítica, caracterizada por la alteración selectiva a máficos primarios y secundarios (hornblenda y biotita), magnetita primaria preservada además de albitización selectiva de plagioclasas y epidota escasa (Maldonado, 2021). En relación con la alteración potásica, la alteración CMH es espacialmente más externa y temporalmente posterior, se localiza en los bordes occidental y oriental del yacimiento (Maldonado, 2021).

### **3.3.1.2. Evento Hidrotermal Temprano**

El Evento hidrotermal temprano corresponde a una transición entre la actividad tardimagmática y la hidrotermal principal (Rojas, 2019).

#### **A. Vetas y Vetillas Tipo B (VB)**

Estas vetas forman parte del Evento tardimagmático y corresponden a vetillas de cuarzo-anhídrita-sulfuros, de espesores milimétricos a decimétricos. Como sulfuro característico se encuentra molibdenita en forma diseminada y en venillas (Briceño, 2011; Payauna y Parra, 2012; Maldonado, 2021).

#### **B. Sericita Gris Verde (SGV)**

La sericita gris verde se asocia al evento transicional entre la actividad tradimagmática y la hidrotermal. Son vetillas de potencia principalmente milimétrica y en escasas ocasiones centimétricas. Se caracterizan por tener un halo irregular de color gris-verdoso, compueseto por un agregado de sericita ± cuarzo (Maldonado, 2021). La mineralización se encuentra en la sutura y el halo y corresponde a bornita, calcopirita, digenita, esfalerita, tetraedrita, y en menor cantidad calcosina primaria y pirita, con una ley de CuT de 0,6% (Payauna y Parra, 2012). A esta alteración se le asocia el aumento en leyes de CuT en ambiente hipógeno (Maldonado, 2021).

### **C. Sericita Verde Calcopirita (SVCP)**

La sericita verde calcopirita corresponde a vetillas irregulares de potencia centimétrica a decimétrica, caracterizada por halos de alteración selectiva de color verde oscuro (Maldonado, 2021). Se compone principalmente de un agregado de sericita, illita y cuarzo que alteran de manera selectiva a feldspatos y máficos. La mena corresponde a calcopirita, digenita, pirita y esfalerita en el halo y sutura con 60% y 40% respectivamente (Payauna y Parra, 2012).

#### **3.3.1.3. Evento Hidrotermal Principal**

El evento hidrotermal principal se desarrolla sobre el “background” potásico, utilizando las discontinuidades generadas por el emplazamiento de vetas de cuarzo y reutilizando canales del evento sericita gris verde (Jensen y otros, 2019).

#### **A. Cuarzo Sericita Calcopirita (QSPCpy)**

Se caracteriza por tener cuarzo, sericita y calcopirita dominante (90%) con pirita subordinada y en algunos casos la ocurrencia de una sutura central con calcopirita y cuarzo, y en el halo presencia de calcopirita diseminada con cuarzo y sericita (Maldonado, 2021). Sus tonalidades varían desde el verde claro al gris claro, obliterando de manera total la textura original de la roca (Maldonado, 2021).

#### **B. Cuarzo Sericita Penetrativa (QSP)**

Se caracteriza por agregados de sericita, cuarzo y caolín de color ocre blanquecino, asociados a estructuras milimétricas a métricas que obliteran la textura original del Complejo intrusivo Chuquicamata, Granodiorita Elena y metasedimentos, y además se superponen a los eventos anteriores (Maldonado, 2021). La mineralización correspondiente a calcopirita, digenita, pirita, tetraedrita, esfalerita y sulfuros secundarios como covelina y calcosina, con una ley promedio de

0,7-0,8% CuT, se aloja principalmente en el halo (70%) (Payauna y Parra, 2012; Maldonado, 2021).

#### **3.3.1.4. Evento Hidrotermal Tardío**

El evento hidrotermal tardío se caracteriza por la presencia de arcillas (caolinita, pirofilita y alunita) junto a altos contenidos de pirita, que obliteran completamente la textura original de la roca (Rojas, 2019).

##### **A. Argílica y Argílica Avanzada (AA)**

Corresponde a una asociación que es temporalmente posterior a la alteración cuarzo sericita penetrativa. Se caracteriza por la presencia de arcillas y alunita como minerales principales, la ocurrencia es mediante reemplazo selectivo, vetas y/o vetillas (Maldonado, 2021). Se ha reconocido de manera restringida en el sector central de la parte superior del yacimiento sin una definición de la mineralización asociada ni de su importancia en los quiebres de ley (Rojas y Cuadra, 2000; Maldonado, 2021). En profundidad está asociada a estructuras QSP y fallas con salbanda disminuyendo la intensidad a medida que se acerca a la roca caja (Briceño, 2011). Se le asocian altos valores de arsénico debido a los altos contenidos de pirita y en menor cantidad tenantita y enargita. (Briceño, 2011).

#### **3.3.2. Mineralización supérgena**

##### **3.3.2.1. Zona Lixiviada**

La zona lixiviada se localiza en la parte superior del yacimiento, y en profundidad puede coexistir con la zona de oxidados de cobre y sulfuros, ya que se relaciona a estructuras (Rojas, 2019). Se caracteriza por la presencia de goethita, hematita y en menor cantidad jarosita (Maldonado, 2021).

### 3.3.2.2. Zona Oxidada

La zona oxidada se localiza entre la zona lixiviada y la de sulfuros secundarios o mixtos. Se reconocen principalmente arcillas con cobre y atacamita en los sectores superiores del yacimiento, además de crisocola, malaquita, azurita, pseudomalaquita y turquesa (Maldonado, 2021).

### 3.3.2.3. Zona Mixta

En la zona mixta coexisten los minerales oxidados con los sulfurados debido a la variación del nivel freático a lo largo del tiempo. Los minerales presentes son la cuprita, cobre nativo, covelina y atacamita (Maldonado, 2021).

### 3.3.2.4. Zona de Enriquecimiento

La zona de enriquecimiento se caracteriza por la presencia de sulfuros secundarios de cobre, en donde predomina la calcosina por sobre la covelina.

## 3.4. ZONAS MINERALES

Las zonas minerales se forman en base a la mineralización, leyes de cobre total (CuT%) y razones de solubilidad (CuS/CuT) y responde a un objetivo de modelamiento geológico y geometalúrgico (Rojas, 2019). Según el Manual para el mapeo de sondajes geológicos DRT (DERK, 2022), las zonas minerales son las siguientes:

**-Grava Estéril (GRE):** Grava de color gris parda, sin mineralización de oxidados de cobre.

**-Grava Mineralizada Terrosa (GRM-T):** Grava gris amarillenta a gris anaranjada, mineralizada principalmente por copper wad y limonitas con cobre, también puede presentar clastos con arcillas con cobre en plagioclasas.  $\text{CuT}\% \geq 0,1\%$ .

**-Grava Exótica Terrosa (GRX-T):** Grava gris verdosa con presencia de oxidados verdes, se caracteriza por presencia de crisocola, atacamita y en menor medida copper wad y limonitas con cobre. Presenta una débil cementación con crisocola, es fácil de disgregar.  $\text{CuT}\% \geq 0,1\%$ .

**-Grava Exótica (GRX-C):** Grava verde claro debido a la abundante presencia de mineralización de oxidados verdes como la crisocola y atacamita. Su cemento se constituye de crisocola y una matriz de crisocola, copper pitch y atacamita. Es una roca consolidada con  $\text{CuT}\% \geq 0,1\%$ .

**-Lixiviados (LX):** Presencia de limonitas con leyes de  $\text{CuT}\% < 0,2\%$ .

**-Óxidos (OX):** Corresponde a la presencia de oxidados de cobre con leyes de  $\text{CuT}\% \geq 0,2\%$ , sin importar la ocurrencia del mineral. La razón de solubilidad  $\text{CuS}/\text{CuT}$  suele ser mayor a 0,6, sin embargo, puede oscilar entre 0,2 y 0,6 dependiendo de la presencia de oxidados de cobre de baja solubilidad.

**-Mixto (MX):** Corresponde a la presencia de oxidados de cobre y sulfuros con leyes de  $\text{CuT}\% \geq 0,2\%$  y una razón de solubilidad entre 0,2 y 0,6.

**-Sulfuro Secundario Fuerte (SSF):** Corresponde a calcosina más covelina secundarias sobre un 65% del sulfuro total con leyes de  $\text{CuT} \geq 0,2\%$  y razón de solubilidad menor a 0,2.

**-Sulfuro Secundario débil (SSD):** Corresponde a calcosina más covelina secundarias entre un 25% y 65% del sulfuro total con leyes de  $\text{CuT}\% \geq 0,2\%$  y razón de solubilidad menor a 0,2.

**-Sulfuro Secundario de Baja Ley (EST-SSB):** Corresponde a calcosina más covelina secundarias con una presencia menor al 25% del sulfuro total con ley de  $\text{CuT}\% < 0,2\%$ .

**-Sulfuro Primario Bornítico (Bo(-Cpy)):** Corresponde a calcosina más covelina en cantidad menor a 25% con una razón de solubilidad menor a 0,2. Las proporciones bornita y calcopirita son mayores o iguales a 70% de bornita y menor o igual a 30% de calcopirita. La ley de  $\text{CuT}\%$  es  $\geq 0,2\%$ .

**-Sulfuro Primario Calcopirita-Bornita (Cpy-Bo):** Corresponde a calcosina más covelina en cantidad menor a 25% con una razón de solubilidad menor a 0,2. Las proporciones de bornita y calcopirita son similares y comprendidas entre 30% y 70%. La ley de CuT% es  $\geq 0,2\%$ .

**-Sulfuro Primario Calcopirítico (Cpy(-Bo)):** Corresponde a calcosina más covelina en cantidad menor a 25% con una razón de solubilidad menor a 0,2. Las proporciones de bornita y calcopirita mayores o iguales a 70% de calcopirita y menores o iguales a 30% de bornita. La ley de CuT% es  $\geq 0,2\%$ .

**-Sulfuro Primario Calcopirítico-Pirítico (Cpy-Py):** Corresponde a calcosina más covelina en cantidad menor a 25% con bornita ausente o en muy baja cantidad. Las proporciones de calcopirita y pirita son hasta un 100% de calcopirita y pirita menor a 80%. La ley de CuT% es  $\geq 0,2\%$ .

**-Sulfuro Primario Pirítico (Py):** Corresponde a calcosina más covelina en cantidad menor a 25% y pirita mayor o igual a 80%. La ley de CuT es  $< 0,2\%$ .

**-Sulfuro Primario de Baja Ley (EST-SPB):** Corresponde a sulfuros primarios (calcopirita y/o bornita) con contenidos de calcosina y covelina menores a 25% con respecto a los sulfuros totales. La ley de CuT es  $< 0,2\%$ .

En la Tabla 1.1 se resumen las zonas minerales:

**Tabla 1.1: Resumen de las zonas minerales presentes en Radomiro Tomic con sus definiciones.**

Zona Mineral	Código	Descripción	CuT%
Grava Estéril	GRE	Grava sin mineralización	
Grava Mineralizada Terrosa	GRM-T	Grava con copper wad y limonitas	≥ 0,1%.
Grava Exótica Terrosa	GRX-T	Grava con crisocola, atacamita y en menor medida copper wad, débil cementación de crisocola	≥ 0,1%.
Grava Exótica	GRX-C	Grava con crisocola y atacamita y matriz de crisocola, copper pitch y atacamita	≥ 0,1%.
Lixiviados	LX	Limonitas indígenas	< 0,2%.
Óxidos	OX	Oxidados de cobre	≥ 0,2%
Mixto	MX	Oxidados de cobre y sulfuros	≥ 0,2%,
Sulfuro Secundario Fuerte	SSF	Calcosina y covelina secundaria mayor a 65%	≥ 0,2%,
Sulfuro Secundario Débil	SSD	25-65% de calcosina y covelina	≥ 0,2%,
Sulfuro Secundario de Baja Ley	EST-SSB	Menos de 25% de calcosina y covelina	< 0,2%
Sulfuro Primario Bornítico	Bo(-Cpy)	Menos de 25% de calcosina y covelina. Predominancia de bornita	≥ 0,2%,
Sulfuro Primario Calcopirita-Bornita	Cpy-Bo	Menos de 25% de calcosina y covelina. Proporciones entre bornita y covelina son similares	≥ 0,2%,
Sulfuro Primario Calcopirítico	Cpy(-Bo)	Menos de 25% de calcosina y covelina. Predominancia de calcopirita	≥ 0,2%,
Sulfuro Primario Calcopirítico-Pirítico	Cpy-Py	Menos de 25% de calcosina y covelina. Predominancia de calcopirita y pirita, ausencia de bornita	≥ 0,2%,
Sulfuro Primario Pirítico	Py	Menos de 25% de calcosina y covelina. Predominancia de pirita	< 0,2%
Sulfuro Primario de Baja Ley	EST-SPB	Menos de 25% de calcosina y covelina.	< 0,2%

## 4. GEOLOGÍA DE CARMEN ESTE

En el sector de Carmen Este, las litologías que afloran son el Complejo Intrusivo Chuquicamata al oeste, la Granodiorita Elena al este y la Formación Tuina al centro, de elongación norte sur, la cual se encuentra como *roof pendant* entre las fallas principales Mesabi de rumbo NNE y Estanque Blancos de rumbo NE.

### 4.1. Alteración

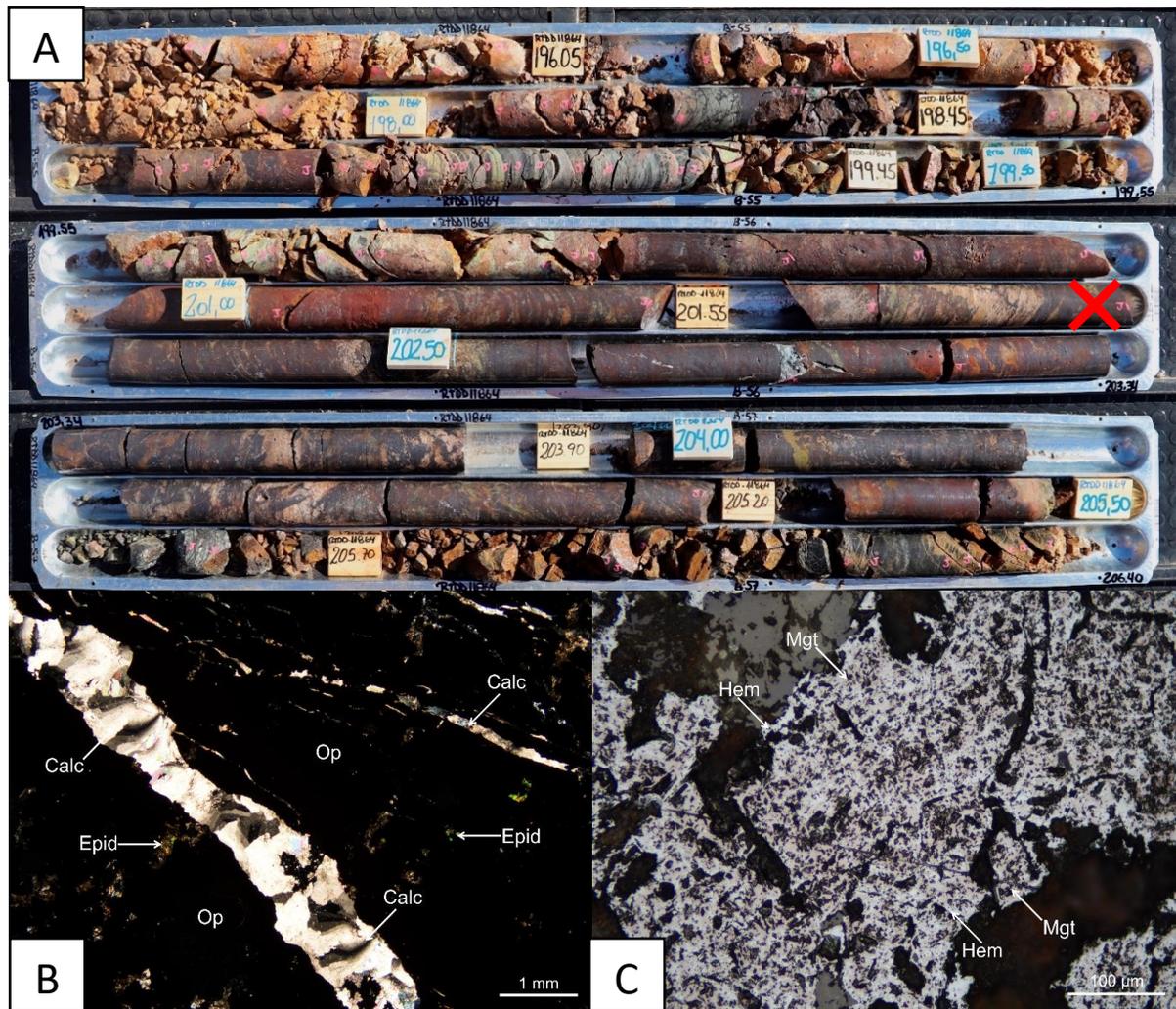
En el sector de Carmen Este las alteraciones dominantes son la Potásica de Fondo (68,8%) seguida de la Clorítica Marginal (24,9%) y en menor cantidad la Sericita Selectiva (3,6%). La alteración Potásica de Fondo se distribuye principalmente en el pórfido mineralizado, mientras que la Clorítica Marginal en la roca caja, sin embargo, no son exclusivas de cada litología, ya que ambas alteraciones pueden estar presentes a ambos lados del contacto entre ambas litologías, pero sin alejarse mucho de él. En profundidad, hacia el sector más este, hay evidencias de una alteración tipo skarn alojada en rocas de la Formación Tuina, las denominadas Andesitas en este trabajo, principalmente en los Metasedimentos.

#### 4.1.1. Alteración tipo skarn

La alteración tipo skarn en el área de estudio se ve evidenciada solamente en un sondaje de la base de datos a una profundidad aproximada de 200m y 350m. Dicha alteración se localiza principalmente en los Metasedimentos y en menor medida en las Andesitas, caracterizada por tener granates del tipo andradita y grosularia visibles a simple vista con tamaños de hasta 0,5 cm. De manera más específica, las rocas formadas por las alteraciones se clasifican como skarn, skarn de magnetita y skarn de granate (Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4).

La mineralización presente en el skarn de magnetita se compone principalmente de minerales opacos, tales como magnetita en mayor abundancia y hematita, también se encuentran trazas de pirita, calcopirita, bornita, calcosina y covelina en cantidades menores o iguales a 1%. Los

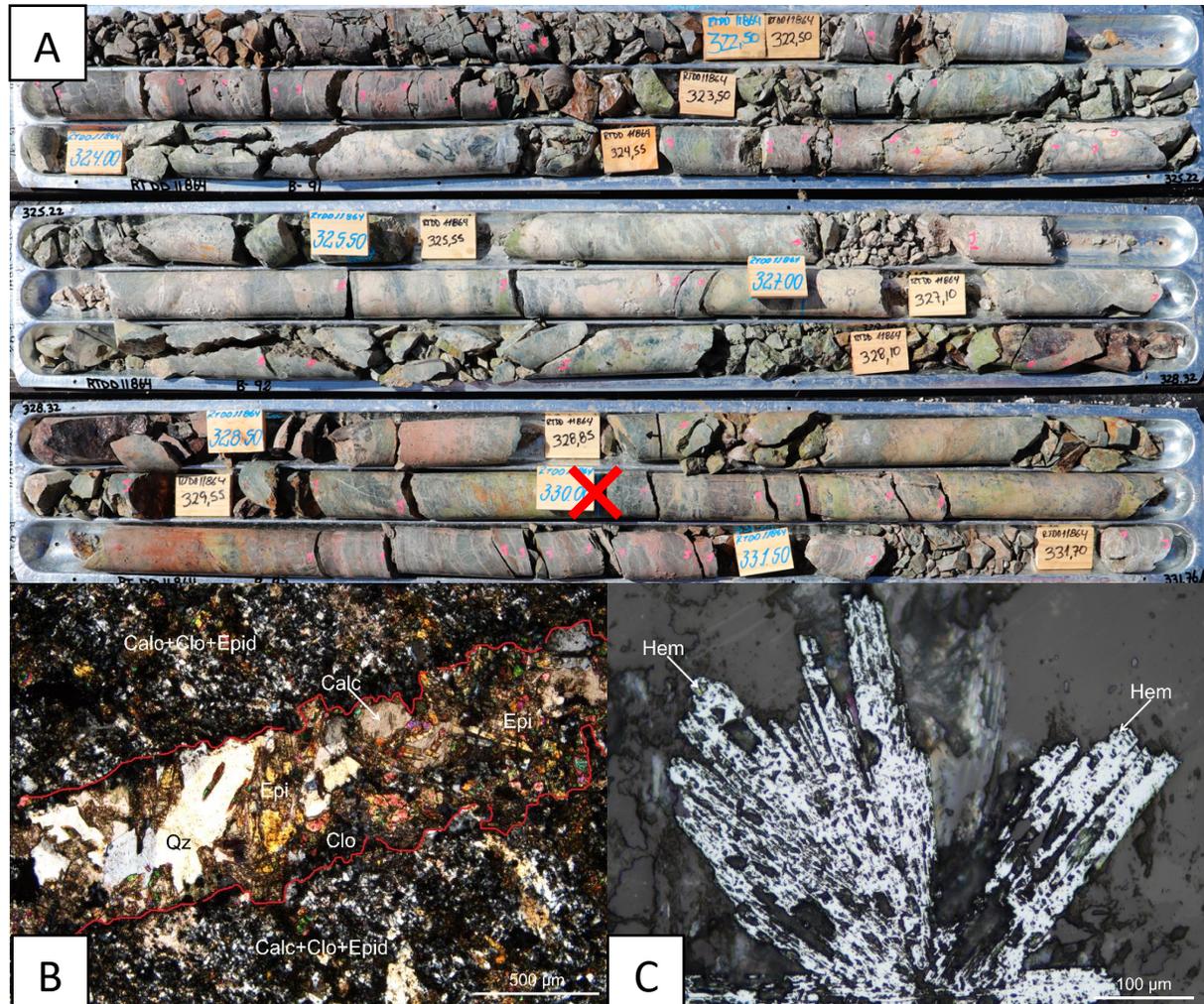
minerales de alteración presentes son calcita, epidota, actinolita, clorita, limonitas, yeso, biotita secundaria y granates, siendo la epidota, clorita y calcita los minerales más abundantes.



**Figura 4.1: Skarn de magnetita. (A)** Sondaje RTDD11864 (195,6-206,4m) con alteración tipo skarn, el tono rojizo es otorgado por la presencia de magnetita y hematita en donde la cruz roja muestra la ubicación de las muestras (201,94-202m). **(B)** Corte transparente (aumento 2x) con vetas de calcita presente como relleno de intersticios y fracturas, asociada a epidota. La epidota también se presenta como relleno. **(C)** Pulido (aumento 20x) con mineralización de magnetita de manera masiva con reemplazo en caries y debilidades por magnetita.

Macroscópicamente, el skarn de granate se presenta con tonos pardos con tintes blanquecinos y tonos metálicos dorados y azulinos. La roca es de textura granoblástica con cristales de granates y menor presencia de yeso, cuarzo intersticial y limonitas, también se observa mineralización de pirita y covelina responsables de los tonos metálicos. Microscópicamente se observan cristales subhedrales de andradita y grosularia presentando de manera intersticial y en fracturas rellenos de

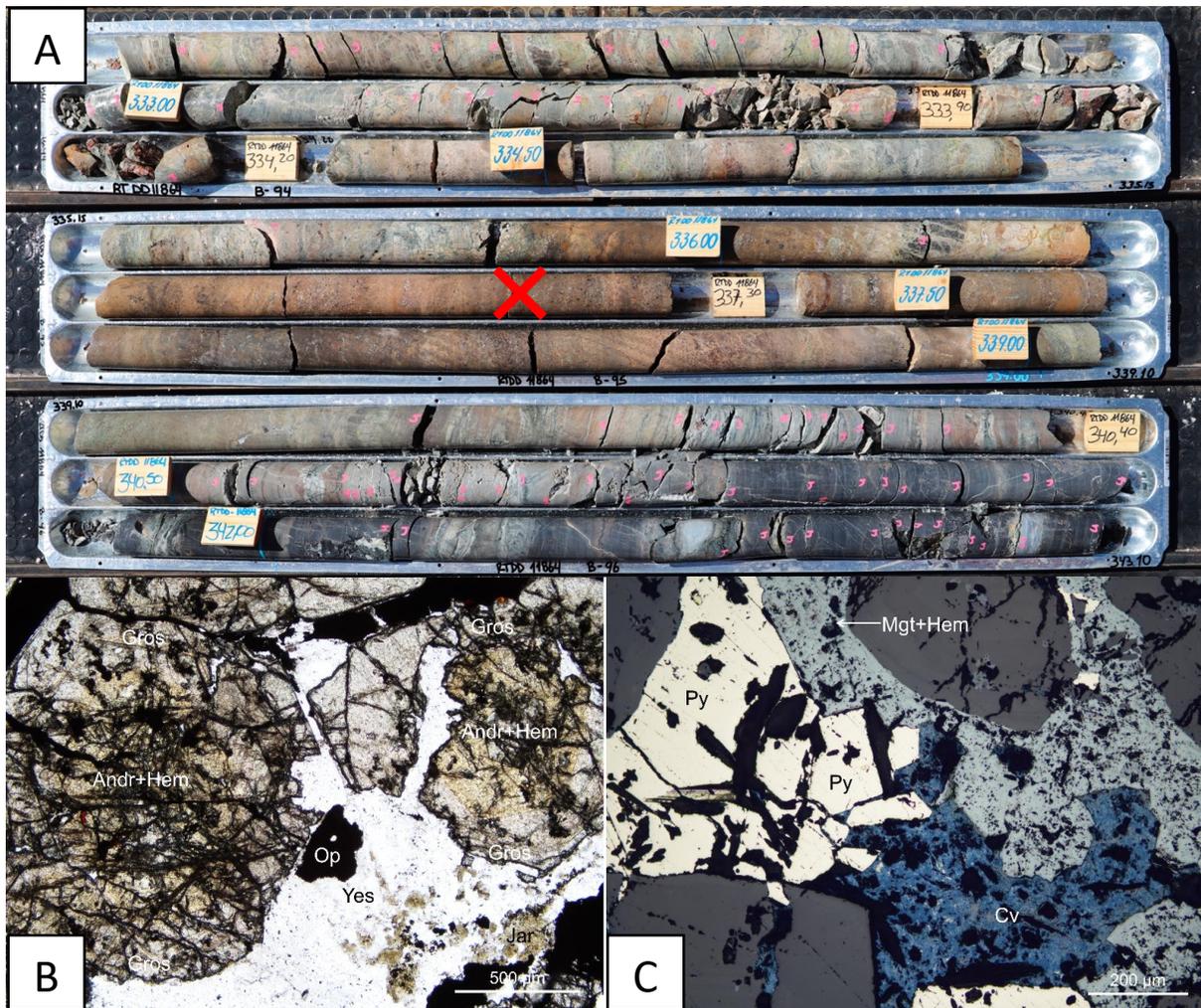
cuarzo secundario, yeso, clorita-esmectita y jarosita, además de mineralización de pirita-calcopirita-covelina y magnetita-hematita-goetita entrecrecidas con granate.



**Figura 4.2:** Skarn: (A) Sondaje RTDD11864 (321,80-331,76m) con alteración tipo skarn, en donde la cruz roja muestra la ubicación de las muestras (330-330,07m). (B) Corte transparente (aumento 4x) con vetillas de hasta 0,8 mm rellenas de epidota, calcita, clorita y cuarzo secundario en nicoles cruzados, que se presentan de manera sinuosa, discontinuas y sin halo de alteración. (C) Pulido (aumento 20x) con mineralización disseminada de hematita tipo especularita con hábito acicular a tabulares de hasta 0,3mm, se encuentra de forma disseminada como también en relleno de fracturas asociado a limonitas.

El skarn se visualiza macroscópicamente de un tono verdoso con tonos amarillentos y de textura granoblástica. Se encuentra hematita de manera disseminada, además de fracturas con rellenos de calcita y yeso. Microscópicamente se encuentran agregados de epidota entrecrecidos con calcita, clorita y cuarzo secundario y una débil superposición de arcillas. Se observan vetillas de calcita,

epídota y en menor medida clorita y cuarzo secundario. Fracturas posteriores rellenas con calcita, yeso y de manera subordinada limonitas y cuarzo secundario.



**Figura 4.3:** Skarn de granate. (A) Sondaje RTDD11864 (331,76-343,10m) con alteración tipo skarn en Metasedimentos con presencia de granates tipo andradita y grosularia en donde la cruz roja muestra la ubicación de las muestras: 337,08-337,71m. (B) Corte transparente (aumento 4x) con cristales de granates con grosularia en los bordes y andradita en el centro con yeso y jarosita como rellenos. (C) Pulido con mineralización de pirita diseminada entrecrecida con magnetita y hematita, las cuales se encuentran envueltas por covelina.



## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 5.1. Revisión de base de datos

La base de datos utilizada para este trabajo es la que se utiliza para el modelamiento, actualizada a la fecha 17 de enero de 2023, la cual cuenta con información del tipo *collar*, *survey*, *assay*, además de litología, zonas minerales y alteración. Dentro de ella hay sondajes del tipo diamantino y de aire reverso.

### 5.2. Confección de base de datos

Para su confección se realizan los siguientes filtros según el tipo de modelo:

- Modelo litológico: se descartan los sondajes sin información de litología.
- Modelo de zona mineral: se descartan los sondajes sin información de zona mineral.
- Modelo de alteración: se descartan los sondajes sin información de alteración.

### 5.3. Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos es una técnica estadística que permite estudiar la información de índole espacial, a través del cual, es posible identificar asociaciones y patrones en el comportamiento de las variables geográficas, y hace posible la identificación de distribuciones atípicas en el espacio (Bolívar, 2015).

El análisis se realizó principalmente con el software Minitab para la confección de gráficos y también con el apoyo de Microsoft Excel para el tratamiento y depuración de la información.

#### 5.3.1. Localización de valores atípicos (*outliers*)

Los valores atípicos corresponden a datos numéricamente distantes del resto. Para la identificación de dichos valores se utilizó el método de Tukey, el cual considera como valor atípico débil

cualquiera que se encuentre a 1,5 veces el rango intercuartil sobre el tercer cuartil o bajo el primer cuartil y considera como valor atípico extremo a cualquiera que se encuentre a 3 veces esa distancia. La Tabla 2.1 indica la cantidad de dichos valores y la Figura 5.1 muestra su localización para los tipos de litología principales.

**Tabla 2.1: Valores atípicos para las principales litologías.** Q1: cuartil 1; Q3: cuartil 3; N: número total de datos.

Litología	Q1	Q3	Rango intercuartil	Rango intercuartil x3	Límite valores atípicos	Cantidad de valores atípicos	Valores atípicos Superiores (%)	N
PFE	0.04	0.16	0.12	0.37	0.54	81	0.03	2616
GDE	0.08	0.28	0.20	0.61	0.89	28	0.04	629
AND	0.00	0.03	0.03	0.08	0.11	33	0.11	288
MSE	0.00	0.02	0.01	0.04	0.05	10	0.08	132
PFB	0.02	0.09	0.07	0.21	0.30	1	0.02	60
PFF	0.04	0.09	0.05	0.15	0.24	0	0.00	33
DR	0.18	0.55	0.38	1.13	1.69	1	0.04	26

Los gráficos de probabilidad de CuT% para las distintas litologías pueden indicar más de una población de muestras, dependiendo de los cambios de pendiente que haya en los gráficos. En el gráfico de las Andesitas se ve una población con mayor pendiente aproximadamente desde el valor 0,9% de CuT, la cual se debe a que esa litología se encuentra cortada por una zona de Óxidos que aumenta la ley en dicho sector, lo mismo pasa con la Granodiorita Elena y el Pórfido Este a partir de 1,1% y 1% respectivamente. Con respecto a los Metasedimentos, Pórfido Banco y Dioritas es difícil obtener interpretaciones debido a la poca cantidad de datos o a causa de valores bajo el límite de detección como en el caso de los Metasedimentos que también se ve reflejado en la cola inferior de las Andesitas.

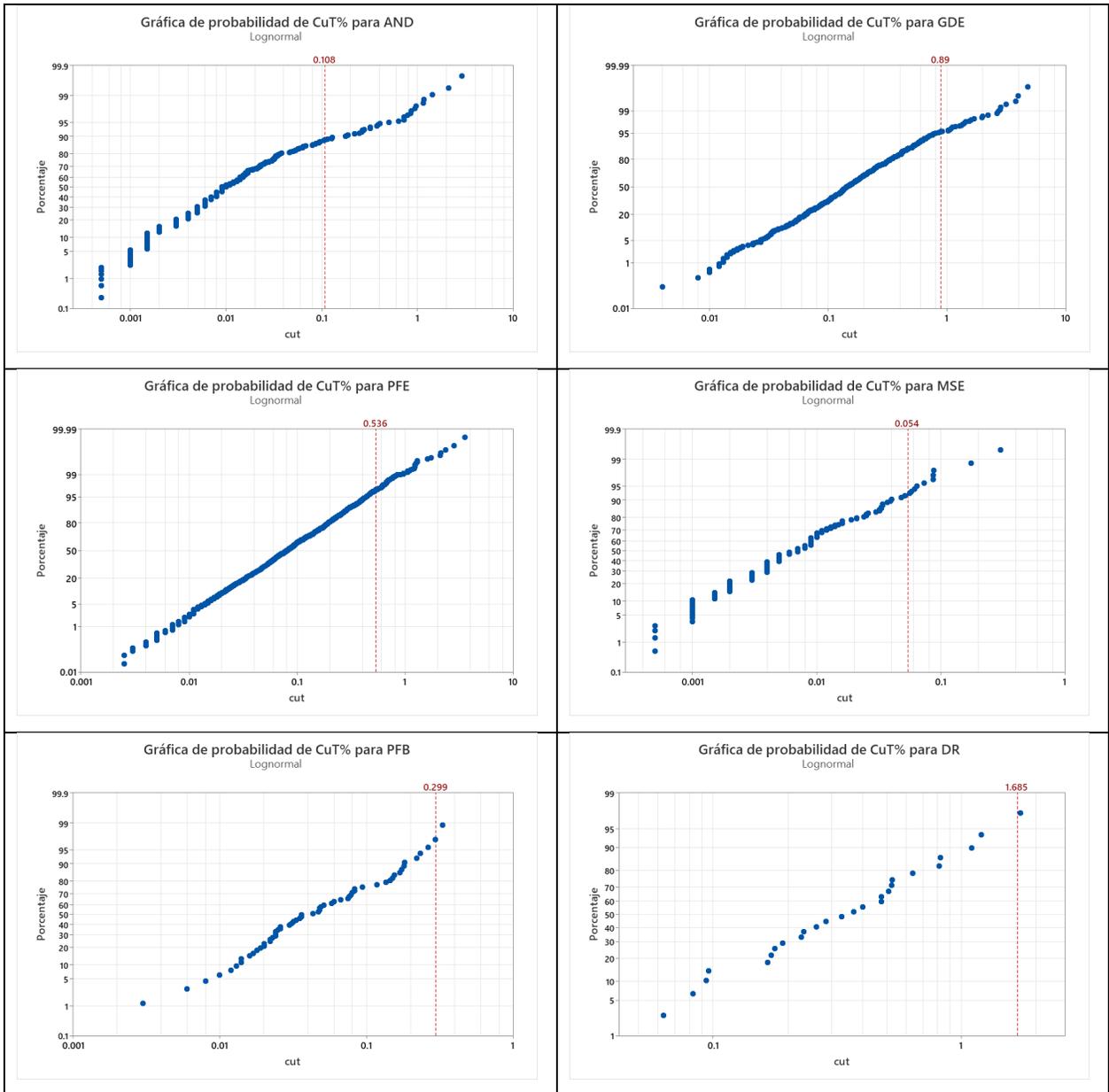


Figura 5.1: Localización de los valores atípicos para las litologías principales presentes en el área de estudio.

### 5.3.2. Estadígrafos básicos

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados de los análisis estadísticos básicos luego de haber eliminado los valores atípicos para las principales litologías del área de estudio.

**Tabla 3.1: Estadígrafos básicos.** Lito: Litología; N: Número de datos; Min: Valor mínimo; Q1: Cuartil 1; Q3: Cuartil 3; Max: Valor máximo; IQR: Rango intercuartil;  $\sigma$ : Desviación estándar;  $\sigma^2$ : Varianza.

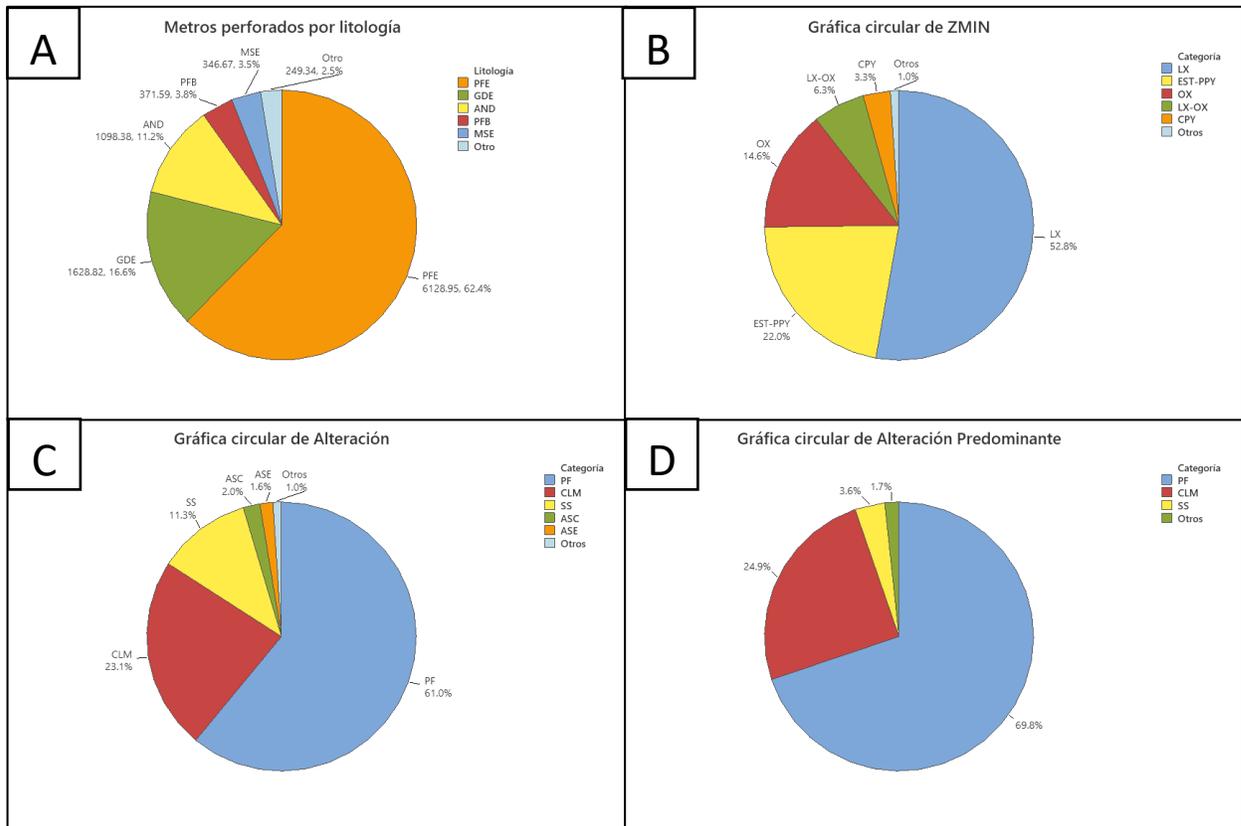
Variable	Lito	N	Media	Min	Q1	Mediana	Q3	Max	IQR	$\sigma$	$\sigma^2$
CuT%	PFE	2535	0.112	0.003	0.039	0.077	0.152	0.535	0.113	0.104	0.011
	GDE	1194	0.190	0.004	0.073	0.136	0.246	0.883	0.173	0.165	0.027
	AND	255	0.016	0.001	0.004	0.008	0.018	0.108	0.014	0.020	0.000
	MSE	121	0.009	0.001	0.003	0.005	0.011	0.048	0.008	0.010	0.000
	PFB	59	0.069	0.003	0.022	0.036	0.083	0.295	0.061	0.070	0.005
	PFF	33	0.065	0.017	0.036	0.047	0.087	0.194	0.051	0.046	0.002
	DR	25	0.409	0.063	0.174	0.330	0.525	1.201	0.351	0.309	0.095

Posterior a la eliminación de los valores atípicos, se realizan distintos gráficos (circulares, de barras e histogramas) para obtener más información acerca de la distribución de los datos.

### 5.3.3. Gráficos Circulares

Los gráficos circulares o de torta corresponden a una representación de datos en donde se divide un círculo en función de las distintas entradas, en este caso las litologías, zonas minerales y alteraciones (Figura 5.2).

La litología predominante en el área de estudio corresponde al Pórfido Este con un 62,4% de los datos, seguido de la Granodiorita Elena con un 16,6%. Dentro de las zonas minerales, la que tiene mayor distribución corresponde a la zona de Lixiviados (LX) con un 52,8% seguido de la zona Estéril-Pirítico Primario (EST-PPY) con un 22% y después la zona de Óxidos con un 14,6%. Finalmente, con respecto a las alteraciones, la Potásica de Fondo (PF) tiene una alta presencia con un 69,8% seguido de la Clorítica Marginal (CLM) con un 24,9%.



**Figura 5.2: Gráficas circulares.** (A) Gráfica circular que representa la cantidad de metros perforados por litología cuya cantidad es superior al 1% del total, también se muestra el porcentaje de cada litología. (B) Gráfica circular de porcentajes de zonas minerales cuya cantidad es superior al 1% del total. (C) Gráfica circular de alteración contemplando todos los porcentajes de alteraciones cuya cantidad es superior al 1%, La alteración “otros” corresponde a: Cuarzo Sericita Pervasiva, Argílica Avanzada, Early Dark Micaceous, Sericita Gris Verde y Cuarzo Sericita Pervasiva Calcopirítica. (D) Gráfica circular que contempla solamente las alteraciones predominantes para cada tramo de sondaje.

### 5.3.4. Gráficos de barras

Los gráficos de barras corresponden a representaciones mediante columnas según categorías o variables que se quieran comparar, en donde su la altura representa el valor de la variable en cuestión. Se realiza un gráfico de este tipo para ver el porcentaje de CuT y CuS en cada litología (Figura 5.3).

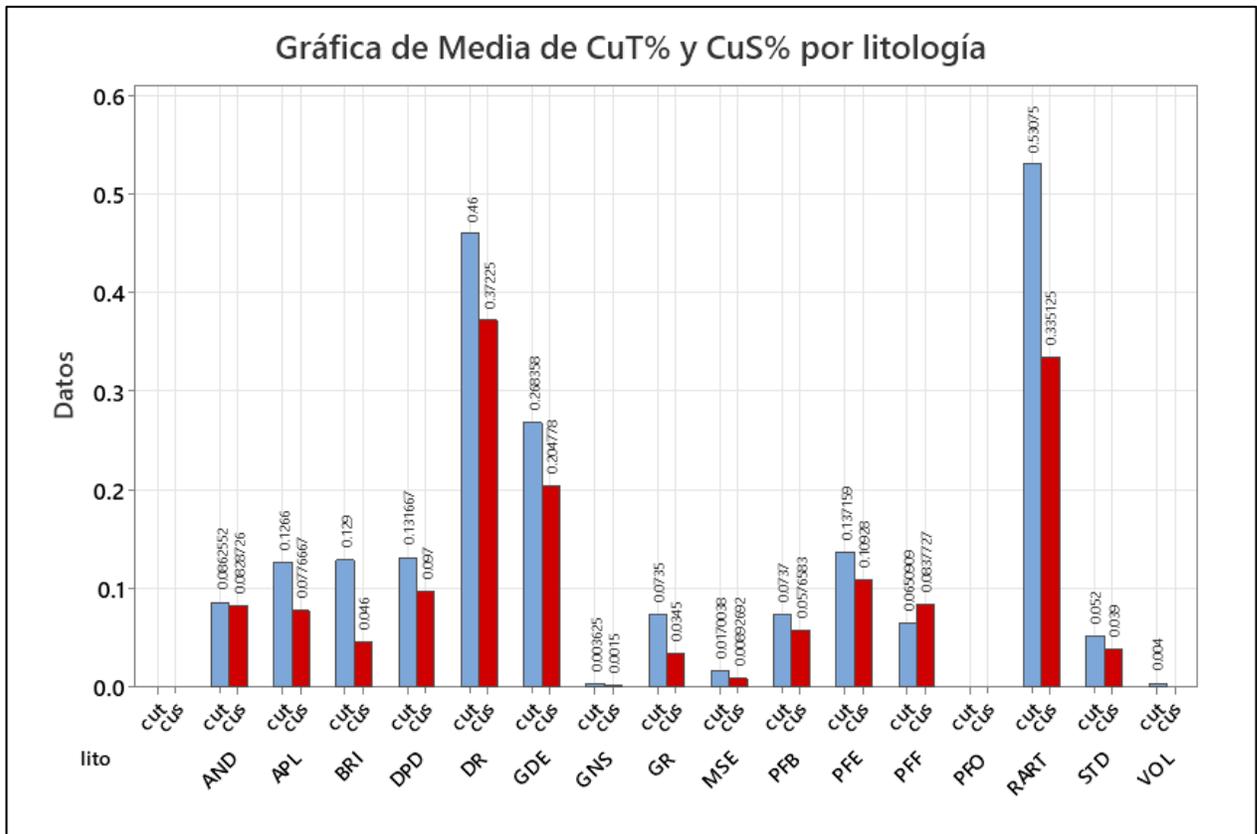
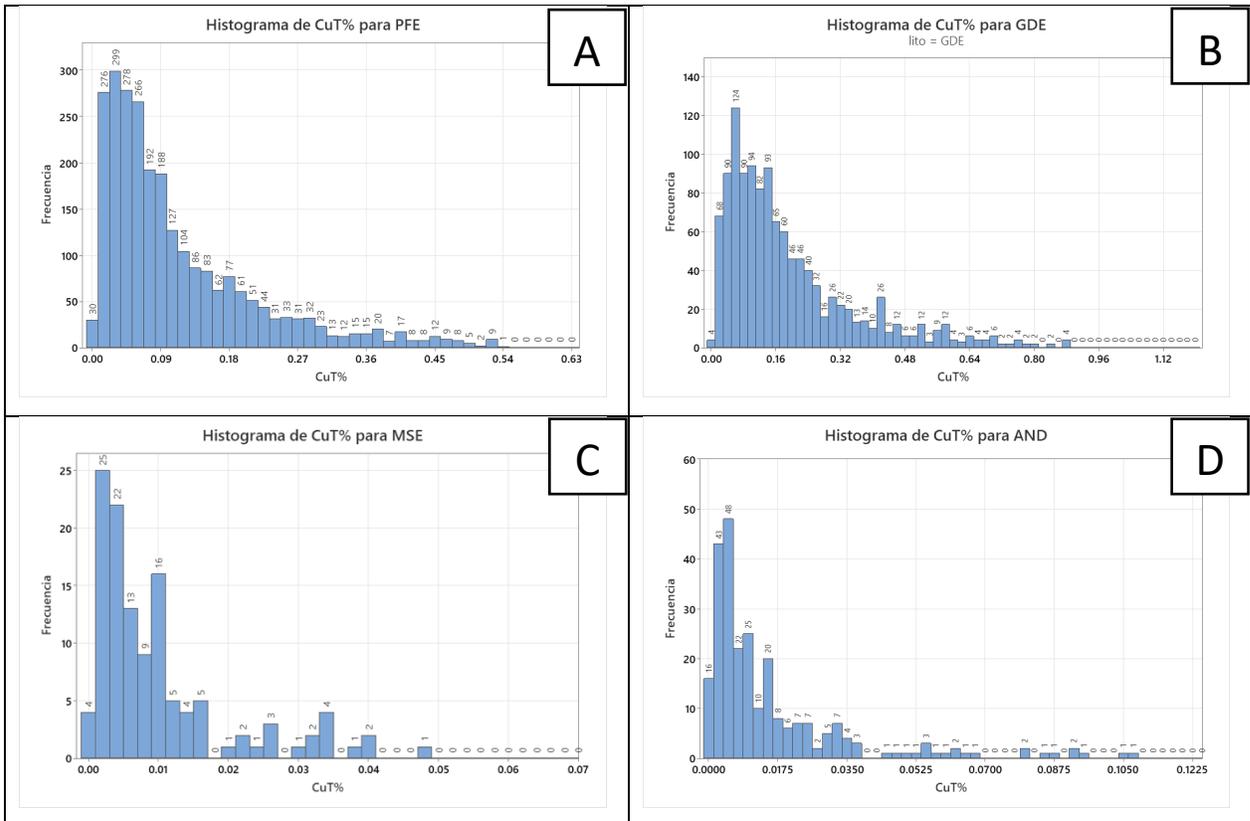


Figura 5.3: Gráfico de barras de CuT% y CuS% por litología.

### 5.3.5. Histogramas

Los histogramas corresponden a representaciones gráficas de distribución de frecuencias, también puede ser en porcentajes, cuyas alturas representan las frecuencias de cada intervalo. Se realizan estos gráficos para las principales litologías presentes (Figura 5.4) y poder ver tendencias en las leyes de cobre, sin embargo, algunas litologías no se representan en los histogramas debido a la poca cantidad de datos.

A partir de los gráficos se extrae que ninguna litología en específico contiene altos contenidos de cobre y la mayoría de los datos se concentran en valores cercanos a 0,1% CuT para el Pórfido Este, Granodiorita Elena y los Mestadimentos e inferiores a 0,01% CuT para las Andesitas.



**Figura 5.4: Histogramas para las principales litologías del área de estudio. (A)** Histograma de CuT% para el Pórfido Este que muestra una población hacia la cola del histograma con leyes cercanas a 0,4%. **(B)** Histograma de CuT% para la Granodiorita Elena con una sola población. **(C)** Histograma de CuT% para los Metasedimentos. **(D)** Histograma de CuT% para las Andesitas.

## 5.4. Análisis de deriva

La variable en cuestión, CuT%, se distribuye en un espacio tridimensional, por lo cual es importante saber cómo se comporta en dicho espacio y obtener tendencias.

### 5.4.1. Análisis general

Para obtener una idea general y rápida del comportamiento del cobre en un espacio tridimensional, se generan gráficos de deriva en las coordenadas X, Y y Z para ver cómo se distribuye en ellas.

El análisis de deriva en la coordenada X (Figura 5.5) indica que a medida que uno se va alejando del rajo, hacia el E, la ley de CuT% tiende a disminuir de manera general, sin embargo, se observa que aproximadamente en la coordenada X=4800 ocurre una gran disminución en la ley, debido a que en dicha coordenada comienza a aparecer la Granodiorita Elena que corresponde a la roca caja de la mineralización. A pesar de que hay zonas de óxidos en la Granodiorita Elena que aumentan la ley promedio, están cercanas al pórfido mineralizado, por lo que al seguir en dirección este, las leyes de cobre van a disminuir.

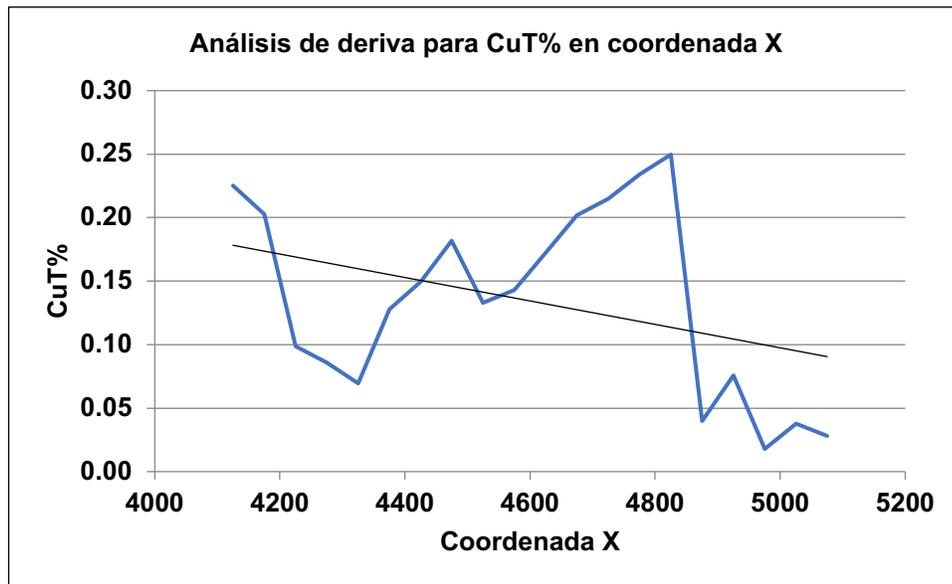
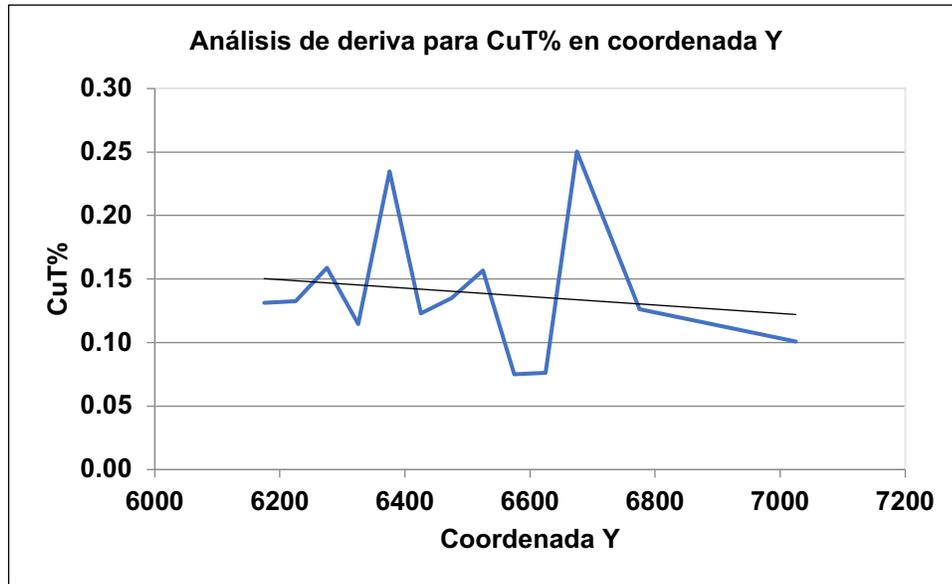
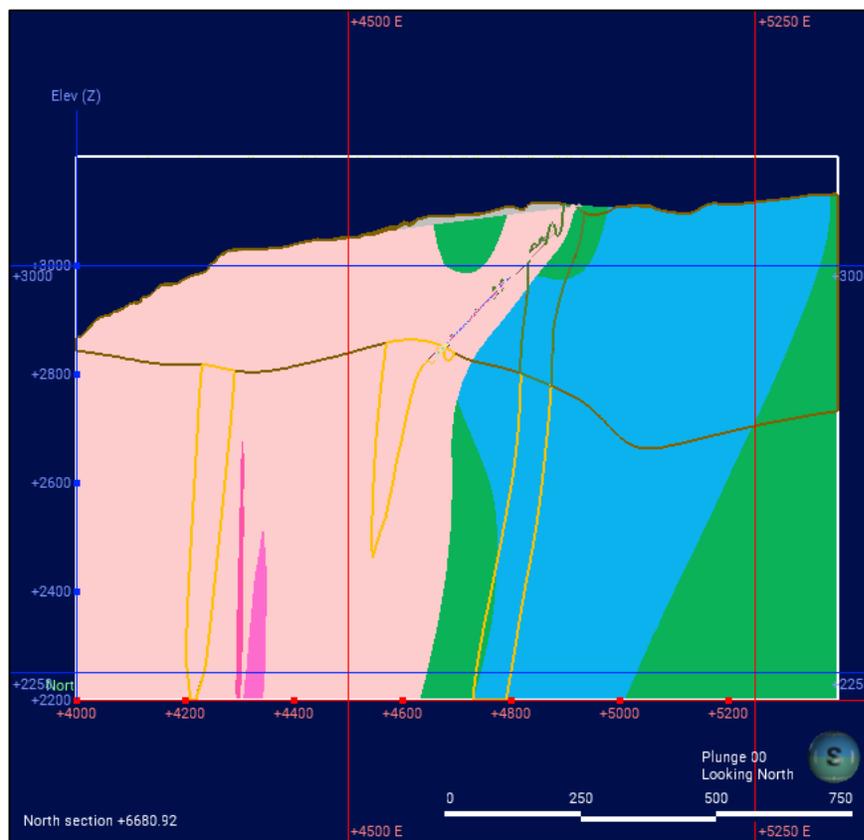


Figura 5.5: Análisis general de deriva en la coordenada X (este) para el área de estudio.

El análisis de deriva en la coordenada Y (Figura 5.6) no indica una gran variación en la norte-sur, sin embargo, se observan 2 picks relevantes en el gráfico: aproximadamente en las coordenadas Y=6400 e Y=6700 con leyes de 0,23 y 0,25 respectivamente. Integrando la información los gráficos de las figuras 5.5 y 5.6 con el modelo de Litologías y Zonas Mineral se observa que los picks de X=4800 e Y=6700 corresponde a un cuerpo de zona mineral tabular (Figura 5.7) de óxidos y calcopirita en profundidad.



**Figura 5.6: Análisis general de deriva en la coordenada Y (norte) para el área de estudio.**



**Figura 5.7: Sección transversal en coordenada Y=6680. En la figura se observa la mineralización en X=4800.**

El análisis de deriva en la coordenada Z (Figura 5.8) indica que la ley de CuT% tiende a bajar en profundidad, debido a que ya no se encuentran las zonas de óxidos más superficiales y en profundidad no se encuentran sulfuros como si ocurre en el centro del rajo Radomiro Tomic, en donde está el núcleo bornítico.

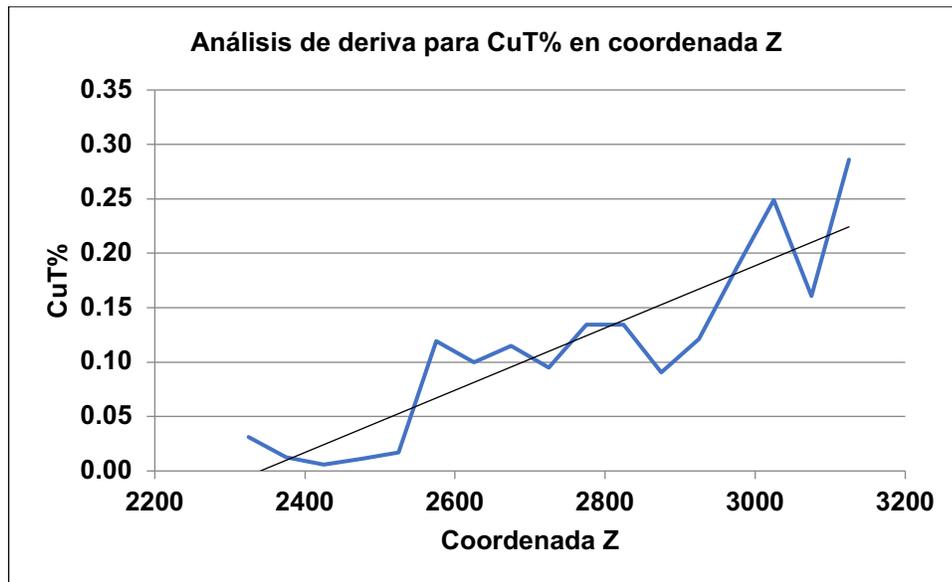


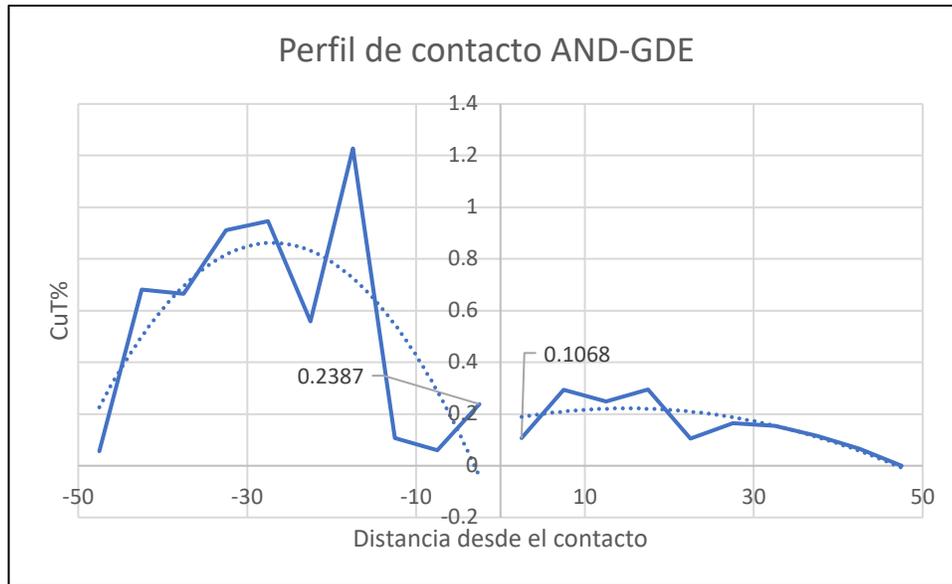
Figura 5.8: Análisis general de deriva en la coordenada Z (profundidad) para el área de estudio.

## 5.5. Análisis de contacto

El gráfico de análisis de contacto indica cómo varía la ley de CuT% a medida que uno se va acercando al contacto entre dos unidades. A partir de cómo se comporta la ley al realizar la transición entre unidades, se pueden definir dos tipos de contactos: blandos y duros. Los contactos blandos se caracterizan por no presentar grandes variaciones en la ley entre ambas unidades, mientras que los contactos duros se caracterizan por presentar grandes variaciones entre ambas unidades. Para la realización de este análisis, se utiliza una distancia de 50m al contacto y evaluándose la variable cada 5m para los contactos entre las unidades principales.

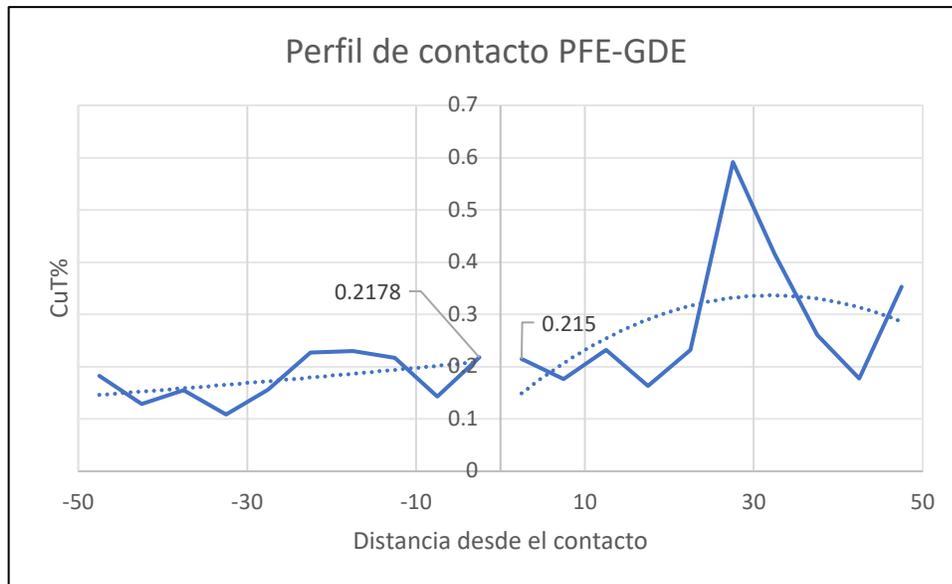
El perfil de contacto entre la Andesita y la Granodiorita Elena (Figura 5.9) muestra que hay zonas con mayor ley, a unos 30m del contacto, sin embargo, cercano al contacto no hay valores

importantes de ley. Por el lado de la Granodiorita Elena, los valores de ley son muy bajos (no mayores a 0,3% CuT) y que a medida que la distancia al contacto aumenta, las leyes tienden a cero debido a que es una unidad estéril.

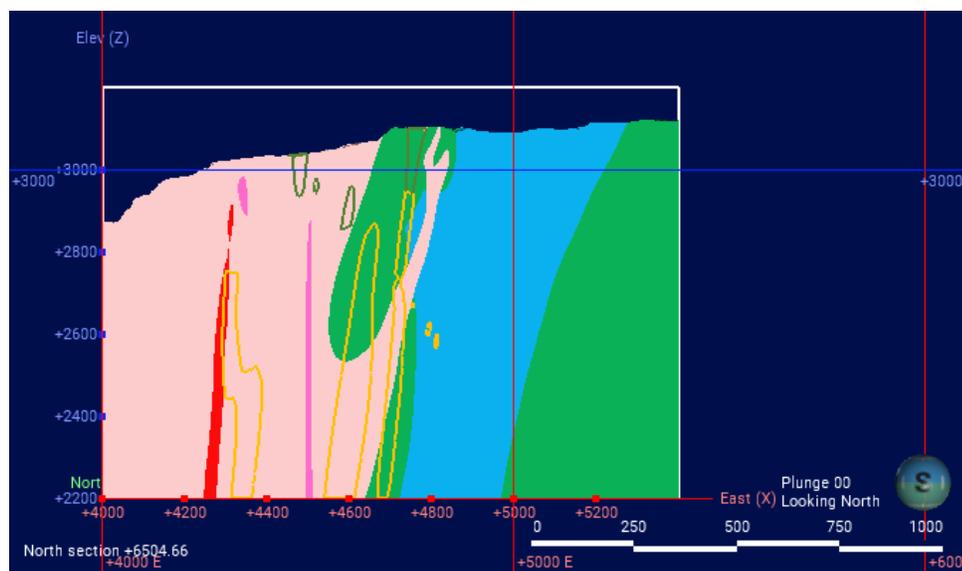


**Figura 5.9: Perfil de contacto entre Andesitas y Granodiorita Elena.** Se realiza a una distancia de 50m cada 5m.

El perfil de contacto entre el Pórfido Este y la Granodiorita Elena (Figura 5.10) muestra que la ley en la primera unidad se mantiene relativamente constante con valores cercanos a 0,2% CuT. Por otra parte, la Granodiorita Elena igual tiene valores cercanos a 0,2% CuT, pero con un valor alto de casi 0,6% CuT a casi 30m del contacto, el cual se explica debido a una zona de óxidos cercana a la superficie y otra de calcopirita más en profundidad (Figura 5.11).

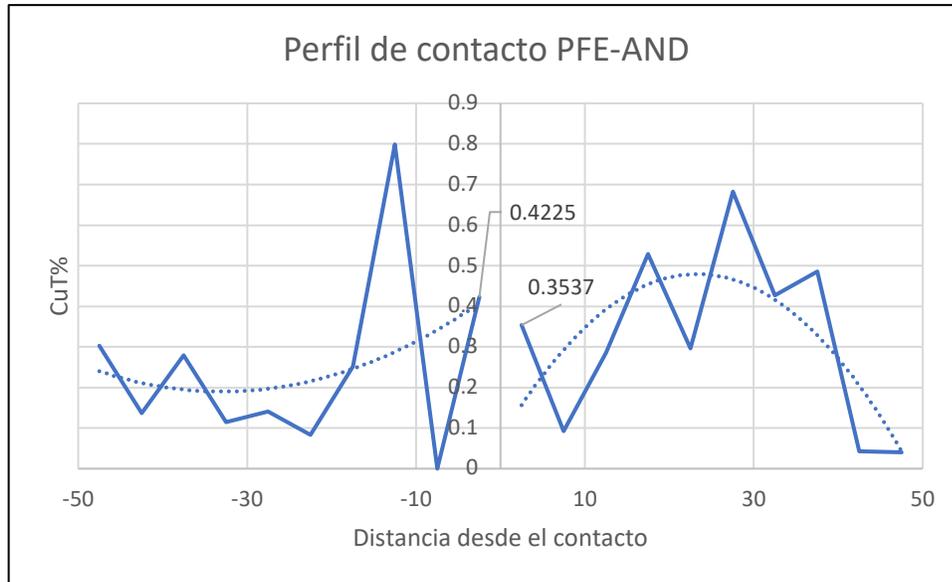


**Figura 5.10: Perfil de contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena.**  
Se realiza a una distancia de 50m cada 5m.

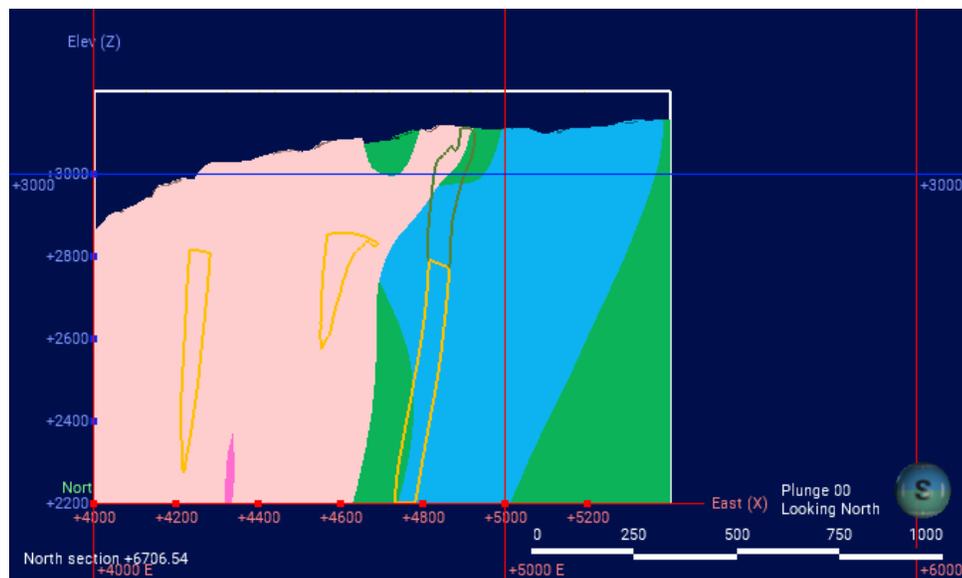


**Figura 5.11: Zona de contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena en coordenada Y=6504.**

El perfil de contacto entre el Pórfido Este y la Andesita (Figura 5.12) muestra valores más elevados en la Andesita, a pesar de que en la primera litología se observa un valor alto de 0,8% CuT, ya que ambas litologías en el contacto y cercano a él son cortadas por zonas de óxidos y de calcopirita en profundidad (Figura 5.13).



**Figura 5.12: Perfil de contacto entre Pórfido Este y Andesitas.** Se realiza a una distancia de 50m cada 5m.



**Figura 5.13: Zona de contacto entre Pórfido Este y Andesitas en coordenada Y=6706.**

Los 3 contactos se pueden clasificar como contactos blandos. El valor 0 en el contacto PFE-AND se debe a falta de datos en ese intervalo.

## **6. MODELO GEOLÓGICO DE CARMEN ESTE**

### **6.1. Modelamiento implícito**

El modelamiento implícito corresponde a la creación de superficies, ya sean fallas, litologías, alteraciones, zonas minerales, etc, de manera automatizada a partir de datos geológicos. El modelamiento implícito se considera como el método manual tradicional. Las ventajas del modelamiento implícito son la rapidez de modelamiento y que ellos se van actualizando de manera automática a medida que se agregan o modifican datos.

### **6.2. Tipos de contactos**

Para crear sólidos en un modelo geológico, se necesita otorgarle a cada unidad un tipo de contacto y una cronología, la cual tiene que ser la real, para que así el software pueda crear las relaciones de contacto de manera correcta. Los tipos de contacto no necesariamente tienen que ser los reales, ya que algunas relaciones pueden facilitar el modelamiento, sobre todo en el caso del modelamiento de zonas minerales y alteraciones, ya que, no son litologías de por sí.

#### **6.2.1. Depósito**

Las superficies de contacto tipo depósito tienden a tener formas planares, con la litología primaria en el lado joven. Los volúmenes creados con esta herramienta no cortan los volúmenes más antiguos, por lo que siguen la forma de las unidades previas.

#### **6.2.2. Contacto erosivo**

Las superficies de contacto erosivos se comportan de manera similar a las superficies de depósitos, con formas planares, sin embargo, la diferencia clave es que los volúmenes creados cortan a todas las unidades previas siguiendo el plano de contacto.

### 6.2.3. Intrusión

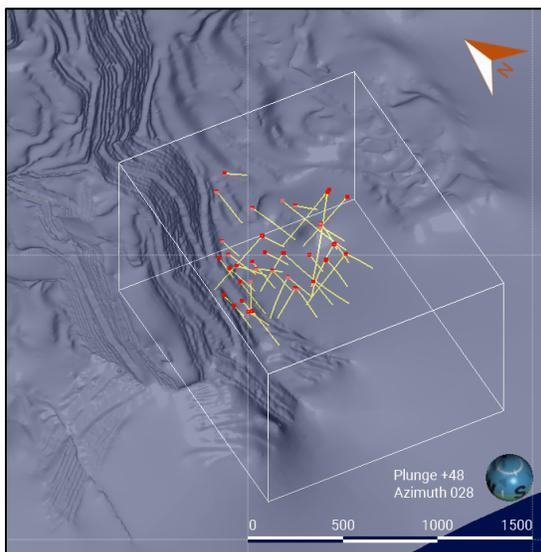
Las superficies de contacto intrusivas son de forma más redondeada o anulares, en la cual se definen dos parámetros: litología interior y exterior, en donde la primera corresponde a la litología que intruye al resto, la cual elimina las litologías existentes previamente y las reemplaza. De manera general, la litología exterior se define como desconocida o “*Unknown*” para que el software no elimine otras litologías.

### 6.3. Dimensión

Los límites de box de trabajo (Tabla 4.1) para la realización de los modelos litológico, de zona mineral y alteración, se definen en base a la ubicación de los sondajes en el área de estudio (Figura 6.1).

**Tabla 4.1: Límites del box de trabajo en coordenadas locales.**

	Coordenada mínima	Coordenada máxima
Coordenada X	4000	5400
Coordenada Y	5600	7300
Coordenada Z	2200	3200



**Figura 6.1: Box de trabajo.** Collares están representados con cuadrados rojos y trazas de sondajes en amarillo en software Leapfrog Geo con superficie de topografía en color gris.

## 6.4. Base de datos

Para el modelamiento se utilizaron la base de datos de la campaña de sondajes realizada en el sector Carmen Este, además de ser complementada con datos obtenidos desde Xilab.

### 6.4.1. Cantidad de sondajes

En total se tiene una cantidad de 42 sondajes con información litológica, de zona mineral y/o de alteración, sin embargo, no todos los sondajes tienen los 3 campos de interés, los cuales se resumen en la Tabla 5.1:

**Tabla 5.1: Cantidad de sondajes clasificados según el tipo de información que contienen.**

	LITO + ZMIN + ALTE	Solo ZMIN	Solo LITO	LITO + ZMIN	Total
Cantidad de sondajes	22	9	9	2	42

## 6.5. Modelo litológico

Para la confección del modelo litológico se utilizan 33 sondajes del total, debido a la ausencia de ese campo en el resto de los sondajes.

Se crea una nueva columna de litología (Figura 6.2), con la herramienta de Leapfrog GEO llamada “*Group Lithologies*”, la cual agrupa las principales litologías presentes en el sector para poder facilitar el proceso de modelamiento.

Para facilitar el proceso de modelamiento y descripción, en el software se crean los contactos entre unidades con sus respectivas temporalidades y no cada unidad de manera individual a excepción de algunas unidades intrusivas de menor tamaño que pueden ser englobadas por solo una unidad o si son las más jóvenes entre todas las litologías presentes. Por otra parte, no es necesario modelar unidades por orden cronológico, ya que, no siempre es lo mas sencillo. En este caso se procede a modelar las unidades que abarcan más espacio como la Granodiorita Elena y el Pórfido Este, luego

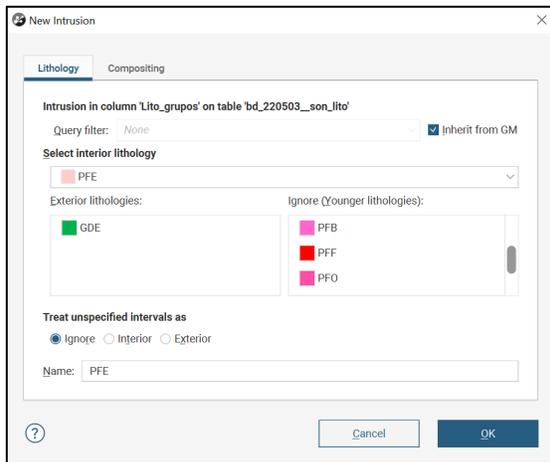
los otros intrusivos más pequeños (Pórfido Oeste, Pórfido Fino y Pórfido Banco) y finalmente las Gravas en contacto erosivo con el resto de las unidades.

Groups		
<input type="checkbox"/>	Code	Colour
▼ <input checked="" type="checkbox"/>	AND	
	MSE	
	AND	
	VOL	
	GNS	
	BRI	
▼ <input checked="" type="checkbox"/>	DR	
	DR	
	APL	
> <input checked="" type="checkbox"/>	GDE	
> <input checked="" type="checkbox"/>	GR	
> <input checked="" type="checkbox"/>	PFB	
> <input checked="" type="checkbox"/>	PFE	
> <input checked="" type="checkbox"/>	PFF	
> <input checked="" type="checkbox"/>	PFO	
> <input checked="" type="checkbox"/>	RART	
> <input checked="" type="checkbox"/>	SI	

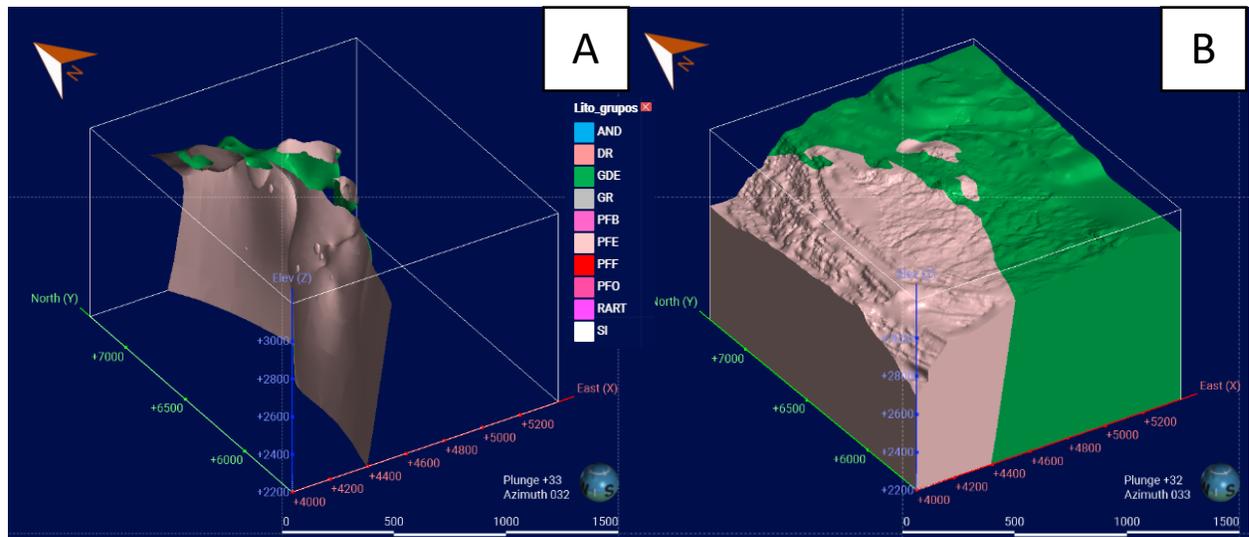
Figura 6.2: Columna de litologías agrupadas.

### 6.5.1. Contacto PFE-GDE

Las dos principales unidades que se encuentran en la zona de estudio son el Pórfido Este y la Granodiorita Elena, la cuales se distribuyen al oeste y este respectivamente. Temporalmente, el Pórfido Éste es posterior a la Granodiorita Elena, por lo que el primer contacto se construye mediante intrusión, dejando como litologías más jóvenes al resto (Figura 6.3), a pesar de que las Andesitas son más antiguas que la Granodiorita Elena, se modelarán de otra manera que será explicado más adelante. Luego de la creación de los contactos se observa la superficie que separa ambas litologías (Figura 6.4A) y luego de activar la superficie se ven los dos volúmenes correspondientes (Figura 6.4B).



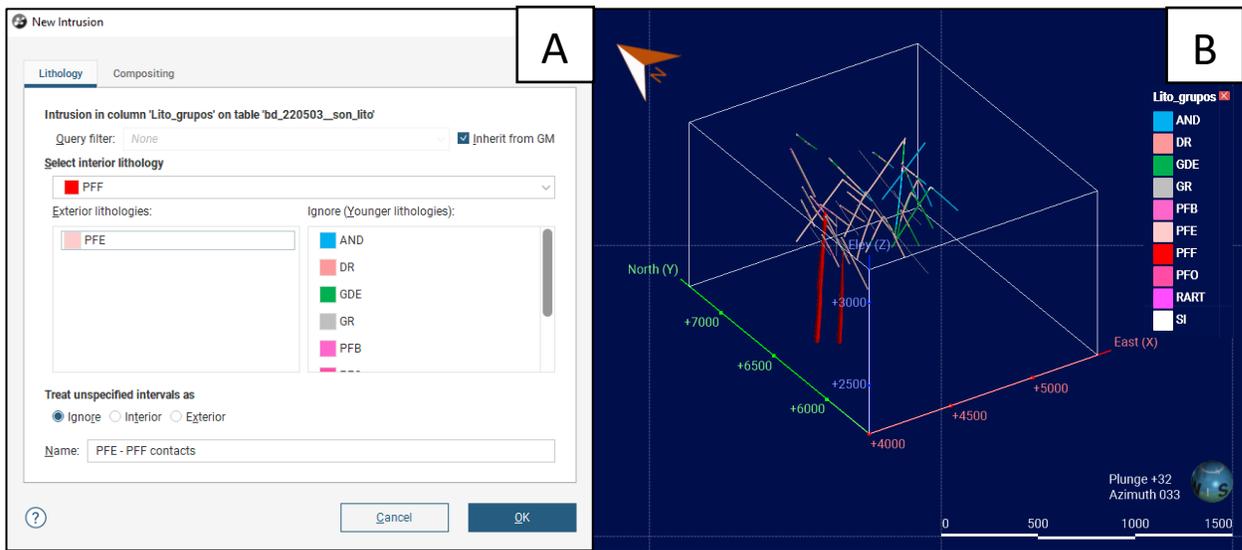
**Figura 6.3: Creación contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena.** Se utiliza la herramienta nueva intrusión a partir de datos de sondajes.



**Figura 6.4: Contacto entre Pórfido Este y Granodiorita Elena.** (A) Superficie de contacto entre ambas unidades. (B) Sólidos obtenidos a partir de la creación del contacto.

### 6.5.2. Pórfido Fino (PFF)

Temporalmente, luego del Pórfido Este intruye el Pórfido Fino, del cual se tienen pocos datos en la base de datos, ya que, es cortado por solamente dos sondajes. La creación de su superficie de contacto se realiza por intrusión cuya litología interior es el Pórfido Fino y la exterior el Pórfido Este, además se ignoran el resto de las litologías, debido a que no son cortadas por esta unidad (Figura 6.5A). Se le otorga un trend estructural (dip: 85, dip azimuth: 280) y los valores del elipsoide son 3, 1 y 1 como máximo, intermedio y mínimo respectivamente obteniendo el sólido de la Figura 6.5B.



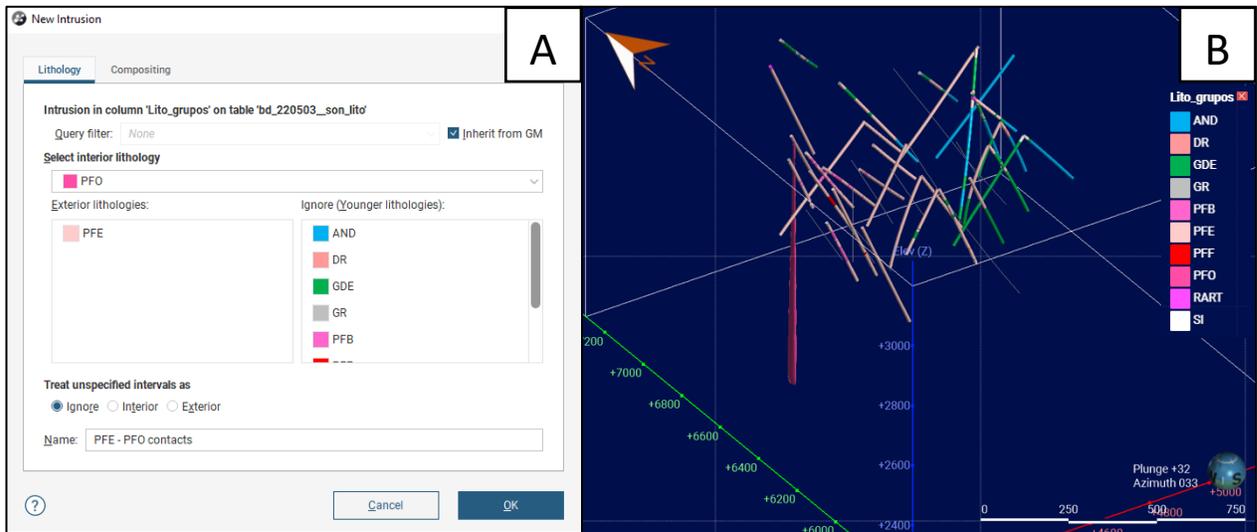
**Figura 6.5: Contactos Pórfido Fino. (A)** Creación de contactos entre Pórfido Fino y Pórfido Este. **(B)** Sólido final del Pórfido Fino

### 6.5.3. Pórfido Oeste (PFO)

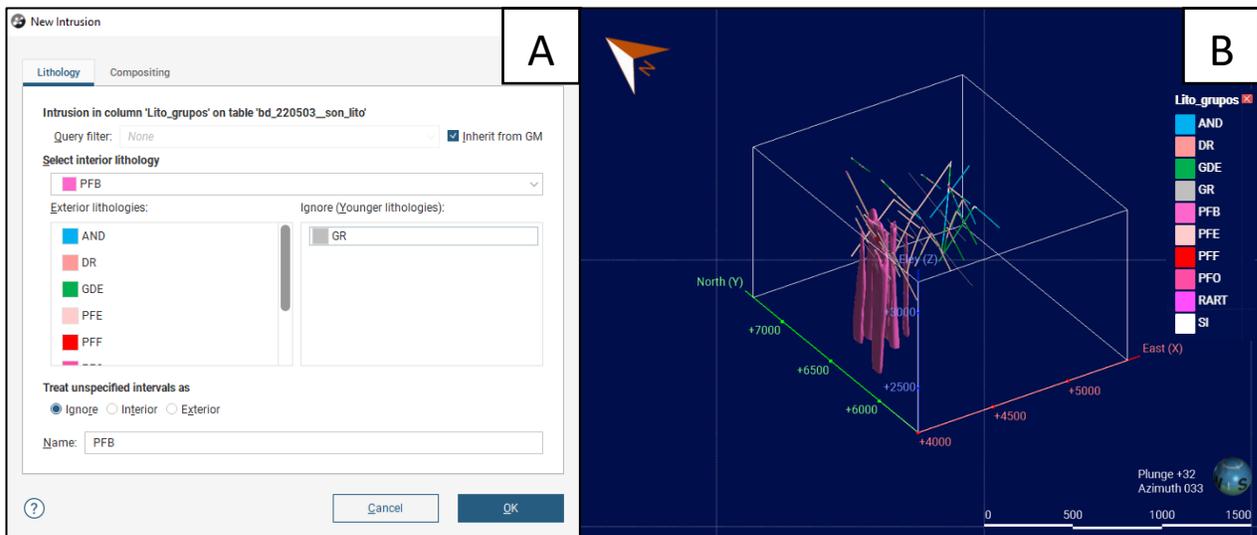
El Pórfido Oeste es una unidad que aparece muy poco en el área de estudio, en un sondaje solamente, intruyendo al Pórfido Este. Se modela como intrusivo cuya litología interior es el Pórfido Oeste y como litología exterior es el Pórfido Este y se ignora al Pórfido Banco que es más joven y al resto de litologías que no corta (Figura 6.6A). Se le otorga un trend estructural (dip: 90, dip azimuth: 267) y los valores del elipsoide son 6, 2 y 1 como máximo, intermedio y mínimo respectivamente para finalmente obtener el sólido de la Figura 6.6B.

### 6.5.4. Pórfido Banco (PFB)

El Pórfido Banco se presenta como cuerpos filonianos elongados en dirección norte-sur, se localiza en la parte oeste del área de estudio, en donde intruye al Pórfido Este. Se modela como intrusivo cuya litología interior es el Pórfido Banco y como litología exterior se deja al Pórfido Este, solamente se ignora la litología Gravas (Figura 6.7A). Se le otorga un trend estructural (dip: 86, dip azimuth: 276) y los valores del elipsoide son 3, 2 y 1 como máximo, intermedio y mínimo respectivamente obteniendo el sólido de la Figura 6.7B



**Figura 6.6: Contactos Pórfido Oeste. (A)** Creación de contactos entre Pórfido Oeste y Pórfido Este. **(B)** Sólido final del Pórfido Oeste.

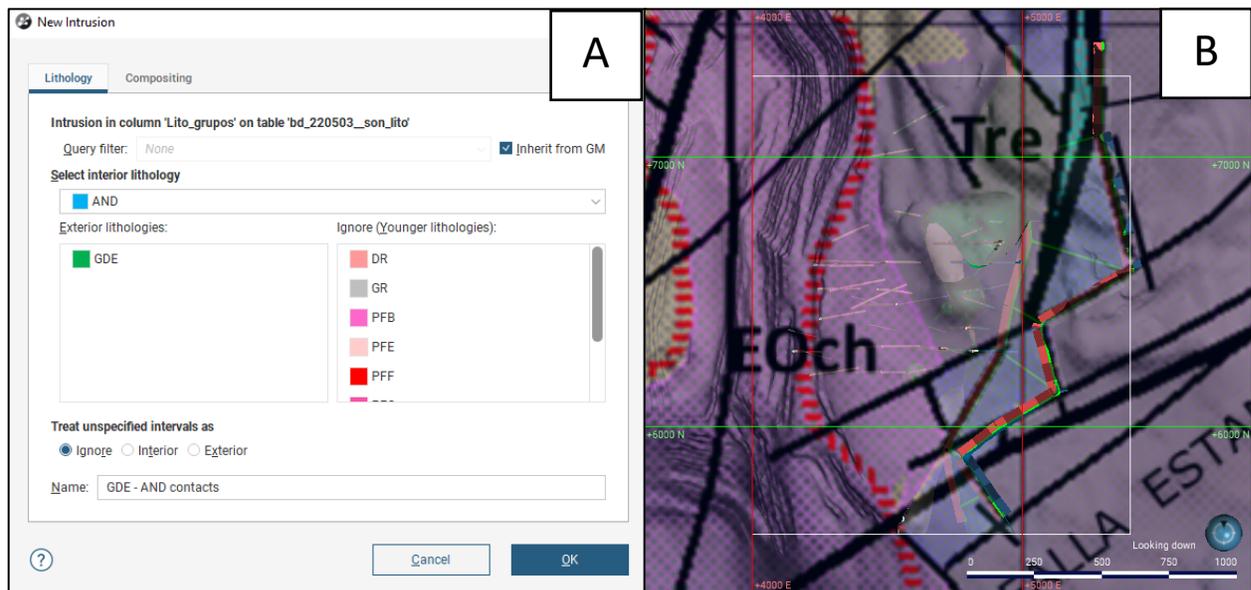


**Figura 6.7: Contactos Pórfido Banco. (A)** Creación de contactos entre Pórfido Banco y resto de unidades. **(B)** Sólido final del Pórfido Banco.

### 6.5.5. Andesitas (AND)

Las Andesitas, a pesar de ser la litología más antigua, es de las últimas que se modela debido a la geometría de *roof pendant* que tiene además de que se encuentra casi en su totalidad en contacto solo con la Granodiorita Elena.

Para modelar esta unidad se crean 2 superficies de contacto tipo intrusión: la primera corresponde al contacto oeste con la Granodiorita Elena en base a la información de sondajes (Figura 6.8A) y la segunda superficie también corresponde a una intrusión que representa la parte este de la unidad a modelar, sin embargo, no se tiene información de ese contacto en los sondajes, por lo que se recurre a mapeos superficiales para saber donde se encuentra el contacto (Figura 6.8B).



**Figura 6.8: Creación de contacto oeste entre Andesitas Granodiorita Elena. (A)** Creación de superficie de contacto entre Andesitas y Granodiorita Elena a partir de información de sondajes: **(B)** Trazado manual de contacto entre Andesitas al oeste y Granodiorita Elena al Este.

- Contacto por intrusión en la parte oeste: Se realiza un contacto exclusivamente entre las Andesitas y la Granodiorita Elena para que tenga forma más planar y alargada en el sentido norte-sur dejando como litología interior a las Andesitas hacia el lado este del contacto. (Figura 6.9).
- Contacto por intrusión en la parte este: El bloque de Andesitas y Granodiorita Elena queda dividido en dos por el primer contacto, por lo que se realiza el contacto a partir de polilíneas (Figura 6.10) trazadas previamente sobre el contacto en el mapa geológico en vez de hacerlo desde los datos de sondajes, el resultado se ve en la figura 6.11.

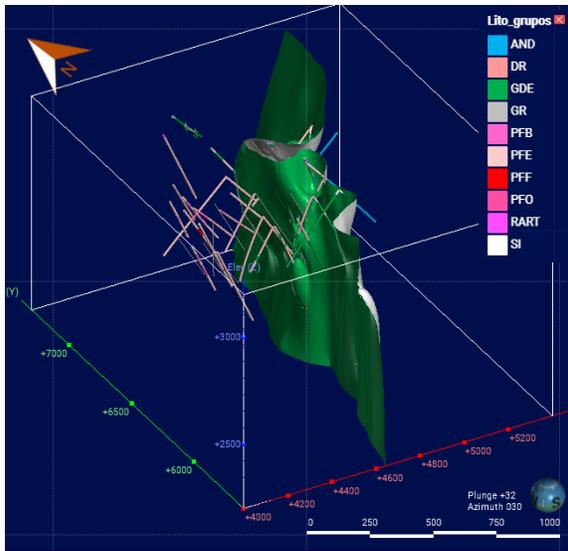


Figura 6.9: Contacto oeste entre Andesitas y Granodiorita Elena.

New Intrusional Contact
A

**Select Lithology**

First lithology: AND is Younger

Second lithology: GDE is Older

Name:

Cancel
OK

New Polyline
B

**Polyline From**

New Drawing  Existing Polyline

AND-GDE\_E

Name:

Cancel
OK

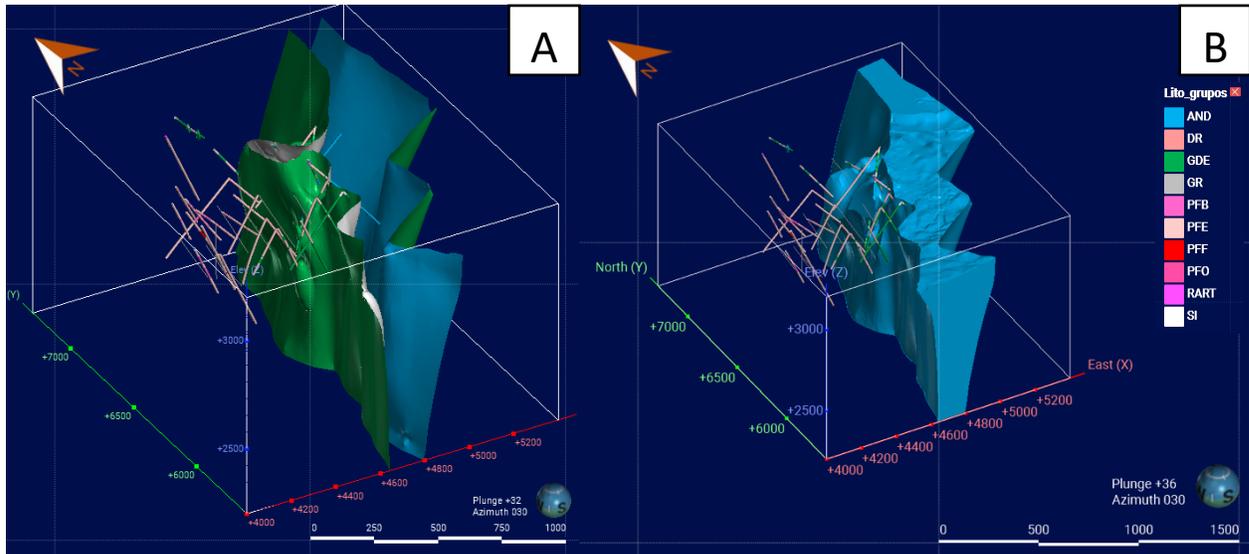
Figura 6.10: Creación de contacto este entre Andesitas y Granodiorita Elena. (A) Herramienta de nuevo contacto por intrusión. (B) Nuevo contacto a partir de polilínea existente, en donde se selecciona la trazada previamente sobre el mapa geológico.

Se utilizó esta metodología, ya que, el modelamiento era más sencillo que dejar las Andesitas como una sola unidad intrusiva a causa de su geometría tipo *roof pendant* y alargada norte sur.

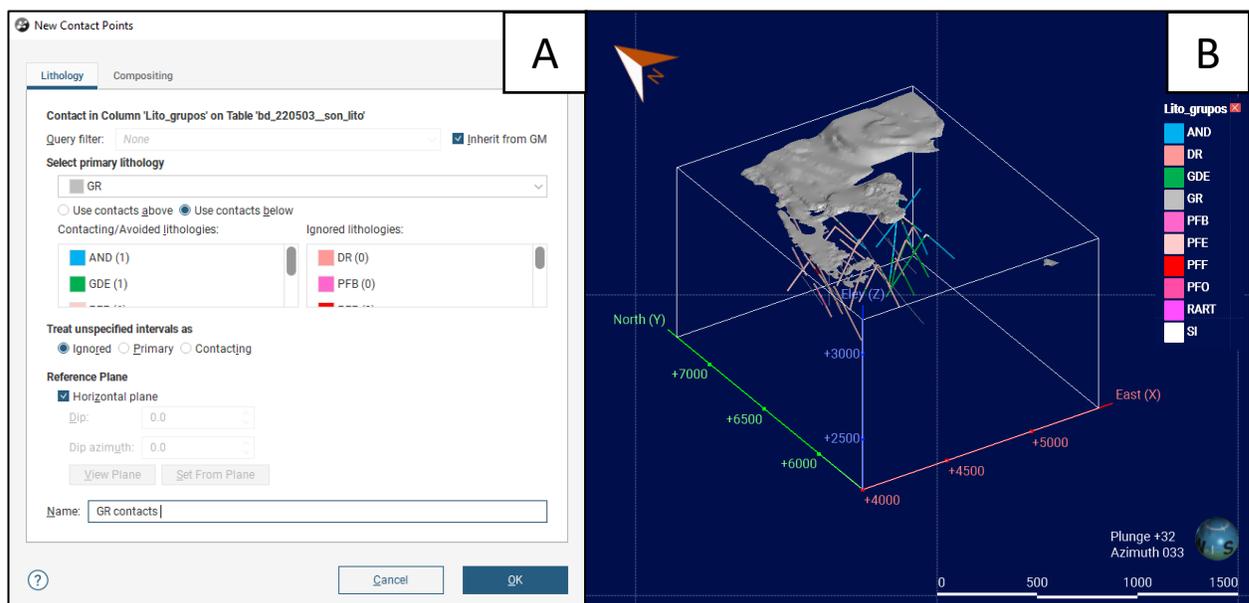
### 6.5.6. Gravas (GR)

La unidad más reciente corresponde a las Gravas, compuestas de sedimentos no consolidados o parcialmente consolidados en contacto erosivo con el basamento ígneo. El contacto se crea con la herramienta de contacto erosivo dejando como litología principal a las Gravas, el software tiene la opción de utilizar los datos del techo o de la base de la unidad y en este caso se utilizarán los datos

de la base o “*contacts below*”, ya que no hay datos en el techo al ser la cobertura, se ignoran las litologías con las cuales no se tienen datos de contacto, además se utiliza como plano de referencia una superficie horizontal (Figura 6.12A). El sólido final se ve en la Figura 6.12B.

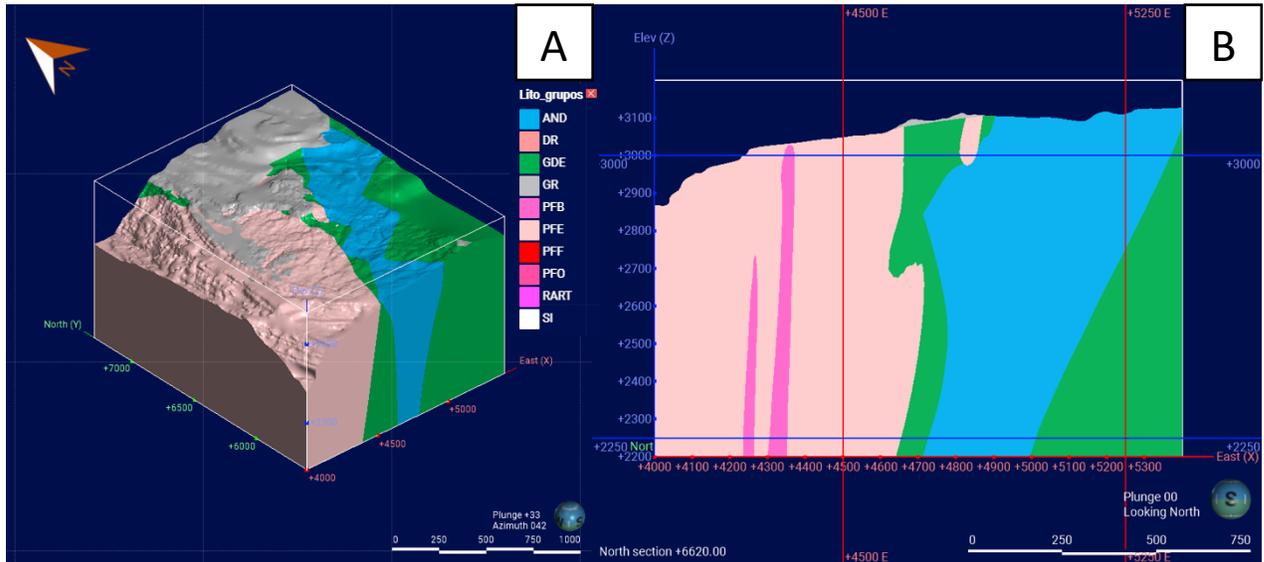


**Figura 6.11: Modelo de Andesitas. (A)** Contactos entre las Andesitas y la Granodiorita Elena. **(B)** Sólido correspondiente a las Andesitas.



**Figura 6.12: Contactos litologías Gravass. (A)** Creación de contactos entre Gravass y resto de unidades. **(B)** Sólido final de Gravass

Finalmente, el modelo de Litología finalizado se visualiza en la Figura 6.13:



**Figura 6.13: Modelo final de Litología.** (A) Vista general del modelo litológico en el área de estudio en software Leapfrog Geo. (B) Sección transversal en coordenada Y=6620 en donde se observa la distribución general de las unidades con el Pórfido Este al oeste y la Granodiorita Elena al este con el *rofpendant* de Andesitas.

## 6.6. Modelo de Zona Mineral

Para la confección del modelo de Zona Mineral, se utilizan 31 sondajes del total, debido a la ausencia de ese campo en el resto de los sondajes. Las Zonas Minerales se consideran como litologías para el modelamiento, ya que, el software tiene solo esa entrada de datos para modelar volúmenes.

En este caso se crea una nueva columna de litología (Figura 6.14) con la herramienta “*Group Lithologies*”, dividiendo las Zonas Minerales en cuatro: Primarios, Lixiviados, Sulfuros y Gravas, para posteriormente hacer submodelos con las alteraciones presentes con la herramienta “*refined model*” para las unidades Primarios y Lixiviados. Esta herramienta permite crear un submodelo dentro de un volumen creado previamente y así poder modelar las primeras cuatro Zonas Minerales de manera más detallada e independiente del resto de los volúmenes sin tener problemas con relaciones de contacto o temporalidad al trabajarse por separado.

Groups		
	Code	Colour
∨	Gravas	■
	BOT	
	GRE	
	GRX	
∨	Lixiviados	■
	OX	
	LX	
	LX-OX	
	MX	
∨	Primarios	■
	EST-PPY	
	CPY	
∨	Sulfuros	■
	SSD	
	SSF	

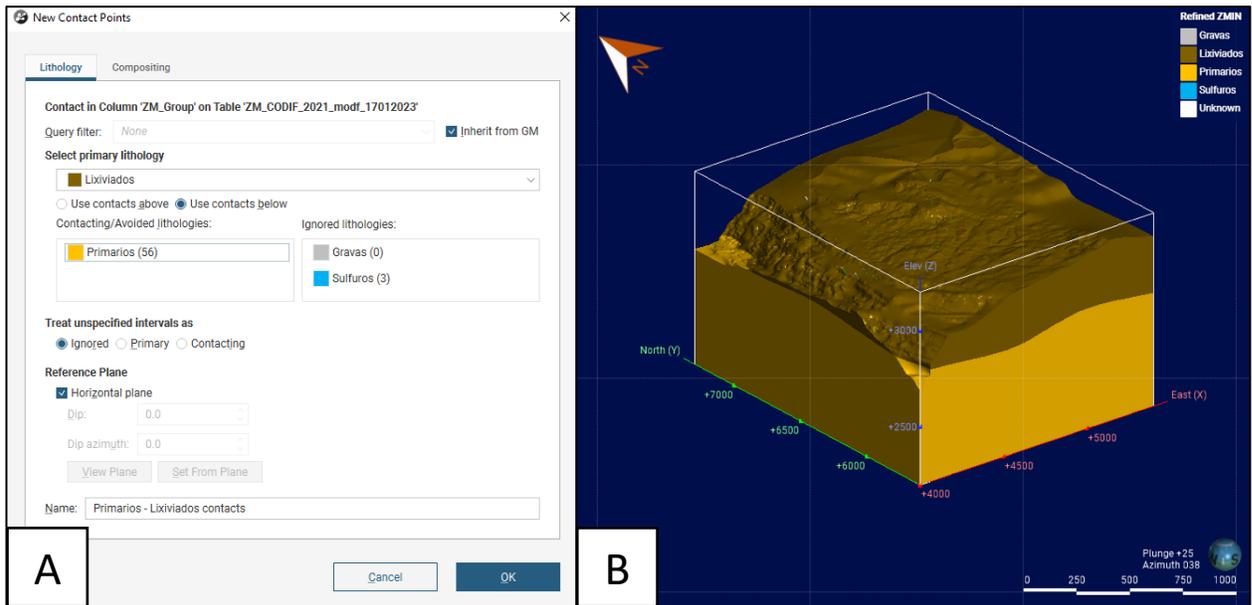
Figura 6.14: Columna de Zonas Minerales agrupadas.

### 6.6.1. Contacto Lixiviados-Primarios

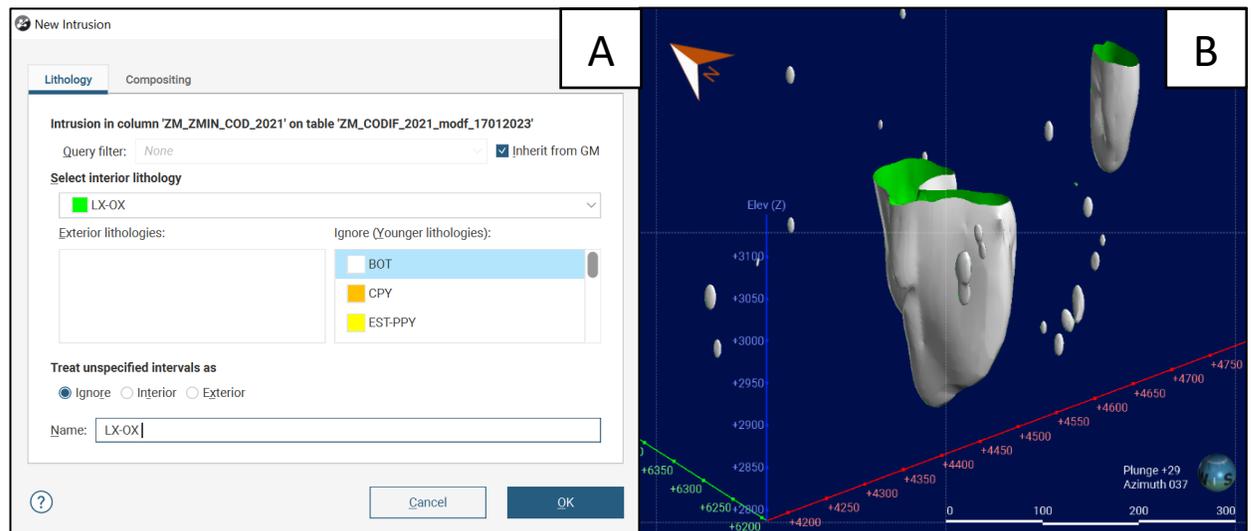
Los primeros dos grandes bloques de zona mineral, corresponden a los Lixiviados y a los Primarios. Para la creación de la superficie de contacto, se utiliza un contacto erosivo dejando como litología primaria o más joven a los lixiviados (Figura 6.15), de esa manera quedan sobre los primarios.

#### 6.6.1.1. Contacto LX-OX – OX

La zona de LX-OX se localiza dentro del modelo de lixiviados. Esta Zona Mineral se presenta en los bordes de la zona OX. Para modelarla se utiliza un contacto por intrusión, dejando como litología interior la de LX-OX (Figura 6.16A) y se ignora el resto. La superficie de LX-OX se muestra en la Figura 6.16B.

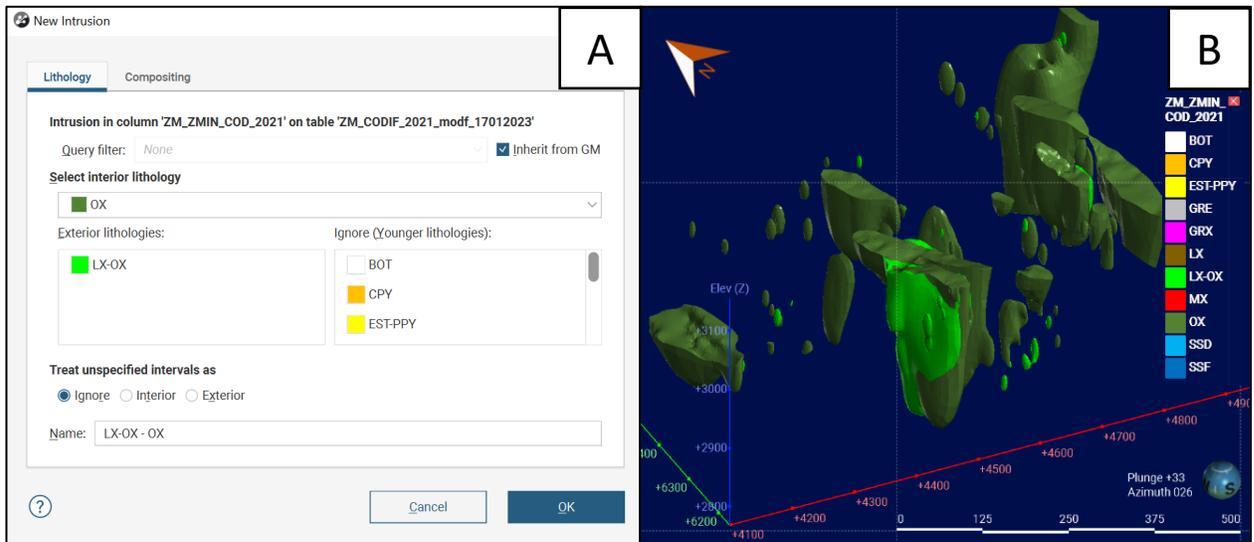


**Figura 6.15: Contacto entre Lixiviados y Primarios. (A) Creación de contactos Lixiviados y Primarios. (B) Sólido final de Lixiviados y Primarios.**



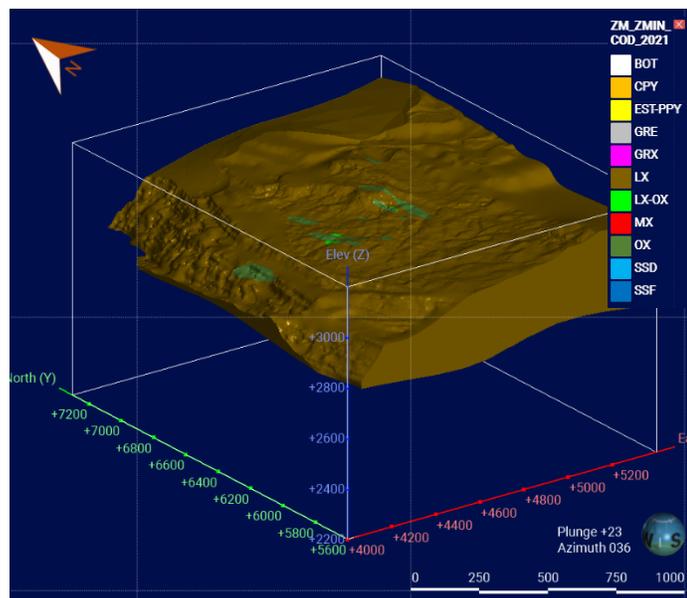
**Figura 6.16: Contactos Zona Mineral LX-OX (A) Creación de contactos de la Zona Mineral LX-OX. (B) Contactos de la Zona Mineral.**

Posteriormente para la creación del contacto entre LX-OX y OX se utiliza también la herramienta de intrusión (Figura 6.17A), dejando como litología interior la zona de OX y como litología exterior la de LX-OX, de esa manera es cortada por la zona de OX (Figura 6.17B).



**Figura 6.17: Contactos Zona Mineral OX (A) Creación de contactos de la Zona Mineral OX. (B) Sólidos finales de las Zonas Minerales LX-OX y OX.**

Finalmente, para la activación del volumen de los LX, se deja como litología más antigua a LX, en vez de *Unknown*, para que de esa manera el resto del submodelo de lixiviados sea rellenado con la litología LX (Figura 6.18).



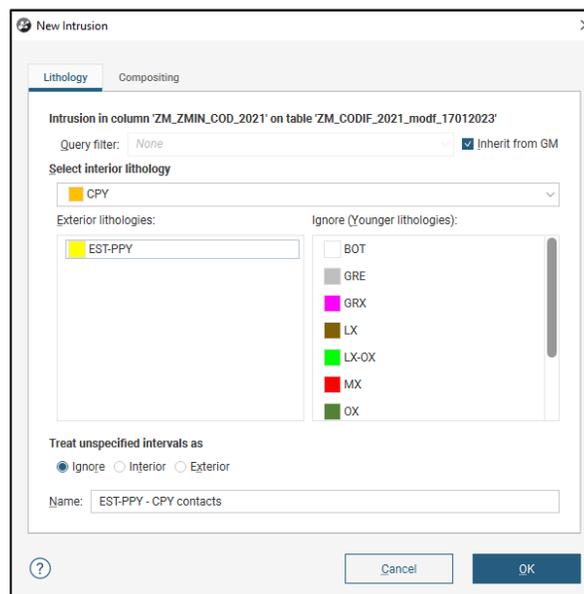
**Figura 6.18: Sólidos LX-OX y OX. Sólidos finales de LX-OX y OX con el sólido de Lixiviados**

## 6.6.2. Primarios

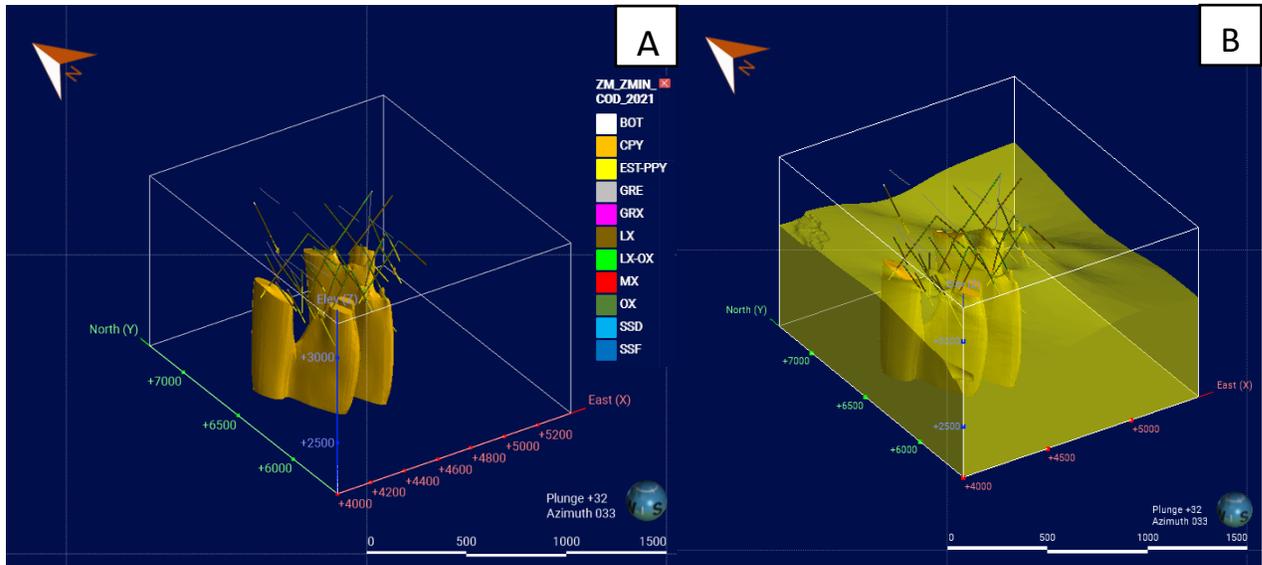
Dentro del modelo de Primarios, se modelan dos zonas minerales: Calcopirita (CPY) y la de Estéril-Pirítico Primario (EST-PPY).

### 6.6.2.1. Contacto CPY – EST-PPY

En el modelo de Primarios, al haber solo dos zonas minerales se procede a crear el contacto entre ambas unidades. La zona de Calcopirita, al estar relacionada a estructuras y cuya forma es relativamente tabular se puede modelar como intrusivo para que de esa manera corte a la otra zona mineral (Figura 6.19) que es la que la rodea. Se le otorga un trend estructural (dip: 84, dip azimuth: 252) obteniendo el sólido final (Figura 6.20A). Finalmente se activan las superficies de contacto para obtener los sólidos correspondientes a los Primarios (Figura 6.20B).



**Figura: 6.19: Creación de contactos entre CPY y EST-PPY.**

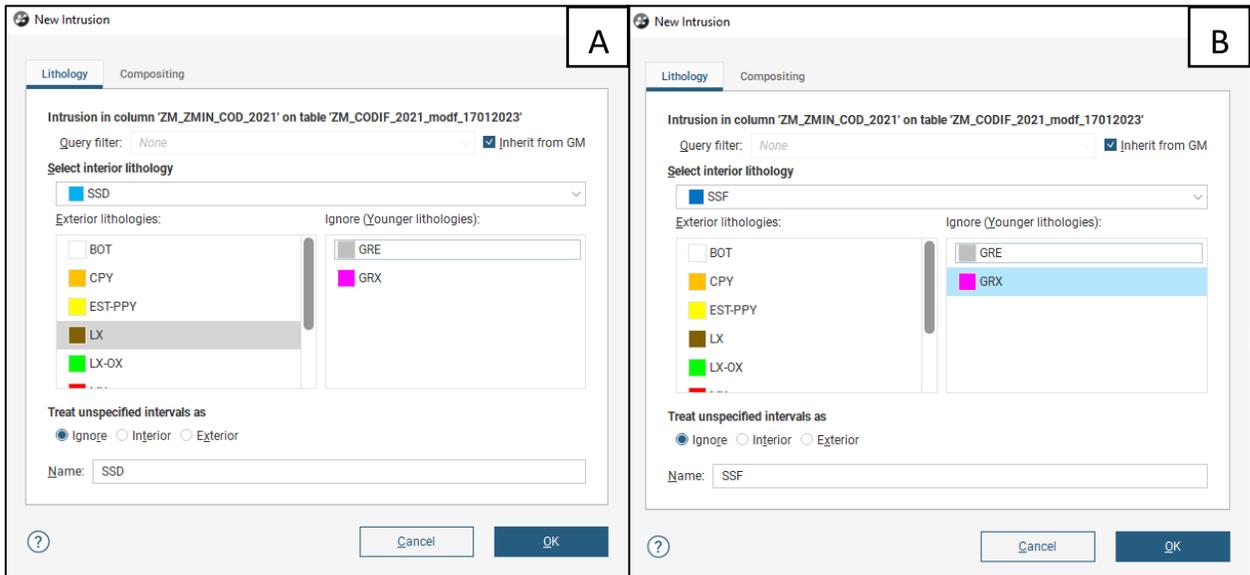


**Figura 6.20: Modelo Primarios. (A)** Sólidos finales de Zona Mineral de CPY. **(B)** Modelo final de zona de Primarios, la zona mineral con transparencia corresponde a la zona estéril.

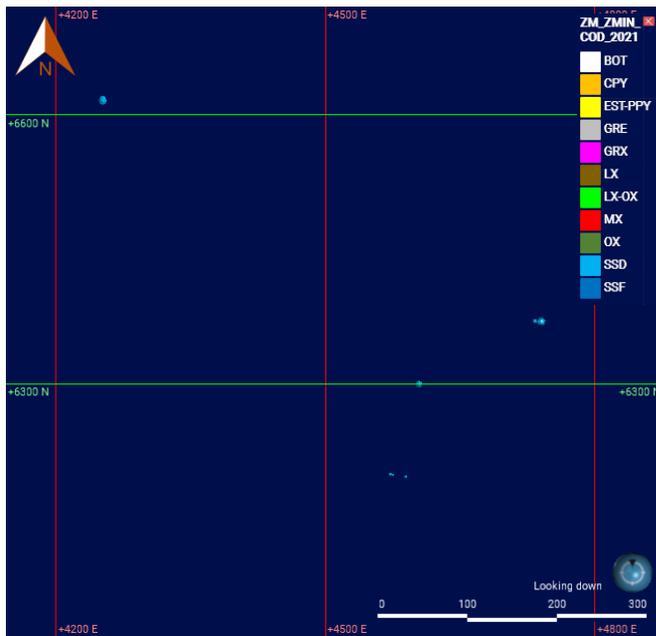
### 6.6.3. Sulfuros

En la base de datos, los sulfuros se dividen en Sulfuros Secundarios Débiles (SSD) y Sulfuros Secundarios Fuertes (SSF), sin embargo, hay 28,5m y 16,5m de información respectivamente, por lo que para efectos del modelamiento se consideran como una sola unidad denominada “Sulfuros” con un total de 45m de información en sondajes. Se modelan de igual manera a pesar de tener muy poca información (0,44% del total de metros perforados), ya que, pueden ser objetivos importantes por los valores de leyes que tienen: 0,436% CuT y 0,799% CuT para los Sulfuros Secundarios Débiles y Fuertes respectivamente.

Esta unidad de sulfuros se modela cada unidad de sulfuros de manera independiente (Sulfuros Secundarios Fuertes y Débiles) como un intrusivo (Figura 6.21), debido a que es una alteración temporalmente posterior a la hipógena, obteniendo pequeños sólidos finales luego de ser agrupados en una sola unidad de Sulfuros (Figura 6.22 ZMIN\_sulfuros\_top), sin embargo, no se tienen los datos suficientes para poder otorgarle alguna orientación preferencial. Por otra parte, por bibliografía se sabe que tienden a seguir la orientación general de la mineralización hipógena al igual que los Óxidos.



**Figura 6.21: Creación contactos Sulfuros. (A) Creación de contactos para Sulfuros Secundarios Débiles. (B) Creación de contactos para Sulfuros Secundarios Fuertes.**

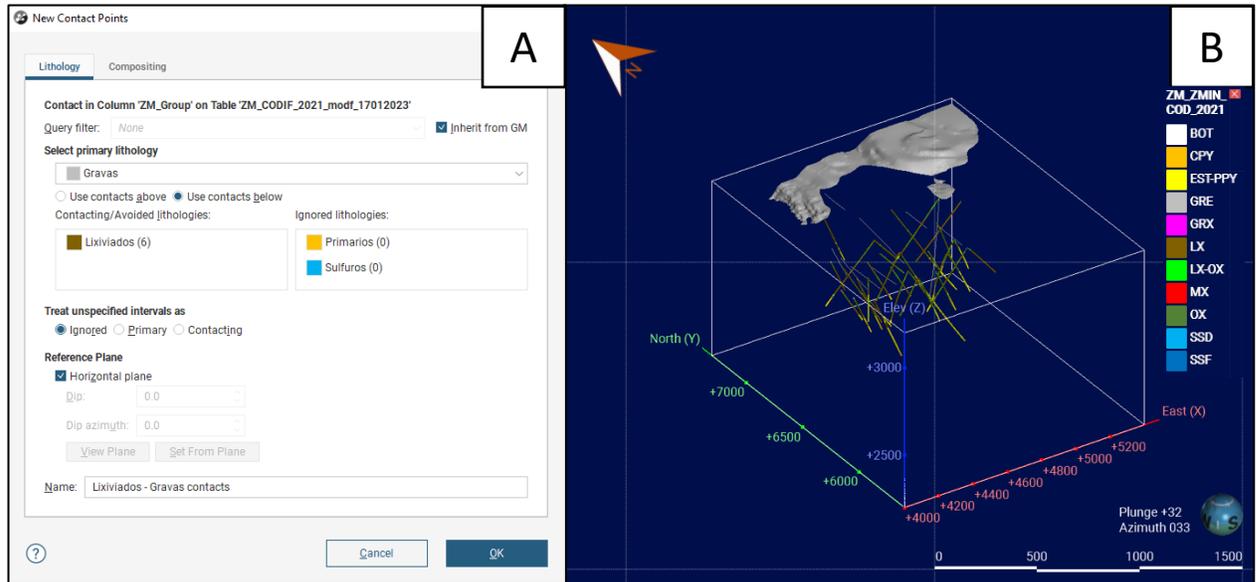


**Figura 6.22: Sólidos de Sulfuros.**

#### 6.6.4. Gravas

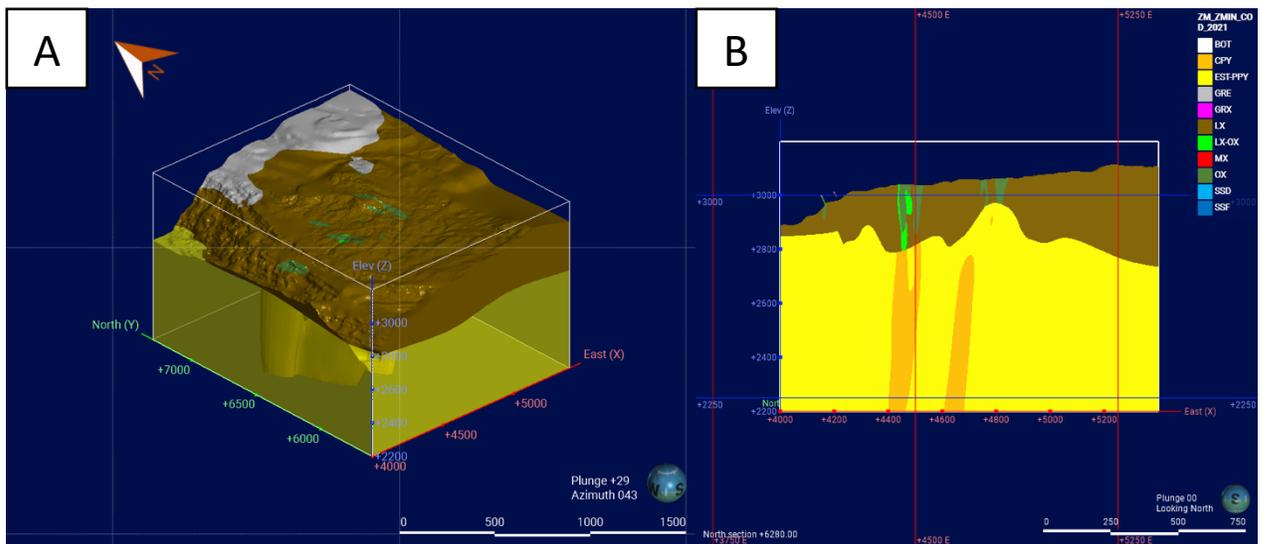
En la base de datos, las gravas se dividen en Grava Estéril (GRE) y Grava Exótica (GRX), sin embargo, hay 25,3m y 3m de información respectivamente, por lo que se procede a hacer lo mismo que con los Sulfuros y se agrupan en una sola unidad llamada Gravas con un total de 28m de

información en sondajes. Se modelan a partir de un contacto erosivo en contacto con la zona de lixiviados cuya superficie de referencia es un plano horizontal (Figura 6.23A) para poder representar de manera fidedigna la unidad de Zona Mineral (Figura 6.23B).



**Figura 6.23: Modelo de Zona Mineral de Gravas. (A)** Creación de contactos bajo las Gravas. **(B)** Sólido de Gravas.

Finalmente, el modelo de Zonas Minerales se ve en la Figura 6.24.



**Figura 6.24: Modelo de Zona Mineral. (A)** Vista general del modelo de Zona Mineral en el área de estudio en software Leapfrog Geo. **(B)** Sección transversal en coordenada Y=6280 en donde se observa la distribución general de las Zonas Minerales con clara diferenciación entre la zona de Lixiviados y Primarios, además de las zonas de mayor ley ligadas a estructuras.

## 6.7. Modelo de Alteración

Para la confección del modelo de alteración se utilizan 22 sondajes del total, debido a la ausencia de ese campo en el resto de ellos.

Un mismo tramo de sondaje puede tener más de una alteración en distintos porcentajes, lo que no permite la confección de sólidos que representen las alteraciones. Para poder modelar las alteraciones se utiliza la alteración dominante (Figura 6.25) de cada tramo y así tener una idea preliminar de cómo se distribuyen en el área de trabajo.

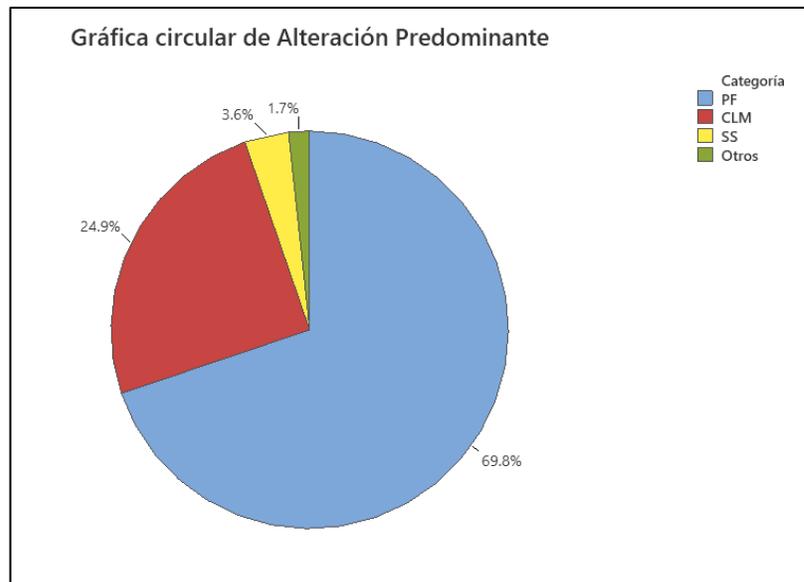
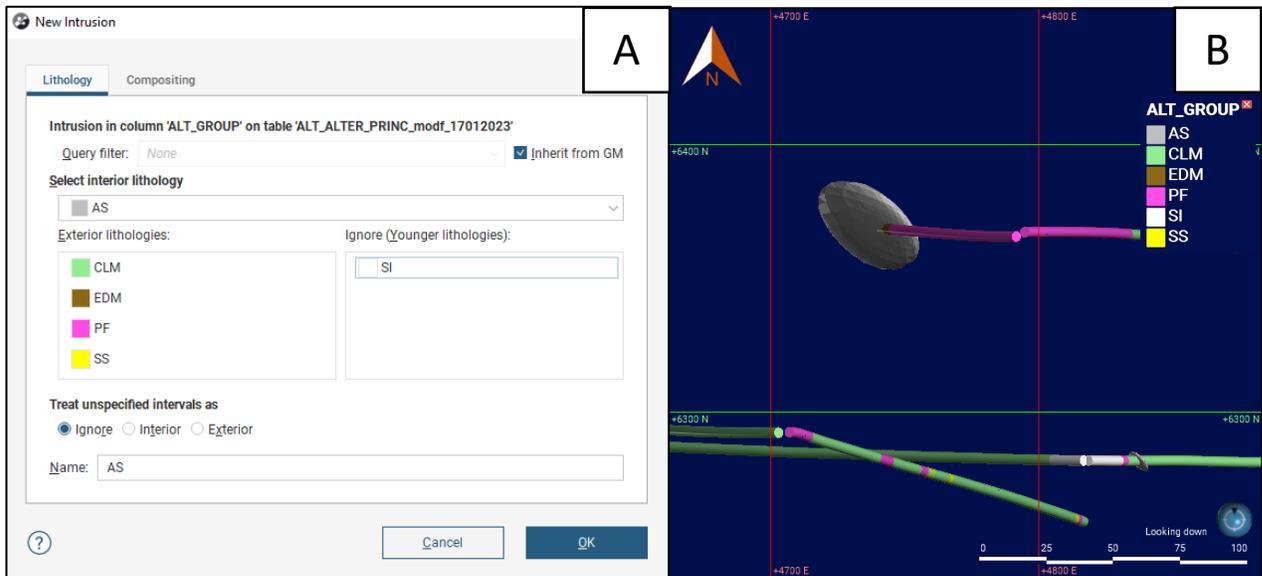


Figura 6.25: Gráfico de alteración predominante en porcentaje.

### 6.7.1. Argílica Supérgena (AS)

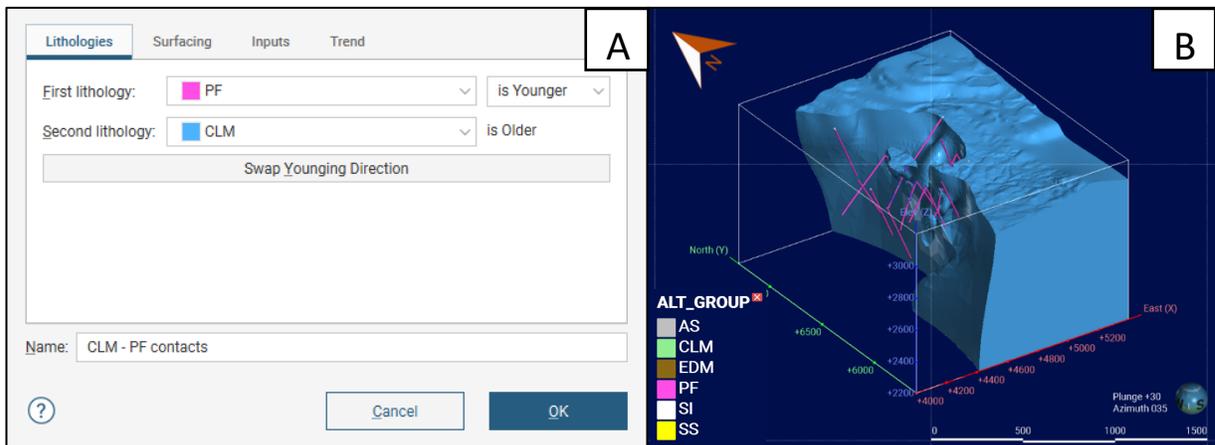
La alteración Argílica Supérgena se modela como intrusivo con trend estructural NW (dip: 68; dip azimuth: 226), ya que ésta se localiza en zonas de falla (Figura 6.26), además se le otorgan valores de elongación del elipsoide máxima, intermedia y mínima de 4, 4 y 1 respectivamente.



**Figura 6.26: Alteración Argílica Supérgena. (A)** Creación de contactos para la Alteración Argílica Supérgena. **(B)** Sólidos Alteración Argílica Supérgena.

### 6.7.2. Clorítica Marginal (CLM)

La alteración Clorítica Marginal en el modelo se deja como litología exterior de la alteración Potásica de Fondo (Figura 6.27), ya que, corresponde al resto del volumen en el modelo al afectar en mayor medida a la roca caja, la cual es la Granodiorita Elena.

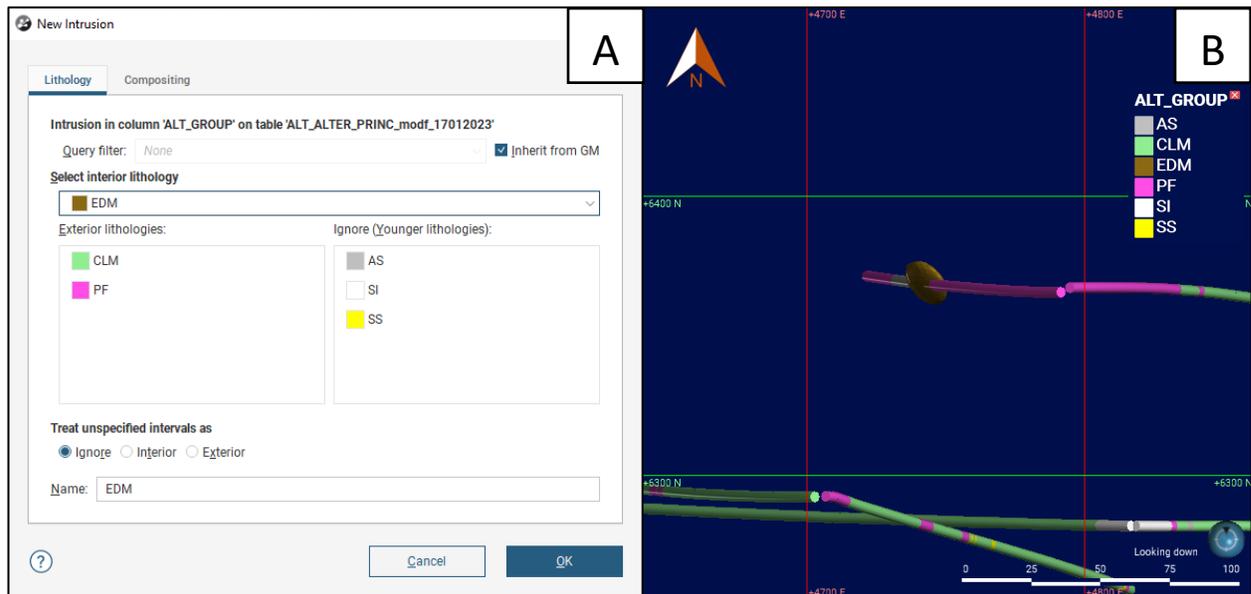


**Figura 6.27: Contactos Alteración Clorítica Marginal. (A)** Creación de contactos entre la alteración Clorítica Marginal y Potásica de Fondo. **(B)** Sólido final de la alteración CLM.

### 6.7.3. Early Dark Micaceous (EDM)

La alteración Early Dark Micaceous prácticamente no se encuentra en el área de estudio, sin embargo, se encuentra dentro de la alteración Potásica de Fondo. Se modela de manera separada a la Potásica de Fondo, ya que, las vetillas mineralizadas contienen sulfuros primarios (bornita, calcopirita, digenita y calcosina primaria) que aumentan su ley.

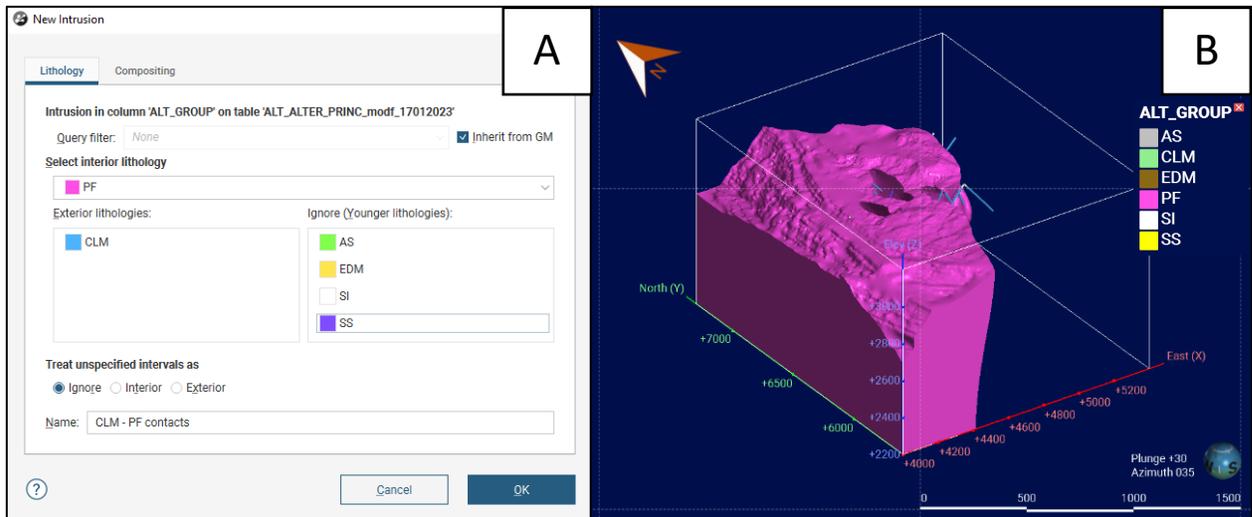
Se modeló utilizando la función de intrusión (Figura 6.28) en contacto con las alteraciones Potásica de Fondo y Argílica Secundaria ignorando a esta última alteración debido a que es posterior y siguiendo un trend estructural NW-SE.



**Figura 6.28: Contactos alteración Early Dark Micaceous. (A) Creación de contactos de la alteración Early Dark Micaceous. (B) Vista en planta del sólido final de la alteración EDM.**

### 6.7.4. Potásica de Fondo (PF)

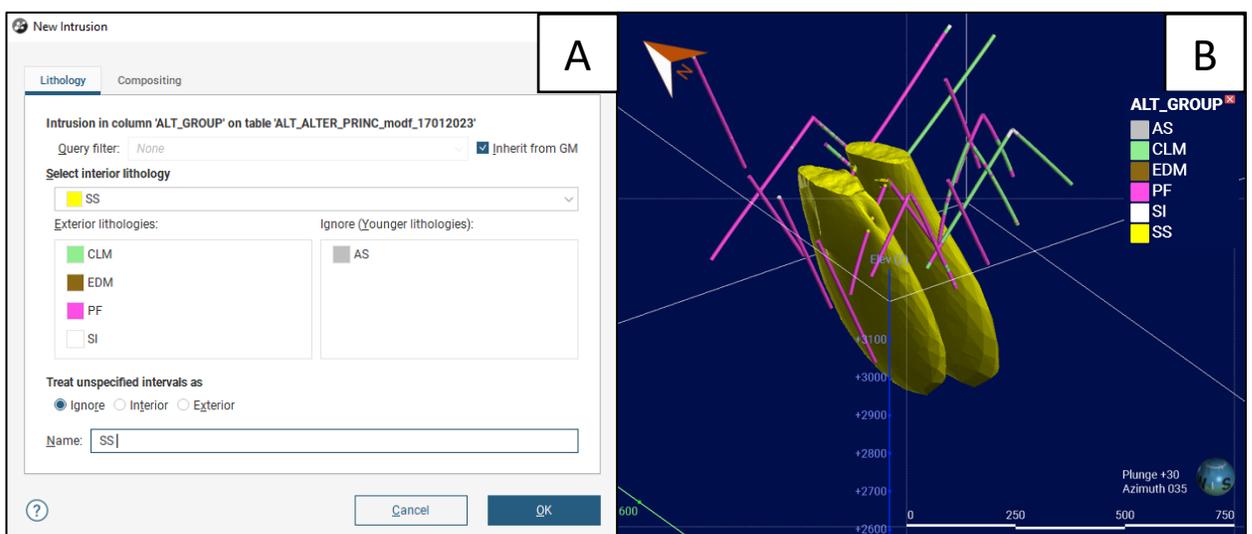
La alteración Potásica de Fondo se modela como un intrusivo en contacto con la alteración Clorítica Marginal, y se deja a esta última como litología exterior (Figura 6.29), ya que, corresponde a la alteración de la roca caja.



**Figura 6.29: Contactos Alteración Potásica de Fondo. (A)** Creación de la superficie de contacto de la alteración. **(B)** Sólido final de la alteración Potásica de Fondo.

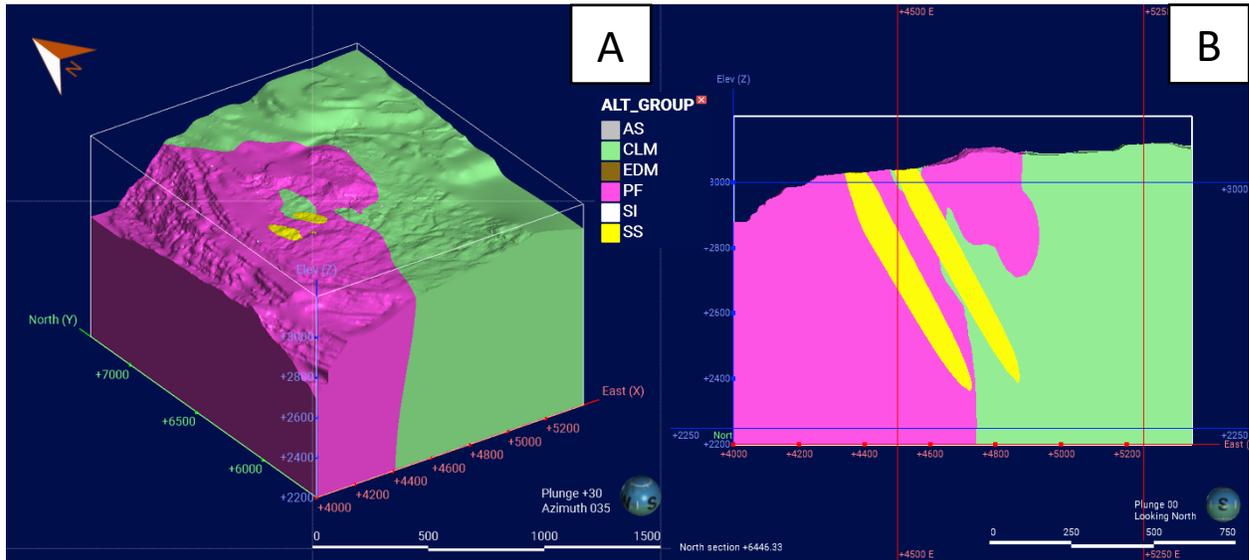
### 6.7.5. Sericita Selectiva (SS)

La alteración Sericita Selectiva se sobrepone a la alteración potásica, por lo cual se modela como intrusivo (Figura 6.30) cuya litología interior corresponde a la Sericita Selectiva y como exteriores a la Potásica de Fondo, Early Dark Micaceous y Clorítica Marginal, se ignora la alteración Argílica Supérgena, debido a que esta última es posterior. Al estar relacionada a estructuras, también se le otorga la tendencia de las estructuras NW-SW.



**Figura 6.30: Contactos Alteración Sericita Selectiva. (A)** Creación de contactos de la alteración Sericita Selectiva. **(B)** Sólidos finales de la alteración.

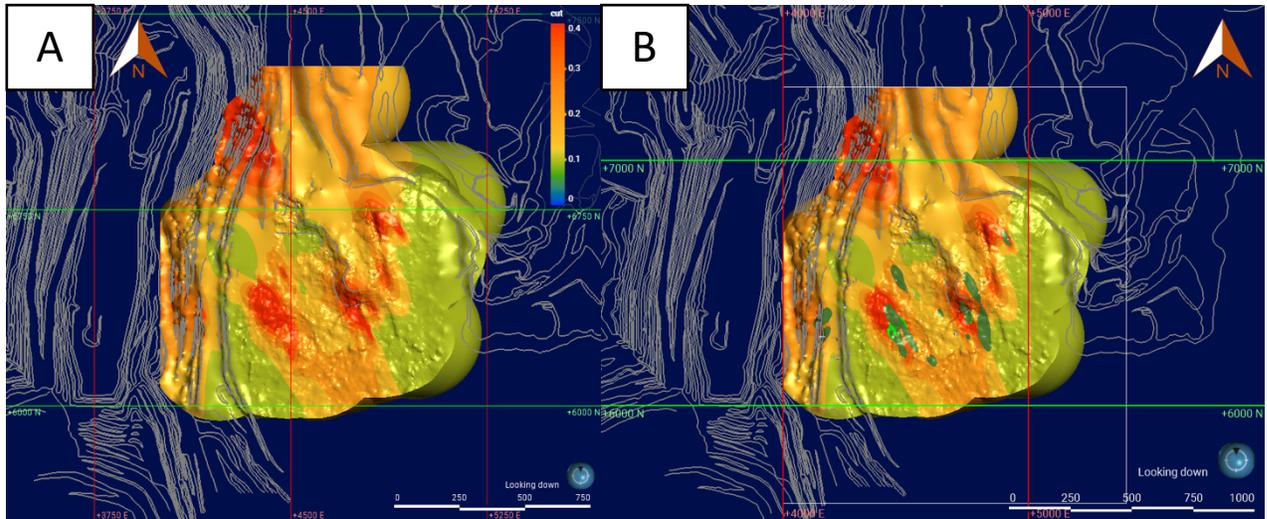
Finalmente, el modelo de alteraciones final se ve en la Figura 6.31:



**Figura 6.31: Modelo de Alteración.** (A) Vista general del modelo de Alteración en el área de estudio en software Leapfrog Geo. (B) Sección transversal en coordenada Y=6446 en donde se observa la distribución general de las Alteraciones con clara diferenciación entre la Potásica de Fondo al oeste y la Clorítica Marginal al este, además de la Sericita Selectiva ligada a estructuras.

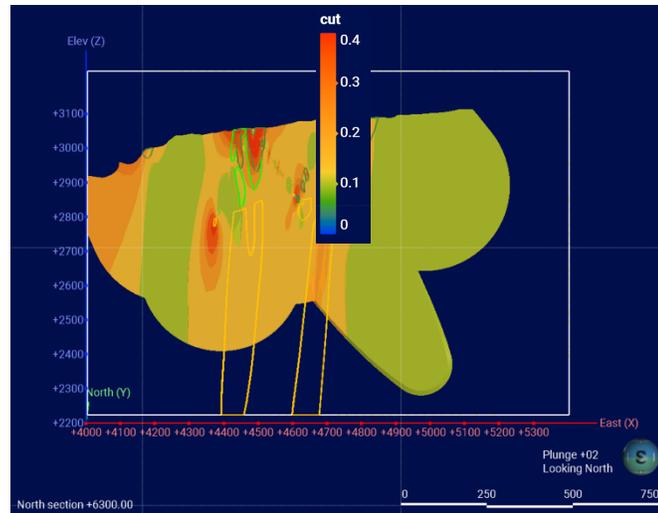
## 6.8. Distribución del cobre

El análisis de distribución de cobre se realizó mediante el software Leapfrog Geo con la herramienta de modelo numérico, mediante una interpolación RBF. En primera instancia, el software modela la distribución del cobre como formas circulares a partir de un elipsoide con todos sus valores por defecto como “1”, sin embargo, se sabe que en la realidad no ocurre de esa manera, por lo cual se analiza la distribución de estructuras en el área de estudio, las cuales coinciden con las zonas de mayor ley. Para hacer un modelo más preciso, se le otorga un trend estructural siguiendo dichas estructuras NW-SE (dip: 87, dip azimuth: 243). Debido a la falta de información en algunos sectores del área de estudio, se realiza un *buffer* de 250 metros alrededor de los sondajes para obtener información más real y que no se originen valores muy lejanos espacialmente a donde se ubican los sondajes, lo que significa que no se generan datos de cobre a distancias mayores a 250 metros del sondaje más cercano. Se obtiene un modelo en tres dimensiones de leyes de cobre (Figura 6.32A) al cual se le sobre imponen las zonas minerales (6.32B).



**Figura 6.32: Modelo de distribución de Cu.** Vista en planta con curvas de nivel de la mina y topografía en gris. **(A)** Modelo de distribución de Cu. **(B)** Superposición de modelo de distribución de Cu con el modelo de Zona Mineral.

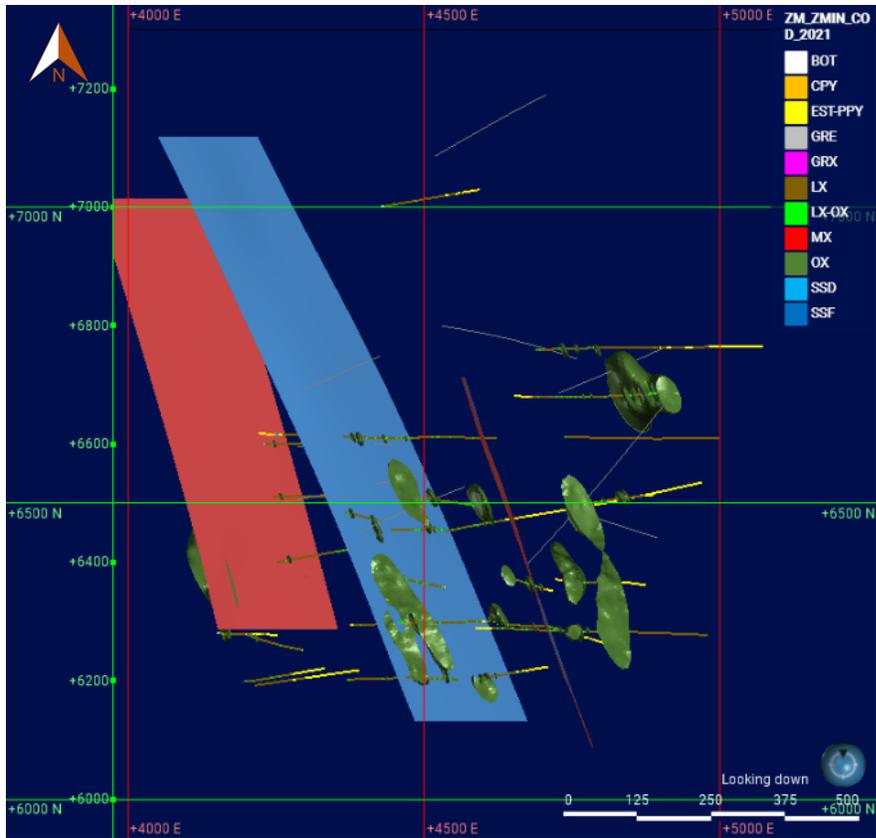
A partir de la comparación de los modelos de Zonas Minerales y leyes de Cobre, se ve una correlación entre las Zonas Minerales y los sectores con mayores porcentajes de ley. Se realiza una sección transversal en la coordenada Y=6300 (Figura 6.33) para corroborar la correlación entre ambos modelos, se observa que de manera general coinciden coherentemente siguiendo las formas de las Zonas Minerales, sin embargo, hay algunas zonas que no coinciden al cien por ciento, ya que están desplazadas. El desfase entre ambos modelos se puede deber a la falta de información, tanto de sondajes como de estructuras.



**Figura 6.33: Sección 6300N de modelo de Cu.**  
 Superposición de modelo de distribución de Cu con el modelo de Zona Mineral.

### 6.8.1 Controles del Cu

Mediante el análisis de los modelos litológicos y de zona mineral, además de los gráficos de deriva y de contacto se puede deducir que el cobre tiene un control principalmente estructural (Figura 6.34), de orientación NW-SE en el sector de Carmen. Se observa que la mineralización de óxidos se encuentra alojada en fallas de orientación NW-SE. Al complementar la información del modelo de CuT% con el de ZMIN, se ve una relación entre ambos modelos, sobretodo en las zonas de óxidos y de calcopirita, que son las zonas con mayor ley (0,445 y 0,402 respectivamente).



**Figura 6.34:** Control estructural de Cu. Zonas de óxidos emplazadas en estructuras de tendencia NW-SE.

## 7. CONCLUSIONES

Este estudio define los sólidos de Zona Mineral, Alteración y Litología integrando la información de sondajes y estructuras presentes en el sector Carmen Este. A partir de la confección de los modelos se deduce que el control de la mineralización es mediante estructuras de orientación NW, a diferencia del control en el rajo que es principalmente mediante estructuras NE. Las leyes de cobre más elevadas están directamente relacionadas con las zonas minerales, siendo la zona de Óxidos la con mayor ley de cobre (0,445%) seguido de la zona de Calcopirita (0,402%). A partir de los gráficos de análisis de contactos se deduce que la litología no cumple un rol importante en el control de la mineralización de cobre, ya que, se definen como contactos blandos. Por otra parte, los análisis de deriva de la variable CuT% indican que las leyes de cobre, de manera general, disminuyen en profundidad y hacia el SE, alejándose del pórfido mineralizado y del rajo de Radomiro Tomic teniendo valores más elevados en donde hay ocurrencia de zonas minerales.

La alteración tipo skarn se ve evidenciada solamente en un sondaje (RTDD11864) de la base de datos, a profundidades aproximadas de 200 y 350 metros con presencia de granates tipo andradita en el centro de los cristales y grosularia hacia los bordes. No se ven extensas zonas de granates ni tampoco se ve una relación directa con los contactos entre la roca caja y la del pórfido principal, por lo que no estarían relacionadas directamente a la intrusión principal, sino a estructuras o zonas de debilidad que permitan la circulación de fluidos cercanos a las rocas calcáreas de la Formación Tuina, favoreciendo el crecimiento de granates. La poca presencia de alteración tipo skarn no permite definir un depósito de este tipo, además la mineralización en el sector no se encuentra exclusivamente relacionada a dicha alteración.

## 8. REFERENCIAS

- AINOL, S. 2016. Actualización del Modelo Estructural del Yacimiento Radomiro Tomic, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 92 pp. Concepción.
- AMBRUS, J. 1979. Emplazamiento y mineralización de los pórfidos cupríferos de Chile. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca (Inédito): 314 pp. Salamanca.
- ARACENA, I. 1981. Geología y alteración del Complejo Plutónico del sector Norte del Yacimiento de Chuquicamata. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 79 pp., Santiago.
- ARNOTT, A. y ZENTILLI, M. 2003. The Chuquicamata Intrusive Complex: Its relation to the Fortuna Intrusive Complex, and the role of the Banco Porphyry in the Potassic Alteration Zone. Congreso Geológico Chileno N° 10: 10 pp., Concepción.
- BAEZA, L. & VENEGAS, R. 1984. El basamento cristalino de Sierra Limón Verde, II Región de Antofagasta: consideraciones genéticas. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **11**, N° **2**: 25-34. Santiago.
- BALLARD, J. 2001. A comparative study between the geochemistry of ore-bearing and barren calc-alkaline intrusions: Ph.D. Thesis (Unpublished), Australian National University: 254 pp. Australia
- BALLARD, J.; PALIN, J.; WILLIAMS, I. & CAMPBELL, I. 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*. Vol. **29**, N° **5**: 383-386.
- BARRA, F.; ALCOTA, H.; RIVERA, S.; VALENCIA, V.; MUNIZAGA, F. & MAKSAEV, V. 2013. Timing and formation of porphyry Cu-Mo mineralization in the Chuquicamata district, northern Chile: nE-W constraints from the Toki cluster. *Mineralium Deposita*. Vol. **48**, N° **5**: 629-651.
- BLANCO, N. & TOMLINSON, A. 2009. Carta Chiu Chiu, Región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° **177**, 1 mapa escala 1:50.000: 54 pp. Santiago.
- BORIC, R.; DIAZ, J.; BECERRA, H. & ZENTILLI, M. 2009. Geology of the Ministro Hales Mine (MMH), Chuquicamata district, Chile. Congreso Geológico Chileno, N° 12: 22-26. Santiago.
- BORIC, R.; DIAZ, F. & MAKSAEV, V. 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 40: 246 p., 2 mapas escala 1:500.000. Santiago.

- BRICEÑO, C. 2011. Caracterización y distribución de arcillas en el Yacimiento RT y sus implicancias en procesos metalúrgicos. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 205 pp. Antofagasta.
- CARVAJAL, S. 2022. Modelamiento geológico 3D implícito de las fases marginales del Yacimiento Radomiro Tomic, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 146 pp. Antofagasta.
- CABRERA, M. 2011. Estudio petrográfico y petrológico de los pórfidos alimentadores del Distrito Mina Radomiro Tomic, II Región, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 179 pp. Concepción.
- CAMUS, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería: 267 pp. Santiago.
- CUADRA C, & ROJAS S. 2001. Oxide mineralization at the Radomiro Tomic porphyry copper deposit, northern Chile. *Economic Geology*. Vol. **96**, N° **2**: 387-400.
- CUADRA, P.; ZENTILLI, M.; PUIG, A. & TIDY, E. 1997. Dataciones radiométricas recientes en Radomiro Tomic. Congreso Geológico Chileno N° 8, Actas **2**: 916-919. Antofagasta.
- CAMPBELL, I.; BALLARD, J.; PALIN, M.; ALLEN, C. & FAUNES, A. 2006. U-Pb zircon geochronology of granitic rocks from the Chuquicamata-El Abra porphyry copper belt of northern Chile: excimer laser ablation ICP-MS analysis. *Economic Geology*. Vol. **101**, N° **7**: 1.327-1.344.
- CHONG, G.; y PARDO, R. 1993. Geología del distrito de Chuquicamata, Segunda Región de Antofagasta. Informe (Inédito), Subgerencia de Geología, Superintendencia de Exploraciones y Desarrollo Geológico, CODELCO: 147 p.
- DÍAZ, J. 2010. Actualización de la geología del depósito Mina Ministro Hales (MMH). Jornadas de Geociencias, Codelco Norte, Primera Reunión Bi-Anual Geociencias 2010, Subgerencia de Geología y Geotecnia, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, Calama, p. 109–120.
- DÍAZ, J.; BORIC, R. & RIQUELME, R. 2009. Geología de los sulfuros de Radomiro Tomic (RT), nuevos antecedentes. Congreso Geológico Chileno N° 12: 4 pp. Santiago.
- DILLES, J.; TOMLINSON, A; MARTIN, M. & BLANCO, N. 1997. The El Abra and Fortuna granodiorite complexes: a porphyry copper batholith sinistrally displaced by the Falla Oeste. Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas **3**: 1883-1887. Antofagasta.

- DUHART, P.; MUÑOZ, J.; QUIROZ, D.; MESTRE, A.; & VARAS, G. 2018. Carta Sierra Gorda: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 20, 1 mapa escala 1:100.000: 20 pp. Santiago.
- FAUNES, A.; HINTZE, F.; SIÑA, A.; VÉLIZ, H.; VIVANCO, M. & GEOLOGICAL STAFF. 2005. Chuquicamata, core of a planetary scale Cu-Mo anomaly. In Porter, T.M. (Ed.), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*. PGC Publishing: 24 pp. Adelaida.
- GANSSER, A. 1973. Facts and theories on the Andes. *Journal of the Geological Society*, Vol 129, pp. 93-131.
- GARCÍA, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile: Sociedad Geológica de Chile. Simposio sobre el Geosinclinal Andino N° 3: 138 pp. Santiago.
- HARRINGTON, H. 1961. Geology of parts of Antofagasta and Atacama provinces of northern Chile. *AAPG Bulletin*. Vol. 45, N° 2: 169-197.
- JENSEN, E.; GONZÁLEZ, G.; FAULKNER, D.; CEMBRANO, J. & MITCHELL, T. 2019. Fault-fluid interaction in porphyry copper hydrothermal systems: Faulted veins in Radomiro Tomic, northern Chile. *Journal of Structural Geology*. Vol. 126: 301-317.
- LARA, R. 2020. Estimación de recursos minerales en dominios geometalúrgicos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Metalúrgica (Inédito): 115pp. Concepción.
- LEIVA, G.; VALDÉS, R.; ARAVENA, Y. & VILLARROEL, R. 2000. Caracterización geotécnica-estructural Mina Radomiro Tomic. Congreso Geológico Chileno N° 9. Actas 1 (2): 261-265, Puerto Varas.
- LINDSAY, D. 1997. Structural control and anisotropy of mineralization within the Chuquicamata Porphyry Copper Deposit, Northern Chile. Tesis Doctoral. Dalhousie University, Department of Earth Sciences (Inédito): 381 pp. Halifax.
- LINDSAY, D.; ZENTILLI, M. & ROJAS DE LA RIVERA, J. 1995. Evolution of an active ductile to brittle shear system controlling mineralization at the Chuquicamata porphyry copper deposit, northern Chile. *International Geology Review*. Vol. 37, N° 11: 945-958.
- MAKSAEV, V. 1978. Cuadrángulo Chitigua y sector occidental del Cuadrángulo Cerro Palpana, Región de Antofagasta: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 31, mapa escala 1:50.000: 55 pp. Santiago.
- MAKSAEV, V. & ZENTILLI, M. 1988. Marco metalogénico regional de los megadepósitos de tipo pórfido cuprífero del Norte Grande de Chile: V Congreso Geológico Chileno, Santiago, Extended Abstracts, Vol. 1(B), 181-212.

- MAKSAEV, V. & ZENTILLI, M. 1999. Fission track thermochronology of the Domeyko Cordillera, northern Chile: Implications for Andean tectonics and porphyry copper metallogenesis. *Exploration Mining Geology*. Vol. **8**, N° 1-2: 65-89.
- MALDONADO, A. 2021. Mapeo de sondajes geológico. Protocolo MAN-GRMD-SG-0001. Informe Interno (Inédito): 85 pp., Calama.
- MARQUARDT, J.; ROJO, J.; RIVERA, S. & PIZARRO, J. 2009. Geología del pórfido cuprífero Miranda: nuevo descubrimiento en el cluster Toki, Distrito de Chuquicamata, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 12: 4pp. Santiago.
- MAY, G. 1997. Oligocene to Recent evolution of the Calama basin, northern Chile. Ph.D. Thesis, University of Aberdeen: 274 pp. Aberdeen.
- MAY, G.; HARTLEY, A.; CHONG, G.; STUART, F.; TURNER, P. & KAPE, S. 2005. Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **32**, N° 1: 33-58. Santiago.
- MCINNES, B.; FARLEY, K.; SILLITOE, R. & KOHN, B. 1999. Application of apatite (U-Th)/He thermochronometry to the determination of the sense and amount of vertical fault displacement at the Chuquicamata porphyry copper deposit, Chile: *Economic Geology*: 937-948.
- MEINERT, L. (2011). Observations on the skarn potential of the Carmen and Toki Cluster prospects, Chile. Compilado para CODELCO: 19 pp.
- MONTAÑO, J. 1976. Estudio geológico de la zona de Caracoles y áreas vecinas, con énfasis en el Sistema Jurásico, provincia de Antofagasta, II Región, Chile. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 169 pp. Santiago.
- MPODOZIS, C. & CORNEJO, P. 2012. Cenozoic tectonic and porphyry copper systems of the Chilean Andes. *Society of Economic Geologist, Special publication*. Vol. **16**: 329-360. Santiago.
- MPODOZIS, C. & PERELLÓ, J. 2003. Porphyry copper metallogeny of the middle Eocene-early Oligocene arc of western South America. Relationships with volcanism and arc segmentation: X Congreso Geológico Chileno, Concepción, Extended Abstracts (CD), 1 p.
- NARANJO, J. & PASKOFF, R. 1981. Estratigrafía de los depósitos cenozoicos de la región de Chiu-Chiu Calama, Desierto de Atacama. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **13-14**: 79-85. Santiago.
- NIEMEYER, H. & LEIVA, G. 2000. Esbozo para un modelo estructural del pórfido Chuqui en mina Radomiro tomic. Congreso Geológico Chileno N° 9. Actas **1** (2): 306-31. Puerto Varas.

- NOBLE, D.; MCKEE, E. & MÉGARD, F. 1979. Early Tertiary ‘‘Incaic’’ tectonism, uplift, and volcanic activity, Andes of central Peru: *Geological Society of America Bulletin*, Vol. **90**: p. 903–907.
- ORTEGA, H.; SANDOVAL, A. & ARAYA V. 2006. Caracterización Geológica, Geotécnica y Geometalúrgica 2005-2009, CBV, Mina Radomiro Tomic, Modelo Geológico-Febrero 2006. Codelco Norte, 94 p (Inédito), Calama.
- OSSANDÓN, G.; FRÉRAUT, R.; GUSTAFSON, L.; LINDSAY, D. & ZENTILLI, M. 2001. Geology of the Chuquicamata Mine: A progress report. *Economic Geology*. Vol. **96**: 249- 270.
- PAYAUNA, K. & PARRA, A. 2012. Mineralogía de la Fase Sulfurada del Yacimiento Radomiro Tomic (RT) y su Relación con su Metalogénesis. Congreso Geológico Chileno N° 13: 93- 95, Antofagasta.
- PEÑA, D. 2022. Modelo estructural de la fase 35 del yacimiento Radomiro Tomic, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra. (Inédito): 149pp. Concepción
- PIZARRO, P. 2020. Caracterización Geológica del Molibdeno en el Yacimiento Radomiro Tomic, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad Andrés Bello, Escuela de Geología (Inédito): 140 pp. Concepción.
- PROFFET, J. 2005. Preliminary report on the geology of the Mina Carmen area, northeast of the Chuqui pit, with notes on the Corina drill hole (7500) and on a review of progress on the geologic section through the Toki Cluster. Informe (Inédito), 9 pp.
- PROFFET, J. & DILLES, J. 2007. SHRIMP-RG ion microprobe U-Pb age determinations of intrusive rock units northeast of the Chuquicamata mine, Chile. CODELCO, Informe (Inédito), 15 pp.
- RAMOS, V. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*. Vol. **22**, N° **3**: 183-190.
- RICHARDS, J. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*. Vol. **98**, N° 8: 1.515-1.533.
- RIVERA, S.; ALCOTA, H.; FONTECILLA, C. & KOVACIC, P. 2009. Supergene modification of porphyry columns and the application to exploration with special reference to the southern part of the Chuquicamata district, Chile. *Society of Economic Geologists. Special Publication*. Vol. **14**: 1–14.
- RIVERA, S.; ALCOTA, H.; PROFFETT, J.; DÍAZ, J.; LEIVA, G. & VERGARA, M. 2012. Update of the geologic setting and porphyry Cu-Mo deposits of the Chuquicamata district, northern Chile. *Society of Economic Geologist. Special publication*. Vol. **16**: 19-54.

- ROJAS, R. 2019. Geología del Yacimiento Radomiro Tomic. Informe Interno (Inédito): 85 pp., Calama.
- ROJAS, R. 2020. Modelamiento de Fallas y Dominios Estructurales, Modelo Geológico de Radomiro Tomic. Informe Interno (Inédito): 28 pp., Calama.
- ROJAS, M. & CUADRA, P. 2000. Caracterización de óxidos de cobre del Yacimiento Radomiro Tomic. Congreso Geológico Chileno N° 9: 341-345. Puerto Varas.
- SILLITOE, R. & PERELLÓ, J. 2005. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Society of Economic Geologist*. One Hundreth Anniversary Volume: 845-890
- SOTO, M. 2013. Pressure-temperature-time paths of the Limón Verde metamorphic complex, Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 125 pp. Santiago.
- TOMLINSON, A. & BLANCO, N. 2008. Geología de la franja El Abra-Chuquicamata, II Región (21°45'-22°30'S). Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-08-35, 5 mapas escala 1:50.000: 196 p. Santiago.
- TOMLINSON, A.; BLANCO, N. & DILLES, J. 2010. Carta Calama, Región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 8, 3 anexos, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- TOMLINSON, A.; BLANCO, N.; DILLES, J.; MAKSAEV, V. & LADINO, M. 2018. Carta Calama, Región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N° 199, 1 mapa escala 1:100.000, 1 CD con anexos, Santiago.
- TOMLINSON, A.; DILLES, J. & MAKSAEV, V. 2001. Application of apatite (U-Th)/He Thermochronometry to the determination of the sense and amount of vertical fault displacement at the Chuquicamata Porphyry Copper Deposit, Chile- A Discussion. *Economic Geology*. Vol. 96, N° 5: 1.307-1.310.
- VERDUGO, A. 2019. Geología y Geoquímica del Sistema Corina-Carmen, Distrito Chuquicamata-Radomiro Tomic, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 105 pp. Concepción.
- ZENTILLI, M.; BORIC, R.; HEAMAN, L.; MATHUR, R. & HANLEY, J. 2015. NE-W developments on the geology of MMH: is it the missing half of Chuquicamata?. Congreso Geológico Chileno N° 14. Actas 2: 4 pp. La Serena.
- ZENTILLI, M.; MAKSAEV, V.; SORIC, R. & WILSON, J. 2018. Spatial coincidence and similar geochemistry of Late Triassic and Eocene-Oligocene magmatism in the Andes of

northern Chile: evidence from the MMH porphyry type Cu-Mo deposit, Chuquicamata District. *International Journal of Earth Sciences*. Vol. **107**, N° **3**: 1097-1126.