



TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Título:

- Caracterización geológica
- (Pórfido – skarn), minera y ambiental del proyecto calderón
- – Calderoncito.

Autora: Lic.Florencia Madona

Director: Dr. Diego Guido

2025



Resumen

Este trabajo final integrador aborda la caracterización geológica, minera y ambiental del proyecto Calderón–Calderoncito, ubicado en la Cordillera Principal de San Juan, Argentina. La investigación se enfoca en la etapa de exploración inicial-intermedia, integrando análisis espectral, geoquímica, geofísica y estudios de campo para identificar zonas con alto potencial mineralizado.

El análisis espectral con imágenes ASTER permitió reconocer alteraciones hidrotermales, mientras que la geoquímica de superficie reveló anomalías de Cu, Mo, Au, Pb y Zn. Los estudios geofísicos confirmaron intrusiones y zonas con alta cargabilidad. Además, se presenta un panorama general del marco legal, ambiental y social que regula la exploración minera en Argentina. También se describen de forma general métodos de explotación y tratamiento utilizados para la extracción de cobre, sin implicar su aplicación directa al proyecto. Por último, se analiza la evolución del mercado del cobre en el contexto de la transición energética.

Palabras clave: Exploración minera, sistema pórfido-skarn, geoquímica, geofísica, análisis espectral, alteración hidrotermal, cobre, imagen satelital ASTER, evaluación ambiental, marco legal minero.

Abstract

This final integrative work presents the geological, mining, and environmental characterization of the Calderón–Calderoncito project, located in the Principal Cordillera of San Juan, Argentina. The study focuses on the early-to-intermediate exploration stage, integrating spectral analysis, geochemistry, geophysics, and fieldwork to identify areas with high mineral potential.

ASTER satellite imagery enabled the detection of hydrothermal alterations, while surface geochemistry revealed Cu, Mo, Au, Pb, and Zn anomalies. Geophysical surveys confirmed the presence of intrusions and zones of high chargeability. The work also outlines the legal, environmental, and social framework governing mining exploration in Argentina. In addition, general mining and processing methods for copper extraction are described without implying their direct applicability to this project. Finally, copper market trends are discussed in the context of the global energy transition.

Keywords: Mineral exploration, porphyry-skarn system, geochemistry, geophysics, spectral analysis, hydrothermal alteration, copper, ASTER satellite imagery, environmental assessment, mining legal framework.

CONTENIDO

1. Introducción	5
1.1 Objetivos	5
1.2 Ubicación del área de estudio	5
1.3 Antecedentes del proyecto Calderón – Calderoncito.....	6
1.4 Geología Regional y marco tectónico regional.....	7
2. Materiales y métodos.....	10
3. Análisis espectral	11
3.1 Introducción	11
3.2 Marco teórico	11
3.2.2-Tipos de espectros y bandas espectrales.....	11
3.3 Marco metodológico de ASTER	15
3.4 Resultados	17
3.5 Conclusiones.....	22
4. Geología del área.....	24
4.1 Unidades geológicas principales	24
4.2 Descripción de las unidades aflorantes.....	24
4.3 Mapeo Geológico	29
5. Geoquímica	31
5.1 Introducción	31
5.2 Métodos geoquímicos.....	31
5.3 Resultados	33
6. Geofísica	37
6.1 Introducción	37
6.2 Métodos geofísicos aplicados y respectivos resultados.....	38
7. Aspectos legales, ambientales y sociales	46
7.1 Introducción	46
7.2 Marco Legal	46
7.3 Aspectos ambientales	50
7.4 Aspectos sociales.....	54
7.5 Conclusiones.....	56
8. Explotación y tratamientos metalúrgicos	57
8.1 Introducción	57
8.2 Métodos de explotación.....	57
8.3 Procesos de conminución y concentración de minerales.....	64
8.4 Procesos de extracción (Hidrometalurgia).....	67

8.5	Procesos Pirometalúrgicos	70
9.	Mercado	72
9.1	Introducción	72
9.2	Visión General del Mercado	72
9.3	Factores que Afectan el Mercado.....	73
9.4	Perspectivas Futuras.....	74
10.	Conclusiones y recomendaciones	76
11.	Agradecimientos.....	77
12.	Bibliografía.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	6
Figura 2. Distribución de la Cordillera Principal y área de estudio.....	7
Figura 3. Espectro electromagnético (Frenzel et al., 2003)	12
Figura 4. Características espectrales de algunos minerales en los subsistemas VNIR y SWIR del sensor ASTER (Rodríguez, 2008)	14
Figura 5. Características espectrales de algunos minerales en el subsistema TIR del sensor ASTER (Rodríguez, 2008)	14
Figura 6: ASTER falso color, combinación RGB 631.....	18
Figura 7: Mapeo interpretativo con imagen ASTER falso color RGB 631.....	18
Figura 8: Imágenes Falso color, combinación de bandas RGB. A) RGB 641 (Coloraciones verdes para arcillas y amarillo para óxidos), B) RGB 461 (Coloración morada para arcillas y amarillo pálido para óxidos), C) RGB 469 (Color marrón para arcillas) y D) RGB 531 (Coloraciones verdes para arcillas)	19
Figura 9: Imágenes producto de relaciones de banda con la herramienta Raster color Slice aplicada. A) 5/8, B) 4/5 C) 4/6 y D) 2/1.....	20
Figura 10: Imágenes producto de RGB con band ratios (A: Argílica, AA: Argílica avanzada, P: Propilítica). A) RGB 6/5 7/5 8/5 (Coloración cian para alteración argílica y roja para propilítica) y B) 4/5 4/6 4/8 (Coloración amarilla para alteración argílica y azul para propilítica).	20
Figura 11: Imágenes producto de la aplicación de los índices de Ninomiya con la herramienta Raster color Slice aplicada. A) OH1a y B) OH1b.	21
Figura 12. Mapa de alteraciones y litologías del área de estudio basado en imágenes ASTER.....	23
Figura 13. Muestra de mano de granito recolectada en el sector oeste del área de estudio.....	25
Figura 14. Muestras mano de rocas calcáreas. A) Calcarenita, B) Skarn y C) Mármol.....	26
Figura 15. Muestras de mano de los intrusivos básicos del área de estudio.....	27
Figura 16. Muestras de mano correspondientes a Dioritas de la Formación Pachón. A) Diorita. B) Microdiorita.....	27
Figura 17. Muestras de mano correspondientes a las litologías de posible edad Miocena. A) Granito. B) Dacita.	28
Figura 18. Muestras de mano correspondientes a las brechas observadas en el área de estudio. A) Brecha de magnetita. B) Brecha de turmalina. C) Brecha hidrotermal.....	29
Figura 19. Mapa geológico del área de estudio.....	30
Figura 20. Zonación de elementos traza en los sistemas tipo pórfido (Halley et al., 2015)	33

Figura 21. Mapas de calor mostrando la distribución del Cu y Mo.....	33
Figura 22. Mapas de calor mostrando la distribución del Au y Ag.....	34
Figura 23. Mapas de calor mostrando la distribución del Pb y Zn.....	34
Figura 24. Mapa de distribución de las áreas de interés en base a anomalías geoquímicas.....	36
Figura 25. Mapa de intensidad magnética total del área de estudio.....	41
Figura 26. Modelo de cargabilidad del área de estudio.....	44
Figura 27. Modelo de resistividad del área de estudio.....	45
Figura 28: Esquema del modelo económico de beneficio nulo (Panorama minero, 2006).....	60
Figura 29 Proyección de la demanda de cobre refinado por sector hasta 2050 (SyP Global, 2022).	73
Figura 30. Proyección del precio del cobre según el London Metal Exchange (SyP Global Market Intelligence, 2023)	75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Características de los subsistemas de ASTER (ERSDAC, 2002).....	13
Cuadro 2: Cociente de bandas para los diferentes tipos de alteración.....	17
Cuadro 3: Relación de los índices de Ninomiya con los minerales de alteración.....	17
Cuadro 4: Tabla cronoestratigráfica de las unidades geológicas del área de estudio.....	24

1. Introducción

El presente manuscrito constituye el Trabajo Final Integrador (TFI) de la Carrera de Especialización en Geología Minera (CEGM) de la Universidad de Buenos Aires.

El TFI consiste en una contribución al conocimiento geológico del área Calderón-Calderoncito, caracterización de litologías existentes, alteración y mineralización. Con este trabajo se realizó una mirada integral de la minería, abarcando desde la identificación de un área prospectiva hasta la determinación de un yacimiento económicamente explotable; aunque el área de estudio se encuentra en una etapa de exploración inicial - intermedia, en el presente manuscrito se abordan los siguientes puntos:

- Geología del área
- Análisis espectral
- Geoquímica
- Geofísica
- Aspectos legales, ambientales y sociales
- Explotación y tratamientos metalúrgicos
- Mercado

1.1 Objetivos

El objetivo del trabajo final es realizar una integración de las temáticas abordadas durante los diferentes módulos de la CEGM, teniendo como foco de investigación la etapa de exploración dentro de un proyecto minero y considerando, además, el marco ambiental y legal que permite llevar a cabo la exploración, posibles métodos de exploración y tratamiento y la situación del mercado del cobre.

El presente trabajo tiene como objetivos específicos establecer las asociaciones de alteración y su distribución espacial a través del análisis de imágenes satelitales, identificar y discriminar diferentes zonas mineralizadas de interés a partir de la utilización de datos de geoquímica de superficie y geofísica, y, además, plantear futuras actividades para el proyecto Calderón, con el fin de definir nuevos blancos de exploración.

1.2 Ubicación del área de estudio

El Proyecto Calderón-Calderoncito (31,282959°S; 70,513615°W) se encuentra ubicado en la unidad morfoestructural Cordillera Principal, en el denominado Portezuelo del Calderón, Departamento Calingasta, Provincia de San Juan. Está situado en los Andes Centrales, con alturas que van desde los 3100 a los 4000 metros sobre el nivel del mar (msnm). A 350 km de la Ciudad de San Juan y a 150 Km de la localidad de Calingasta. El acceso al proyecto se realiza desde la Villa de Calingasta continuando en dirección al oeste a través del camino minero que remonta los ríos Calingasta y de La Totorá, atravesando los portezuelos de La Totorá y Cabeza de León, para descender a través del Río de Araya y luego a la confluencia con el Río de Las Salinas. Se prosigue hacia el sur por el valle del río Salinas hasta el paraje conocido como Puesto Vega La Piedrada, desde donde se puede remontar, en dirección al poniente, el río de Calderón pudiendo accederse a los diferentes puntos de interés del proyecto, para lo cual hay que recorrer una distancia de aproximadamente 18 Km. Cabe mencionar que existe otro camino desde la localidad de Barreal, a través de la Ruta Provincial Nº 400, que conduce hasta el yacimiento El Pachón. (Fig. 1.)

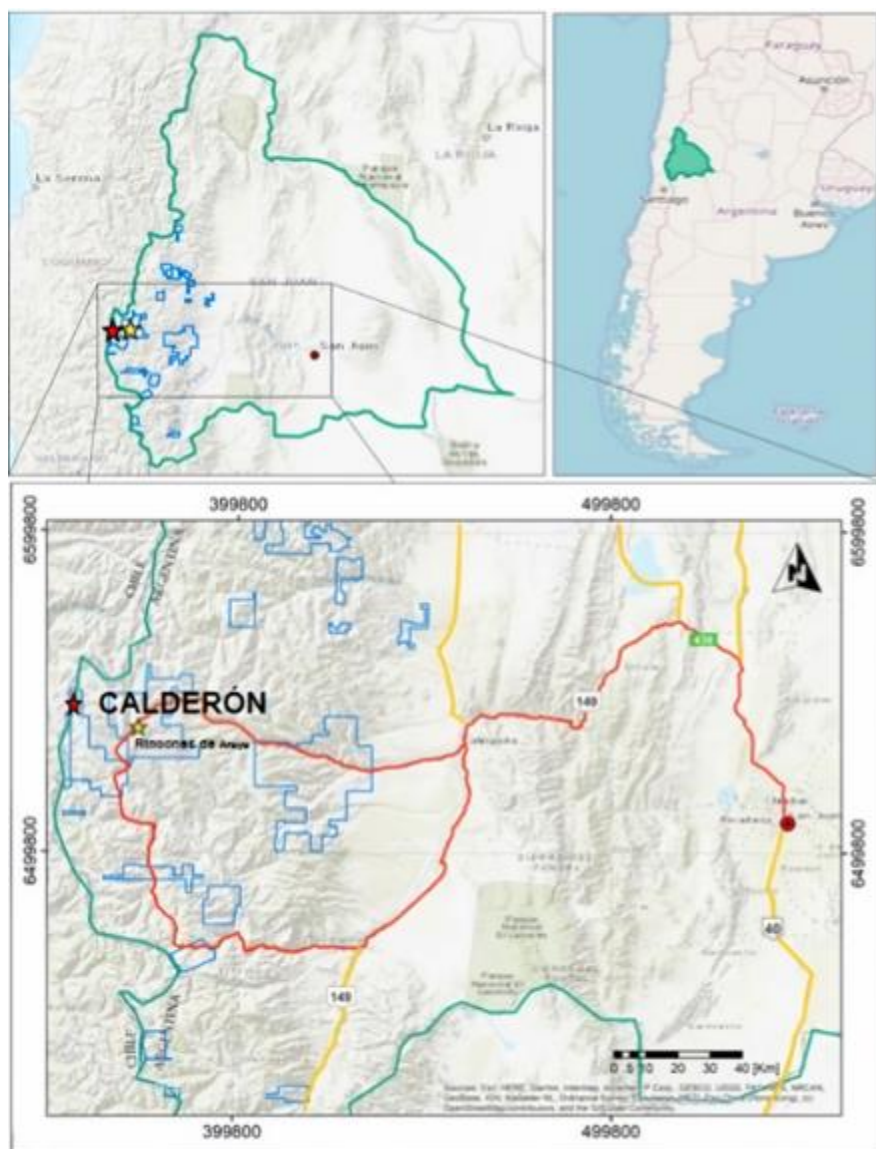


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

1.3 Antecedentes del proyecto Calderón – Calderoncito

El Departamento de Minería de la Provincia de San Juan llevó a cabo los primeros trabajos de prospección durante el año 1982, los cuales consistieron en una fotointerpretación a escala 1:50.000 con su correspondiente control de campo y un muestreo geoquímico de carácter orientativo que permitió delimitar especialmente el área de interés, la que quedó restringida a un sector con anomalías en metales de oro y cobre. (Argentina Minera S.A., 2007)

A finales de la década de 1980, el Gobierno de San Juan, junto con el Departamento de Minería, procedió a la creación del Área de Reserva Provincial “Calderón-Calderoncito” que abarca una superficie de aproximadamente 3.250 hectáreas y cuyo titular es el Instituto Provincial de Exploraciones y Explotaciones Mineras (IPEEM).

En el período comprendido entre 1993 al 2005 la concesión minera fue objeto de sucesivos procesos licitatorios por parte del IPEEM lo cuales fueron declarados desiertos, por lo cual en diciembre del 2005 la empresa Argentina Minera SA. (AMINSA) resultó adjudicataria del Área de Reserva “Calderón – Calderoncito”, constituyéndose a partir de entonces en la operadora del proyecto.

El objetivo principal de AMINSA fue delimitar espacialmente zonas con evidencias de alteración hidrotermal y consiguientemente áreas mineralizadas a partir de muestreo geoquímico, prospección geofísica, mapeo geológico regional y de detalle y perforaciones (Argentina Minera S.A., 2012).

Durante el periodo comprendido entre 2018 y 2022, la empresa Fortescue Metals Group Ltd. realizó trabajos exploratorios (geoquímica, geofísica, perforaciones, mapeo regional y de detalle) con el objetivo de detectar manifestaciones de Cu y Mo relacionados con depósitos del tipo pórfido y skarn.

1.4 Geología Regional y marco tectónico regional

1.4.1- Geología Regional

La Cordillera Principal constituye una provincia morfoestructural andina ubicada en el margen occidental de la cuenca de antepaís, con un desarrollo latitudinal comprendido entre los 30° y 35°S en territorio argentino, extendiéndose además hacia el norte de Chile (Ramos, 1999; Giambiagi et al., 2016). En Argentina, su traza abarca sectores occidentales de las provincias de San Juan y Mendoza (Fig.2).

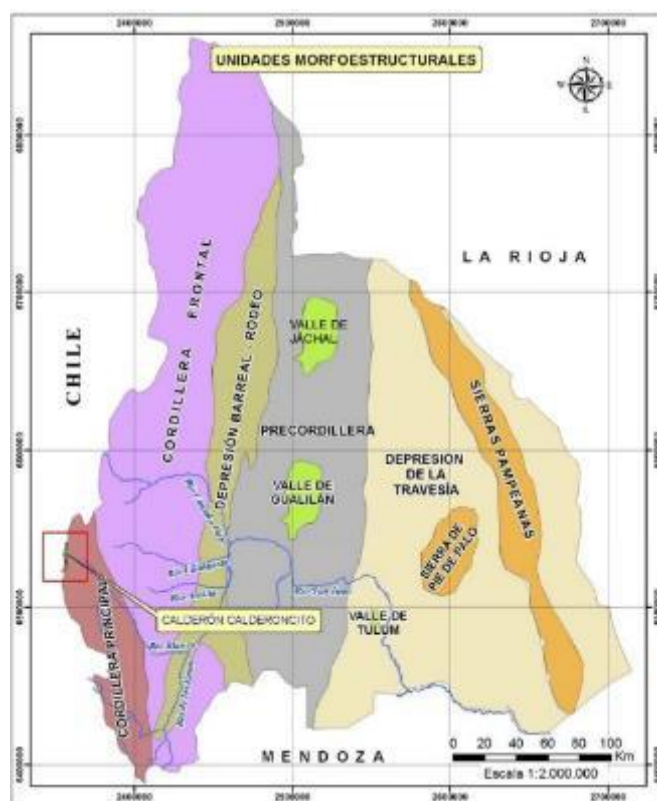


Figura 2: Distribución de la Cordillera Principal y área de estudio.

La Cordillera Principal en la provincia de San Juan presenta una compleja evolución geológica, reflejada en una variada sucesión de unidades litológicas que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cenozoico. En el sector sanjuanino, esta cordillera se desarrolla entre los 30° y 32°S, extendiéndose a lo largo del límite internacional con Chile, y está dominada por la faja plegada y corrida de La Ramada, que involucra tanto el basamento como las unidades sedimentarias y volcánicas suprayacentes (Cristallini, 1999; Ramos, 1999).

El basamento en esta región está representado por unidades del Paleozoico, como la Formación San Juan, de edad Ordovícica, compuesta principalmente por calizas y margas con abundante fauna fósil (Baldis et al., 1984; Astini, 2003). Estratigráficamente, la secuencia inicia con el Grupo Choiyoi, de edad Permo-Triásica, compuesto por vulcanitas ácidas a intermedias, incluyendo andesitas, riolitas, tobas e ignimbritas. Estas unidades afloran en diversas localidades, como los arroyos Las Piedras Sur y Maitencito, y en la desembocadura del río Piuquenes (Llambías et al., 2003; Cristallini, 1999).

Sobre el Grupo Choiyoi se desarrollan unidades sedimentarias mesozoicas. La Formación El Gaucho, de probable edad Jurásico inferior, está compuesta por sedimentitas clásticas ligeramente metamorizadas, incluyendo conglomerados, areniscas, grauvacas y limolitas de variados colores. Esta formación representa depósitos continentales que fueron posteriormente cubiertos en discordancia por unidades del Jurásico medio a superior (Cristallini, 1999). El Cretácico está representado por el Grupo Mendoza, que incluye la Formación Tordillo (areniscas y conglomerados), la Formación Vaca Muerta (lutitas negras y calizas) y la Formación Agrio (calizas y margas), indicando una transición de ambientes continentales a marinos (Ramos, 1999; Leanza et al., 2001).

En el área de estudio, se identifican unidades volcánicas y plutónicas de edad cretácica a terciaria. La Formación Tascadero, de edad cretácica, está conformada por conglomerados, areniscas y limolitas de origen continental (Kozlowski et al., 1996). La Formación Pachón, de edad Cretácico superior a Terciario temprano, está compuesta por andesitas, riolitas y riodacitas, y es intruida por cuerpos dioríticos-tonalíticos de edad terciaria conocidos como Diorita Pachón, los cuales se encuentran genéticamente relacionados con la mineralización tipo pórfido Cu-Mo (Sillitoe, 1973; Zappettini, 1999).

El magmatismo Mioceno, comprendido entre aproximadamente 20 y 8 Ma, constituye un evento geológico fundamental que controla la configuración estructural y la evolución metalogenética del sector. Este ciclo magmático está asociado a la migración hacia el este del arco magmático relacionado con la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Kay et al., 2005; Bissig et al., 2008). La expresión magmática incluye intrusiones plutónicas calcoalcalinas y centros volcánicos de composiciones intermedias a ácidas (andesitas, dacitas y riodacitas) con texturas porfídicas, además de evidencias de procesos hidrotermales intensos con alteraciones potásica, fílica y propilítica, características típicas de sistemas tipo pórfido Cu-Mo (Sillitoe, 1973; Mpodozis y Kay, 1990). En el área de estudio, estas manifestaciones se corresponden con las unidades volcánicas y plutónicas previamente mencionadas, destacando el vínculo genético entre la Diorita Pachón y la mineralización porfídica observada en el yacimiento El Pachón.

Finalmente, el registro estratigráfico culmina con depósitos fluvio-glaciares cuaternarios que rellenan los valles y quebradas actuales, representando los procesos geomorfológicos más recientes en la región (Ramos, 1999; Cristallini, 1999).

1.4.2- Marco tectónico regional

La zona del yacimiento se encuentra dentro de la faja plegada y corrida de La Ramada, en el extremo sudoccidental de la Cordillera Principal sanjuanina, una región de significativa importancia geológica debido a la concentración de depósitos tipo pórfido de cobre, entre los que destacan Altar, Los Azules, Piuquenes y Rincones de Araya (Ramos, 1999; Cristallini, 1999).

Esta faja representa una estructura tectónica clave resultado de los procesos compresivos vinculados a la orogenia andina, originados por la subducción oblicua de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana desde el Cenozoico (Allmendinger, 1991; Ramos et al., 2002).

El régimen tectónico predominante en esta región corresponde a un acortamiento horizontal significativo, que ha provocado un intenso plegamiento y desplazamientos por fallas inversas, generando una faja plegada y corrida de rumbo aproximadamente NNW-SSE (Kley y Monaldi, 1998). Las estructuras tectónicas resultantes incluyen corrimientos, cabalgamientos y zonas de cizalla que han influido decisivamente en la configuración estructural cortical de la Cordillera Principal (Ramos, 1999; Mpodozis y Ramos, 1990). Estas estructuras funcionan como conductos preferenciales para la ascensión magmática y circulación hidrotermal, lo que condiciona la localización y concentración de mineralizaciones cupríferas y otros tipos de depósitos asociados.

No obstante, para comprender plenamente el marco tectónico de esta región, es esencial considerar la evolución previa durante el Cretácico, cuando la región actuaba como parte de una cuenca de retroarco (back-arc) activa, asociada a un régimen tectónico extensional. Esta extensión se desarrolló en respuesta a una geometría de subducción relativamente plana, favoreciendo el adelgazamiento cortical, el desarrollo de cuencas continentales y la acumulación de secuencias volcánicas y sedimentarias, así como el emplazamiento de cuerpos intrusivos intermedios a ácidos (Mpodozis y Ramos, 1990; Ramos, 1999; Zappettini, 1999). Este evento extensional permitió la formación de un arco volcánico cretácico, cuyo registro está parcialmente preservado en unidades como la Formación Pachón, y constituye un antecedente geodinámico relevante para los eventos magmáticos cenozoicos posteriores.

El magmatismo cenozoico en esta zona está estrechamente relacionado con la dinámica tectónica regional, manifestándose a través de la intrusión de cuerpos plutónicos y la emersión de vulcanitas que definen un arco magmático activo durante el Mioceno (Kay et al., 2005; Ramos et al., 2002). La interacción entre la deformación tectónica y el magmatismo ha generado un entorno propicio para la formación de sistemas mineralizados, particularmente depósitos porfíricos de Cu-Mo, controlados estructuralmente por fallas inversas y zonas de cizalla dentro de la faja La Ramada. Por lo tanto, la geodinámica andina en esta región constituye un marco fundamental para la interpretación de la evolución geológica y mineralógica de la Cordillera Principal en San Juan.

2. Materiales y métodos

La caracterización del proyecto Calderón–Calderoncito se desarrolló mediante una integración metodológica que abarca herramientas de teledetección, geoquímica, geofísica y mapeo geológico. Las técnicas aplicadas permitieron evaluar de manera complementaria el potencial mineralógico del área de estudio, ubicada en la Cordillera Principal de San Juan, Argentina.

En una primera etapa, se utilizaron imágenes satelitales ASTER para la identificación remota de alteraciones hidrotermales. Estas imágenes fueron sometidas a preprocesamiento y procesamiento espectral, aplicando combinaciones de bandas, cocientes, índices espectrales y técnicas de clasificación para generar mapas temáticos de alteración.

En paralelo, se realizaron muestreos geoquímicos de superficie, sobre los cuales se analizaron concentraciones de elementos traza asociados a mineralizaciones tipo pórfido y skarn. La representación espacial de estos datos se llevó a cabo mediante mapas de calor generados en un sistema de información geográfica (GIS), utilizando interpolación por distancia inversa (IDW) para visualizar la dispersión geoquímica y detectar zonas anómalas.

Complementariamente, se aplicaron métodos geofísicos tanto pasivos como activos. Entre ellos, se destaca la helimagnetometría para la detección de cuerpos intrusivos, y estudios eléctricos (Resistividad y Polarización Inducida) para evaluar las propiedades físicas del subsuelo. Estas técnicas permitieron delinear estructuras y zonas de interés potencialmente mineralizadas.

Las observaciones de campo, incluyendo el mapeo geológico y la toma de muestras, complementaron los análisis previos, validando e integrando los resultados obtenidos por las metodologías remotas y geofísicas. Esta aproximación metodológica integrada permitió establecer una base sólida para la identificación de áreas prioritarias de exploración en el proyecto.

3. Análisis espectral

3.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar y explicar el análisis espectral y su relevancia en el estudio de la geología del área utilizando imágenes ASTER.

El análisis espectral es una herramienta especialmente útil en geología minera debido a que permite la identificación y mapeo de minerales de manera remota y precisa. Con el uso de imágenes ASTER es posible detectar firmas espectrales específicas de minerales y rocas en el área de estudio, facilitando la identificación de zonas con alta concentración de minerales de interés. Además, esta técnica permite delimitar cuerpos y caracterizar los tipos de rocas presentes sin la necesidad de realizar extensivos trabajos de campo, reduciendo significativamente los costos y el tiempo asociados a la exploración minera.

3.2 Marco teórico

3.2.1- Introducción al análisis espectral

La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección, una disciplina que abarca no solo la captura de imágenes desde el aire o el espacio, sino también su procesamiento para aplicaciones específicas (Chuvieco, 1995). En este contexto, el análisis espectral juega un papel importante al permitir la identificación y caracterización de materiales en función de sus firmas espectrales, las cuales son únicas para cada tipo de objeto.

Para que la observación remota sea efectiva, se requieren tres elementos básicos: el sensor, el objeto observado y el flujo energético que los conecta. Este flujo energético, en forma de radiación electromagnética, se origina en el objeto mediante la reflexión de la luz solar o, en algunos casos, por emisión directa del objeto o el sensor mismo (Chuvieco, 1995).

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se propaga en forma de ondas armónicas continuas a la velocidad de la luz, caracterizadas por su longitud de onda (λ) y frecuencia (F). Estos parámetros son fundamentales en el análisis espectral, ya que cada material interactúa con la radiación electromagnética de manera única, generando firmas espectrales distintivas que pueden ser utilizadas para su identificación y estudio.

3.2.2-Tipos de espectros y bandas espectrales

El espectro electromagnético abarca una amplia gama de energía radiante, que puede ser caracterizada por su longitud de onda o frecuencia. Aunque esta sucesión de valores es continua, se establecen bandas donde la radiación electromagnética muestra comportamientos similares, formando lo que se conoce como espectro electromagnético. (Fig.3)

Desde la perspectiva de la minería, es esencial comprender las diversas bandas espectrales utilizadas en la teledetección para obtener información crucial sobre las características geológicas y minerales de la superficie terrestre (Rodríguez, 2008):

- **Espectro Visible (400 a 700 nm):** Esta banda abarca la luz visible para el ojo humano y coincide con las longitudes de onda donde la radiación solar es máxima. La minería, las diferentes

longitudes de onda en esta banda pueden revelar detalles sobre la composición mineralógica de las rocas y minerales expuestos en la superficie.

- **Infrarrojo Cercano (700 a 1300 nm):** También conocido como infrarrojo reflejado, es especialmente útil en la identificación de minerales y la caracterización de la vegetación circundante. En la minería, esta banda puede ayudar a distinguir entre diferentes tipos de minerales y rocas, así como a detectar alteraciones hidrotermales y concentraciones de minerales de interés.

- **Infrarrojo Medio (1300 a 8000 nm):** En esta banda, se combinan los procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre. El análisis de esta banda puede proporcionar información valiosa sobre la mineralogía y la estructura geológica del área de estudio.

- **Infrarrojo Lejano o Térmico (8000 a 14000 nm):** Esta parte del espectro corresponde a la porción emisiva, donde se detecta el calor emitido por la superficie terrestre. En la minería, el análisis de esta banda puede ser útil para identificar cambios en la temperatura superficial que podrían indicar la presencia de estructuras geotérmicas.

- **Microondas (a partir de 1 mm):** Las microondas son de interés debido a su capacidad para penetrar la cobertura nubosa y proporcionar información sobre la topografía y la composición del subsuelo. Estas bandas pueden ser utilizadas para mapear estructuras geológicas ocultas y detectar depósitos minerales bajo la superficie terrestre.



Figura 3: Espectro electromagnético (Frenzel et al., 2003).

3.2.3- Imágenes satelitales ASTER

Entre las plataformas satelitales más utilizadas en aplicaciones mineras se encuentran ASTER. Estos sistemas de teledetección proporcionan imágenes de alta resolución espacial y espectral, lo que permite a los geólogos obtener información detallada sobre las características geológicas y minerales de una región específica.

El sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un instrumento multispectral desarrollado en colaboración entre la NASA y el Ministerio de Comercio, Economía e Industria de Japón (METI), lanzado en 1999 a bordo del satélite TERRA. Su diseño avanzado permite capturar imágenes con alta resolución espectral en diferentes rangos, incluidos el visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo térmico, características que lo hacen particularmente útil para el análisis de alteraciones hidrotermales, mapeo de minerales y estudios litológicos. Estas capacidades son especialmente relevantes en el contexto geológico del área de estudio, donde se busca identificar patrones espectrales asociados a procesos geológicos clave. La implementación de esta metodología multispectral se fundamenta en su capacidad para proporcionar información detallada y confiable de la superficie terrestre, lo que facilita la identificación de zonas de interés para la exploración y la caracterización geológica.

El sensor ASTER adquiere escenas con un ancho de barrido de 60x60 Km, las cuales son captadas a una altura de 705 Km (Rodríguez, 2008), adicionalmente el sensor tiene una resolución espectral que va desde 0.520 hasta 11.650 (μm) micrómetros, distribuida en 14 bandas que a su vez se agrupan en tres subsistemas independientes. Estos subsistemas son el VNIR (Visible and Near Infrared) con tres bandas (1-3) con resolución espectral (0.52 a 0.86 μm) y una resolución espacial de 15m, el SWIR (Short Wave Infrared) con seis bandas (4-9) con resolución espectral (1.6 a 2.43 μm) y una resolución espacial de 30m y, por último, el TIR (Thermal Infrared) con cinco bandas (10-14) con resolución espectral (8.125 a 11.65 μm) y una resolución espacial de 90m (Cuadro 1).

Cuadro 1: Características de los subsistemas de ASTER (ERSDAC, 2002).

Subsystem	Band No.	Spectral Range (μm)	Radiometric Resolution	Absolute Accuracy (s)	Spatial Resolution	Signal Quantization Levels
VNIR	1	0.52 - 0.60	NEΔr ≤ 0.5 %	≤ ±4 %	15 m	8 bits
	2	0.63 - 0.69				
	3N	0.78 - 0.86				
	3B	0.78 - 0.86				
	4	1.600 - 1.700				
SWIR	5	2.145 - 2.185	NEΔr ≤ 0.5 %	≤ ±4 %	30 m	8 bits
	6	2.185 - 2.225	NEΔr ≤ 1.3 %			
	7	2.235 - 2.285	NEΔr ≤ 1.3 %			
	8	2.295 - 2.365	NEΔr ≤ 1.3 %			
	9	2.360 - 2.430	NEΔr ≤ 1.0 %			
	10	8.125 - 8.475	NEΔr ≤ 1.3 %			
TIR	11	8.475 - 8.825	NEΔT ≤ 0.3 K	≤ 3K(200-240K) ≤ 2K(240-270K) ≤ 1K(270-340K) ≤ 2K(340-370K)	90 m	12 bits
	12	8.925 - 9.275				
	13	10.25 - 10.95				
	14	10.95 - 11.65				

A continuación, se mencionan algunas de las aplicaciones geológicas utilizando los diferentes subsistemas ASTER:

- **El VNIR** está diseñado para detectar vibraciones específicas de metales de transición, como el hierro, y de algunas tierras raras. Compuesto por tres bandas que capturan imágenes tanto en

la vista vertical (Nadir) como en la vista atrás (Backward), permitiendo la creación de pares estereoscópicos para un análisis más detallado.

- **El SWIR** es esencial para detectar vibraciones moleculares de minerales como hidratos e hidróxidos de aluminio, hierro, magnesio y carbonatos. Sus seis bandas se asocian a longitudes de onda específicas, lo que facilita la identificación de minerales típicos de diversas alteraciones. (Fig. 4)

- **El TIR** es fundamental para la detección de minerales formadores de rocas, como los silicatos, mediante sus picos de absorción característicos en el espectro térmico. Además, este subsistema se utiliza en la monitorización de temperaturas y gases a través de imágenes nocturnas, proporcionando información valiosa para diversas aplicaciones, incluida la minería. (Fig. 5).

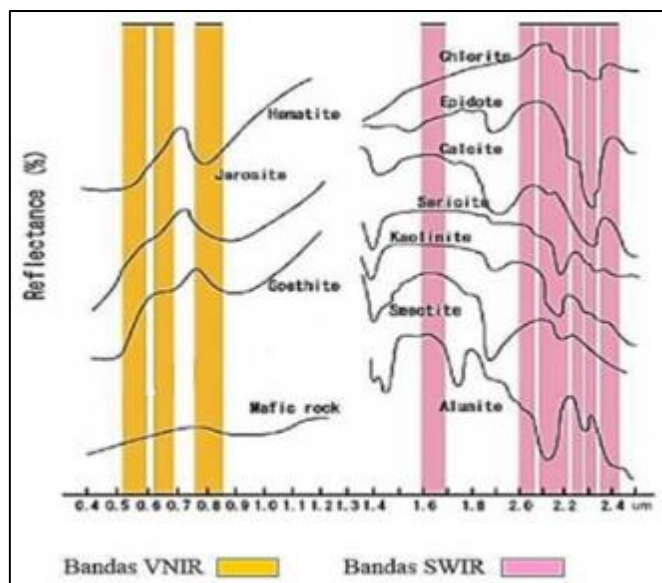


Figura 4: Características espectrales de algunos minerales en los subsistemas VNIR y SWIR del sensor ASTER (Rodríguez, 2008).

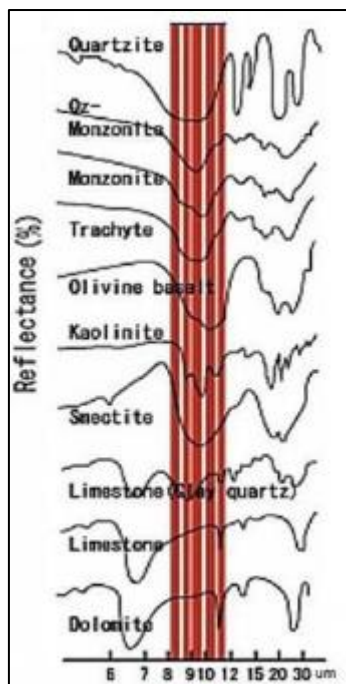


Figura 5: Características espectrales de algunos minerales en el subsistema TIR del sensor ASTER (Rodríguez, 2008).

3.2.4- Espectrometría de reflectancia (SWIR)

La espectrometría de reflectancia es una técnica de identificación de minerales basada en la emisión de radiación electromagnética en la región del espectro infrarrojo cercano (SWIR). Dentro de este rango, algunos iones y enlaces metal-ion tienen absorciones muy definidas, que permiten reconocer su existencia dentro de la muestra analizada (Pérez et al., 2010). La mayoría de estos iones y enlaces se encuentran en los minerales de alteración hidrotermal, por este motivo el método es de amplia aplicación en la búsqueda de áreas mineralizadas.

El funcionamiento de esta tecnología se basa en las vibraciones características de los enlaces iónicos presentes en el agua y en los minerales que contienen grupos OH. Cuando la radiación infrarroja interactúa con estos enlaces, se absorbe energía en longitudes de onda específicas, generando un espectro de reflectancia con características distintivas de absorción. Este patrón es crucial para la identificación mineral (Mamani, 2017).

La espectrometría de reflectancia se fundamenta en la captura de las firmas espectrales de los minerales, las cuales son patrones únicos de absorción y reflexión de la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Estas firmas espectrales son el resultado de las interacciones entre la radiación incidente y las características físicas y químicas de los minerales presentes en la muestra. (Mamani, 2017)

Cada mineral exhibe una firma espectral característica debido a las vibraciones de los enlaces químicos presentes en su estructura cristalina. Al analizar el espectro de reflectancia de una muestra, se pueden identificar las bandas de absorción y reflexión asociadas a los minerales presentes en la muestra. La interpretación de estas firmas espectrales permite determinar la composición mineralógica de la muestra y, por lo tanto, inferir información sobre su historia geológica y su potencial mineral.

En el contexto de la exploración minera, el rango espectral SWIR no solo facilita la identificación mineral, sino que también sirve como una herramienta para la vectorización. Es esencial garantizar que las muestras de sondajes y de campo sean representativas del área muestreada y que se ajusten a una escala de mapeo adecuada para el proyecto.

3.3 Marco metodológico de ASTER

Esta sección se enfoca en describir la metodología empleada en el análisis espectral del área de interés abordando los pasos clave en la adquisición, procesamiento, análisis y validación de datos, así como las limitaciones y estrategias.

La metodología está constituida por los siguientes pasos:

1. Delimitación de la zona de estudio y adquisición de imagen satelital.
2. Pre-procesamiento.
3. Procesamiento.
4. Comparación de técnicas espectrales y correlación.

3.3.1- Selección y Adquisición de datos

La adquisición de la imagen satelital se puede realizar mediante el acceso a varias páginas web, dentro de las más importantes se encuentra el sitio oficial de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) <https://earthdata.nasa.gov/>, el sitio web de ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center) <http://gds.ersdac.jspacesystems.or.jp/?lang=en> y el sitio oficial del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que también proporciona imágenes satelitales tipo ASTER mediante su página web <http://glovis.usgs.gov/>.

3.3.2- Pre-procesamiento de Imágenes ASTER

El pre-procesamiento de imágenes ASTER incluye tres técnicas espectrales esenciales para preparar las imágenes satelitales en la identificación de zonas con minerales de alteración hidrotermal.

1. Crear Layerstacking

Esta técnica consiste en combinar las 3 bandas del subsistema VNIR y las 6 bandas del subsistema SWIR en un único archivo, que contiene las 9 bandas integradas con una resolución espacial de 30 metros.

2. Corrección Atmosférica

La corrección atmosférica elimina la influencia de la atmósfera sobre la información captada por el sensor, transformando los valores de radiancia en valores de reflectancia. Este proceso incluye la transformación del formato inicial de la imagen (BSQ) a formato (BILL) y considera los parámetros geográficos y temporales de la imagen satelital, obteniendo así una imagen con valores en reflectancia que permite visualizar los picos de absorción de elementos conocidos como vegetación, cuerpos de agua, nubes y nieve.

3. Elaboración de Máscaras

Se aplican máscaras para eliminar zonas con vegetación, nieve, nubes, agua y sombras, que interfieren en la identificación de zonas de alteración hidrotermal. Se emplean las siguientes máscaras:

- **Máscara de Vegetación:** Se utiliza el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para enmascarar zonas con vegetación densa, eliminando áreas con $NDVI > 0.40$.
- **Máscara de Sombra y Agua:** Se determinan áreas con presencia de sombras y agua utilizando la banda 5 y seleccionando valores de reflectancia entre 1.6 a 4.3.
- **Máscara de Nubes y Nieve:** Se identifican áreas con nubes y nieve mediante la banda 1, con valores de reflectancia entre 0 a 4.9.

3.3.3- Procesamiento ASTER

El procesamiento de la imagen ASTER consiste en la aplicación de técnicas espectrales necesarias para la delimitación de zonas con minerales de alteración hidrotermal. Las técnicas empleadas se enumeran a continuación:

1. Técnica de combinación de bandas

En el área de estudio se utilizaron combinaciones de bandas en RGB, definidas por varios autores, con la finalidad de realizar un mapeo general de zonas con minerales arcillosos y óxidos.

Tommaso et al. (2005) establece la siguiente combinación:

- **RGB 461.** Para mapeo de minerales arcillosos y óxidos. Zonas con arcillas en color morado, y zonas con óxidos de color amarillo pálido.

Pérez et al. (2007) establece la siguiente combinación:

- **RGB 641.** Para mapeo de minerales arcillosos y óxidos. Zonas con arcillas presentan color verde oscuro, y zonas con óxidos color amarillo pálido.

Azcurrea et al. (2003) establece la siguiente combinación:

- **RGB 531.** Para mapeo de minerales arcillosos. Zonas con arcillas se muestran con color verde claro.

Marquetti et al. (2004) establece la siguiente combinación:

- RGB 469. Para mapeo de minerales arcillosos. Zonas con arcillas se muestran con color marrón.

2. Técnica de cocientes o relación de bandas

En la zona de estudio, se aplicaron los cocientes de bandas 4/6, 4/5, 5/8, y 2/1, para el reconocimiento de zonas con alteración hidrotermal. En el Cuadro 2 se muestra el tipo de alteración hidrotermal definida en función de cada cociente de bandas.

Cuadro 2: Cociente de bandas para los diferentes tipos de alteración.

Alteración hidrotermal	Relación de bandas
Fílica	4 / 6
Argílica	4 / 5
Propilítica	5 / 8
Óxidos e hidróxidos de hierro	2 / 1

3. Imágenes falso color

Se generó en el área de estudio imágenes de falso color con combinaciones RGB de diferentes relaciones de bandas que permiten discriminar alteraciones hidrotermales. A continuación, se presentan las combinaciones realizadas tomadas de Marquetti et al. (2005):

- **RGB BR 657585:** alteración propilítica (colores rojos), alteración argílica avanzada (colores blanquecinos y cian) y alteración fílica (colores verdosos).

- **RGB BR 454648:** alteración propilítica (colores azules), alteración argílica avanzada (colores blanquecinos) y alteración fílica (colores verdosos).

4. Técnica de índices de identificación litológica – SWIR

Los índices de identificación litológicas definidos por Ninomiya (2004), fueron aplicados sobre la zona de estudio, obteniéndose zonas con presencia de minerales de alteración, como se describe en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Relación de los índices de Ninomiya con los minerales de alteración.

Índices de Ninomiya	Minerales de reconocimiento
OHla	Moscovita, Illita, Montmorillonita
OHIB	Pirofilita
ALI	Alunita
KLI	Caolinita, Dickita
CLI	Calcita

3.4 Resultados

A continuación, se presentan las imágenes resultantes del procesamiento satelital utilizando las diferentes técnicas mencionadas.

3.4.1- Mapeo litológico con imágenes satelitales

El mapeo geológico a través de la combinación de datos del sensor ASTER) en las bandas 631 puede ser una herramienta eficaz para la identificación de las litologías de una región. Estas

bandas espectrales son especialmente útiles para resaltar diferencias en la composición de las rocas y minerales.

A continuación, se presenta el mapeo interpretativo a partir de la combinación RGB mencionada anteriormente. (Figs. 6 y 7)

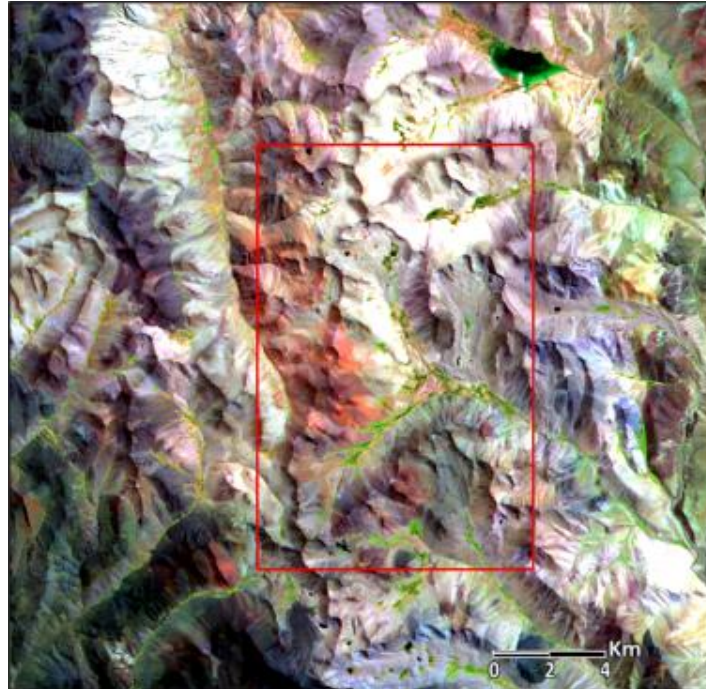


Figura 6: ASTER Falso color, combinación RGB 631. En recuadro rojo se indica el área de estudio.

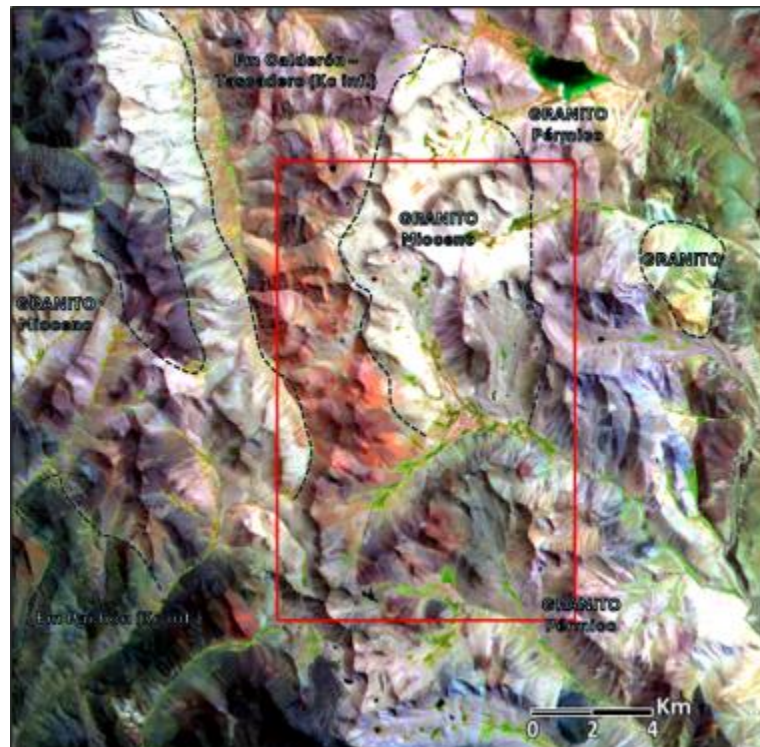


Figura 7: Mapeo interpretativo con imagen ASTER falso color combinación RGB 631. En recuadro rojo se indica el área de estudio.

3.4.2- Imagen falso color con combinación de bandas RGB

En la figura 8, se presentan las imágenes en falso color generadas a partir de las combinaciones de bandas 641, 461, 469 y 531. La interpretación de estas imágenes, que proporciona una visión regional, permite identificar los diferentes rasgos:

- Se ha detectado la presencia de minerales arcillosos principalmente en la zona este y en menor medida hacia el oeste (flechas azules).
- Tanto hacia el este como el oeste se han detectado presencia de óxidos (flechas amarillas).

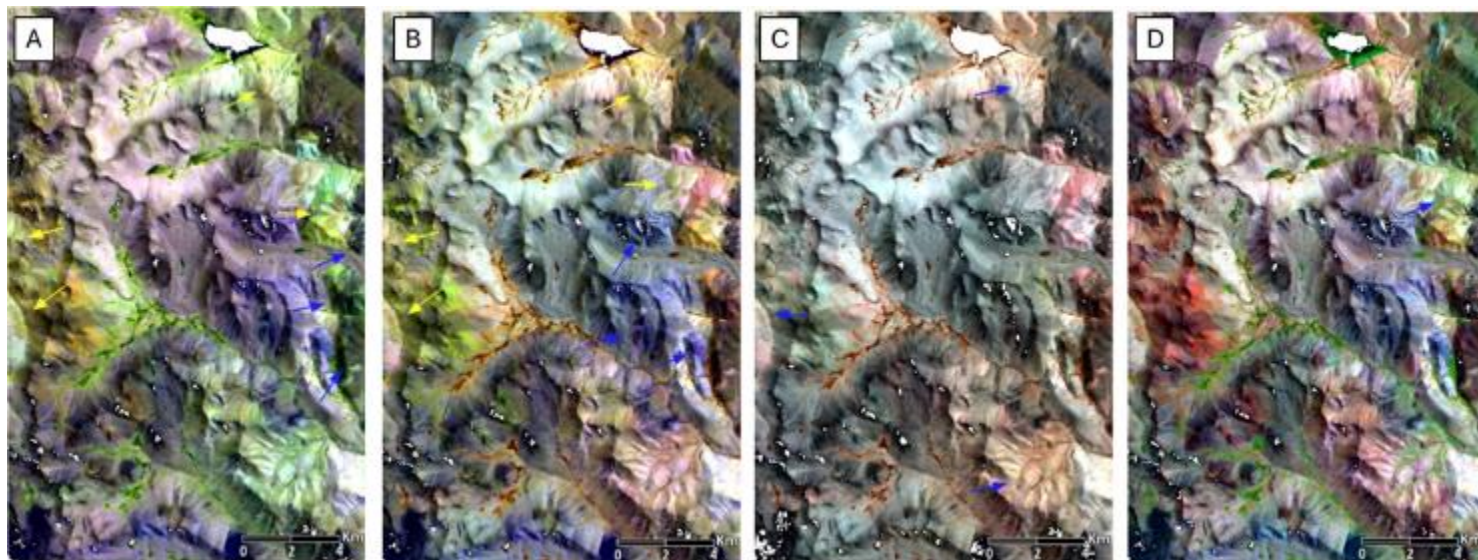


Figura 8: Imágenes Falso color, combinación de bandas RGB. A) RGB 641 (Coloraciones verdes para arcillas y amarillo para óxidos), B) RGB 461 (Coloración morada para arcillas y amarillo pálido para óxidos), C) RGB 469 (Color marrón para arcillas) y D) RGB 531 (Coloraciones verdes para arcillas).

3.4.3- Relaciones de banda

En la figura 9 se presentan las imágenes generadas a partir del cociente de bandas. A estas imágenes se les aplicó la herramienta Raster Color Slices para clasificar los valores en intervalos definidos y asignarles una escala de colores que facilita su interpretación visual, en dichos intervalos se agrupan los valores espectrales calculados para cada píxel. Esta clasificación permite destacar gradientes o contrastes en la respuesta espectral mediante una escala cromática, generando así mapas de calor que representan la intensidad relativa del cociente entre bandas (Harris Geospatial Solutions, 2024).

Se puede observar que en el sector oeste y sureste predomina una alteración propilítica mientras que, en el sector este predomina la alteración argílica avanzada, fílica y se destaca una alteración definida por óxidos e hidróxidos de hierro.

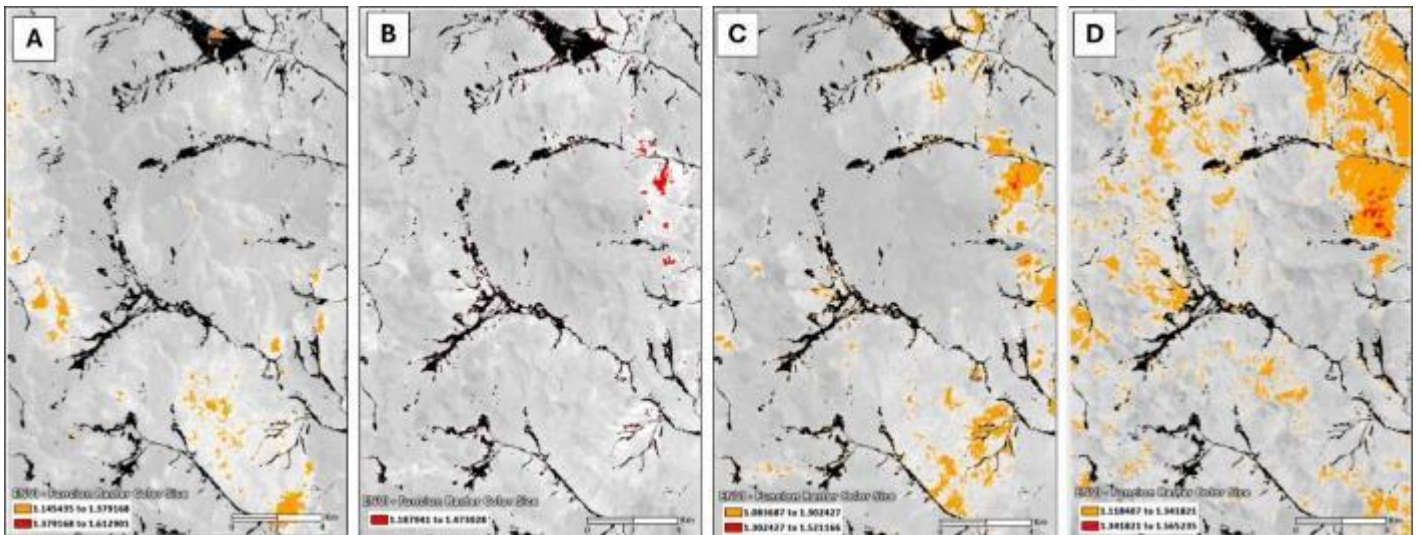


Figura 9: Imágenes producto de relaciones de banda con la herramienta Raster Color Slice aplicada. A) 5/8, B) 4/5 C) 4/6 y D) 2/1.

3.4.4- Relaciones de banda de RGB

A continuación, se presentan las combinaciones de bandas RGB (Fig. 10) que mejor respondieron en el área de estudio.

Lo que se destaca principalmente es una alteración argílica/argílica avanzada en el sector este del proyecto.

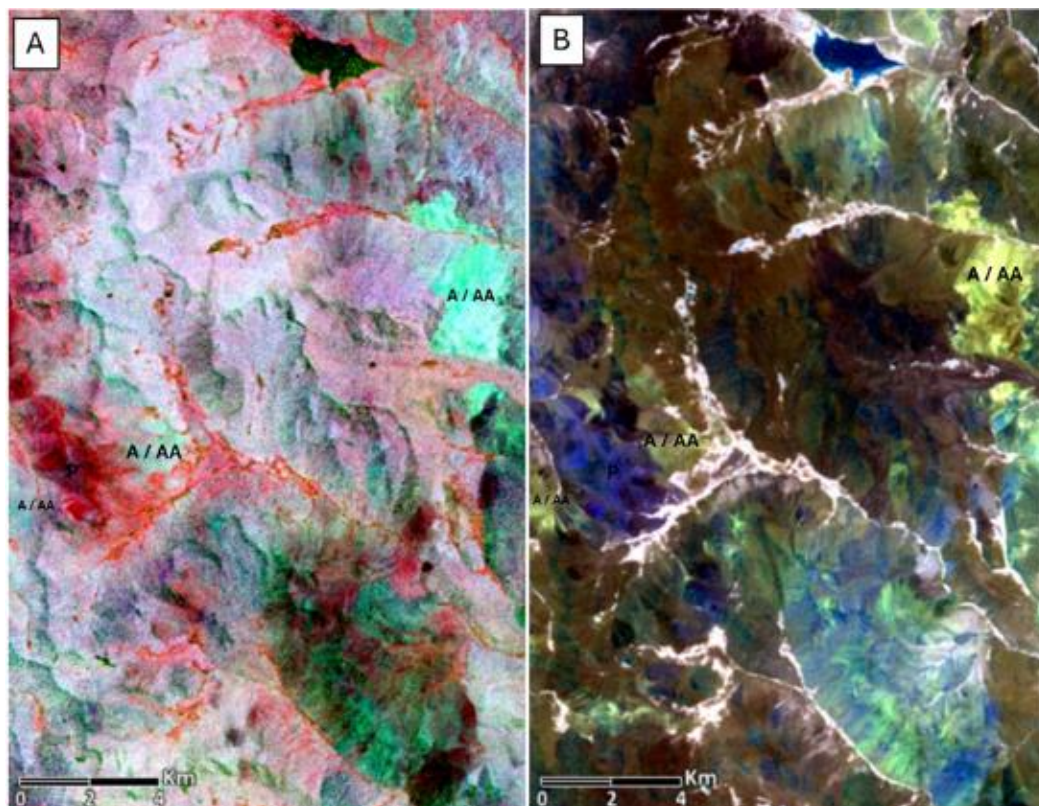


Figura 10: Imágenes producto de RGB con band ratios (A: Argílica, AA: Argílica avanzada, P: Propilítica). A) RGB 6/5 7/5 8/5 (Coloración cian para alteración argílica y roja para propilítica) y B) 4/5 4/6 4/8 (Coloración amarilla para alteración argílica y azul para propilítica).

3.4.5- Índices de Ninomiya

Se utilizó en la zona de estudio la aplicación de los índices OHla y OHlb de Ninomiya, los mismos son de particular importancia para la identificación de minerales que contienen grupos hidroxilo (OH).

- **OHla (Índice Hidroxilo A):** Este índice se enfoca en la detección de minerales que presentan absorciones características en la región del infrarrojo cercano (NIR) debido a la presencia de grupos hidroxilo. Es particularmente útil para identificar minerales como caolinita, illita, montmorillonita y otros tipos de arcillas hidratadas.

- **OHlb (Índice Hidroxilo B):** Similar al OHla, el índice OHlb también se centra en la identificación de minerales hidratados, pero se optimiza para detectar absorciones específicas que pueden variar ligeramente de las identificadas por el OHla. Esto permite una discriminación más precisa entre diferentes tipos de arcillas y minerales hidratados, se utiliza para la determinación de pirofilita.

Luego de la realización de los índices de Ninomiya, se utilizó la herramienta “Raster Color Slices” la cual selecciona rangos de datos y destaca las zonas de mayores respuestas al índice. (Fig.11).

En las imágenes se puede destacar nuevamente que el sector este tiene una alteración de tipo argílica/argílica avanzada.

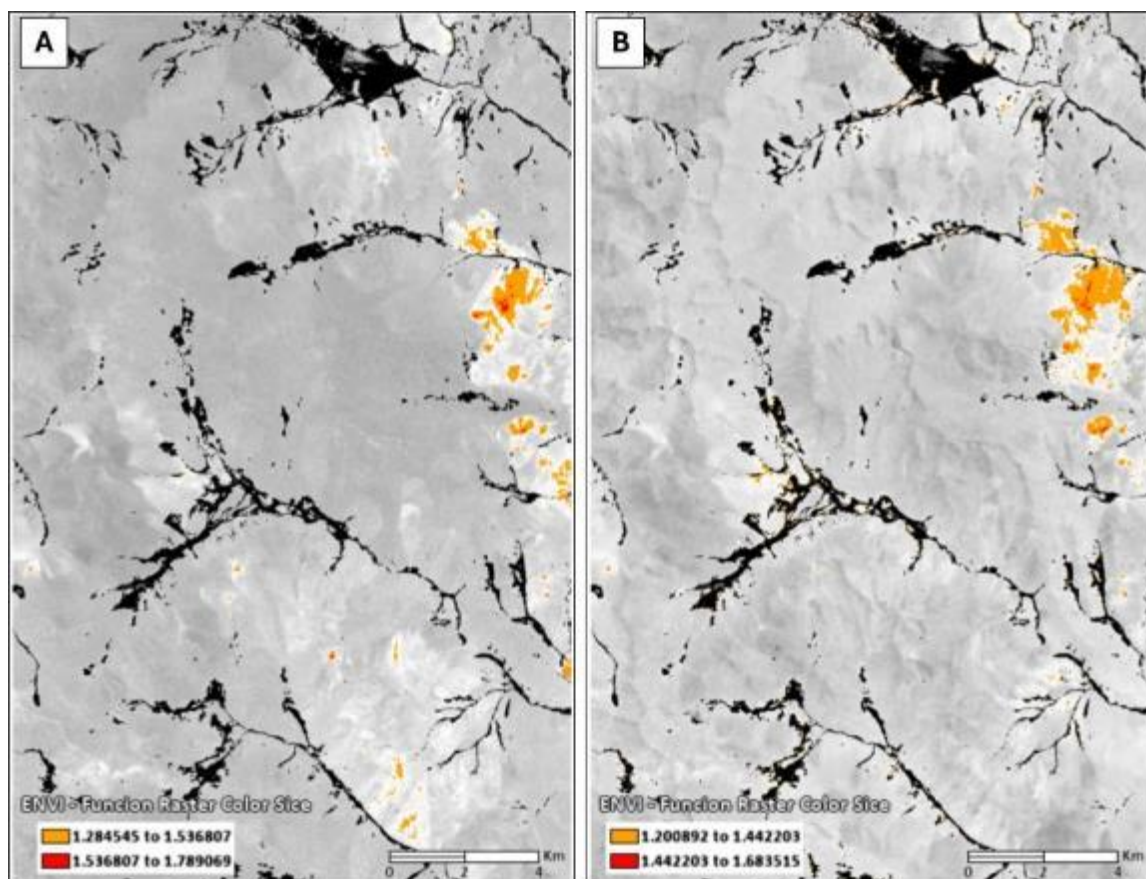


Figura 11: Imágenes producto de la aplicación de los índices de Ninomiya con la herramienta Raster color Slice aplicada. A) OHla y B) OHlb.

3.5 Conclusiones

El análisis de las imágenes en falso color, combinaciones de bandas RGB, y la aplicación de índices específicos como los de hidroxilo (OHla y OHlb), permite identificar con claridad los diferentes tipos de alteración hidrotermal presentes en el área de estudio.

Las imágenes generadas a partir de combinaciones de bandas y cocientes revelan dos zonas de interés principales:

- En el sector este, se identificó una alteración caracterizada por la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, acompañada de minerales arcillosos.
- Hacia el este, predominan la alteración fílica y argílicas avanzadas, con indicios de alteraciones propilíticas, en el sector sureste.
- Hacia el oeste, se ha identificado áreas con alteración propilítica y fílica.

El uso de los índices OHla y OHlb de Ninomiya, enfocados en la detección de minerales hidratados y arcillas, refuerza la interpretación anterior, destacando la presencia significativa de alteraciones argílicas avanzadas en el sector este.

En resumen, los métodos aplicados han permitido delinear diferentes áreas con potencial de alteración hidrotermal, destacando sectores con posible interés mineralógico en el noreste, este y centro-oeste del proyecto (Fig.12).

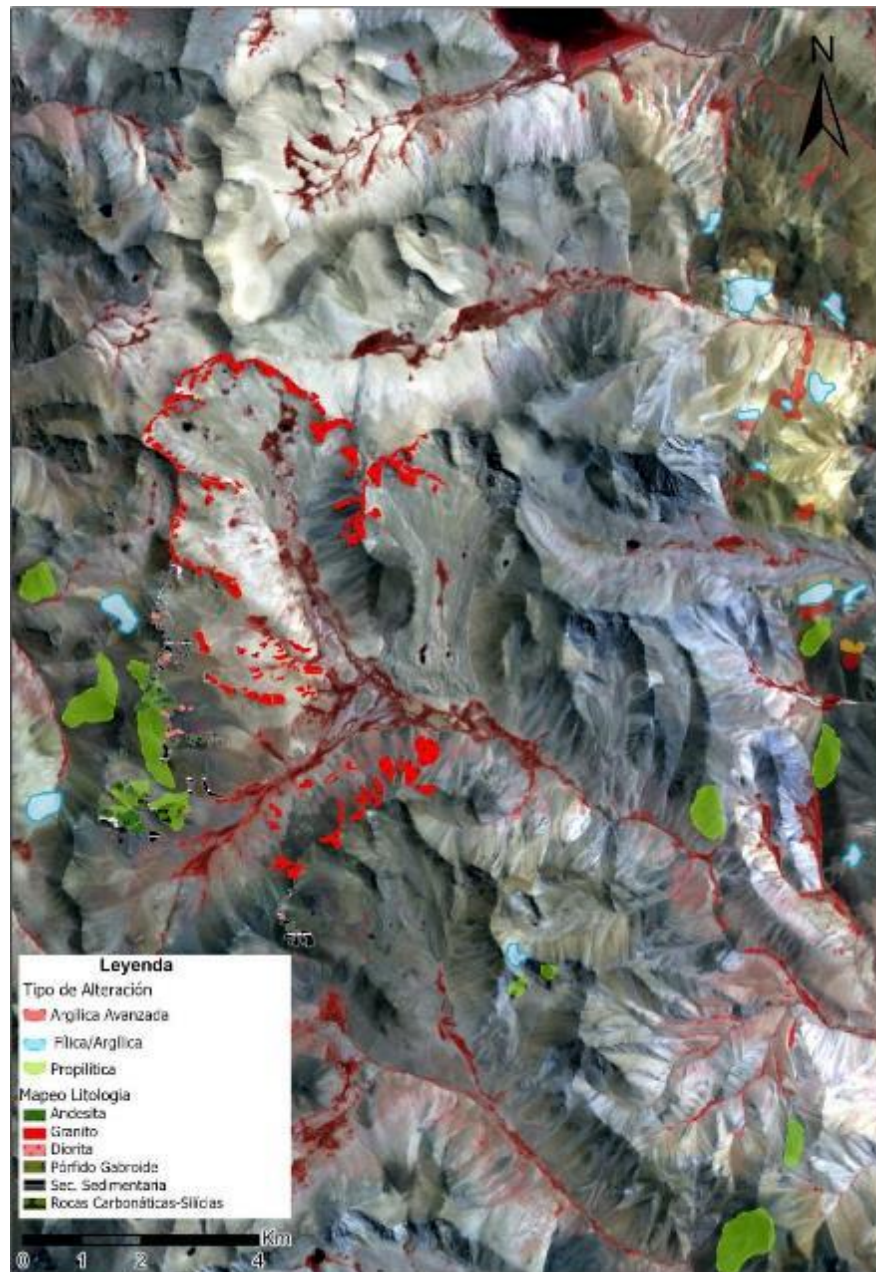


Figura 12: Mapa de alteraciones y litologías del área de estudio basado en imágenes ASTER.

4. Geología del área

El presente capítulo tiene como objetivo principal caracterizar las litologías en superficie y generar un mapa detallado de los afloramientos en el área de estudio, a partir del control de campo realizado sobre un mapeo regional preliminar obtenido mediante el análisis de imágenes satelitales.

4.1 Unidades geológicas principales

La estratigrafía de la región se puede dividir en 5 secciones: un basamento ígneo de edad permo- triásica, rocas sedimentarias de edad cretácica inferior, intrusivos básicos pre Miocenos y granitos de edad miocena y rocas de composición dacítica y brechas post miocenas. (Cuadro 4)

Cuadro 4: Tabla cronoestratigráfica de las unidades geológicas del área de estudio.

TABLA CRONOESTRATIGRÁFICA	
EDAD	LITOLOGÍA
Post Mioceno	Rocas dacíticas y brechas
Mioceno	Granito
Cretácico - Mioceno Inferior	Intrusivos Básicos
Jurásico Inferior - Cretácico Inferior	Sedimentitas Calcáreas
Pérmico - Triásico	Rocas efusivas y Granito Pérmico (Grupo Choiyoi)

Las rocas más antiguas aflorantes en el área corresponden a granitos asignados al Grupo Choiyoi. Luego continúa una secuencia sedimentaria-calcárea constituida por calcarenitas, calcilutitas y sedimentitas calcáreas correspondientes al Cretácico inferior, las cuales forman parte de “back arc” cretácico desarrollado en la Cuenca de Bermejo-Calingasta-Iglesia (Martínez et al., 2022), y han sido asignadas a la Formación Tascadero.

La secuencia sedimentaria se encuentra intruida por cuerpos intrusivos básicos (gabros y dioritas), que no han sido observados en contacto con ninguna de las otras unidades del área. Estos se interpretan como intrusivos miocenos, posiblemente relacionados con el magmatismo de la Formación Pachón (Llambías et al., 2003).

Como fase tardía del complejo magmático se han observado granitos miocenos intruyendo a las unidades anteriormente descritas y, en una escala de mayor detalle, se identificó cuerpos dacíticos brechados interpretados como edad post Miocena.

4.2 Descripción de las unidades aflorantes

A continuación, se presenta la descripción petromineralógica a escala mesoscópica de las unidades litológicas identificadas en el área.

4.2.1 Litologías primarias

Granitos (Grupo Choiyoi)

Los granitos se encuentran en el sector este del área de estudio. Se caracterizan por ser una roca de coloración gris blanquecina con textura granuda, compuesta por feldespato (60%), cuarzo (30%) y minerales máficos tal como biotita (10%), además se observó magnetita. La roca se presenta principalmente fresca con suave alteración a sericita ± clorita sobre los feldespatos. En general, la oxidación es nula con pequeñas trazas de goethita. (Fig.13).



Figura 13. Muestra de mano de granito recolectada en el sector oeste del área de estudio.

Formación Río Tascadero

Esta formación aflora en el sector oeste formando un cinturón en dirección noroeste-sureste. Está representada por calcarenitas, mármoles y calizas.

- **Calcarenita**

Las calcarenitas son rocas sedimentarias carbonatadas compuestas predominantemente por granos de carbonato de calcio de tamaño arena (0,0625 a 2 mm). En este caso, presentan un color marrón grisáceo y están compuestas por cristales de calcita recrystalizados, con alteración de minerales verdes, posiblemente cloritas. Se observó pirita diseminada y estructuras tipo boxwork. (Figura 14-A)

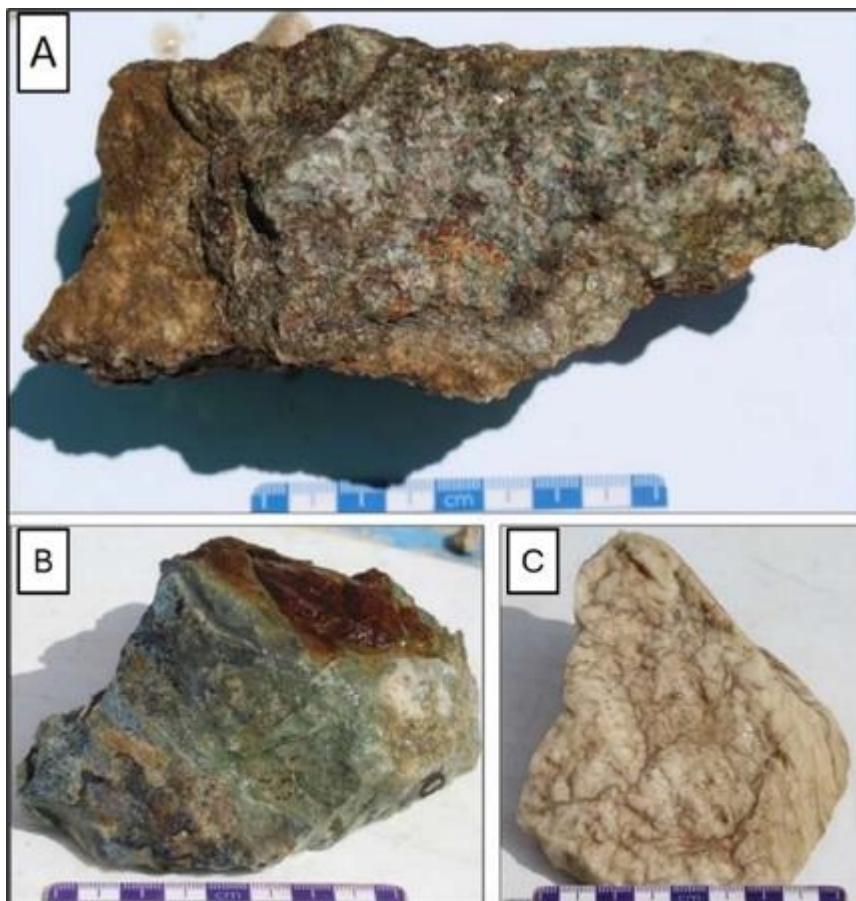
- **Skarn**

Las calizas son de color gris verdoso claro y están compuestas en su totalidad por calcita. Se identificaron grupos de arcilla en toda la muestra y calcita masiva relleno de fracturas y cavidades. Se reconocieron parches de clorita y epidoto. Se observó lapislázuli en fracturas, de forma masiva y como relleno de venas capilares, con pirita finamente diseminada. Además, se observó pirita en pátinas. La oxidación es moderada y se limita a relleno de cavidades y fracturas (hematita y jarosita).

Se reconocieron minerales accesorios tales como cristales de granate verde. En algunas muestras se observó yeso relleno de cavidades. (Fig.14-B).

- **Mármol**

Los mármoles tienen color blanco y están compuestos en su totalidad por calcita. Ocasionalmente con mineralización de pirita fina diseminada. Por otra parte, la oxidación es de moderada a suave con presencia de goethita. Además, se observó hematita en bordes de la pirita y como relleno en venas capilares. (Fig.14-C).



Figuras 14-: Muestras mano de rocas calcáreas. A) Calcarenita, B) Skarn y C) Mármol.

Intrusivos básicos (Formación Pachón)

Los cuerpos básicos se observan intruyendo la secuencia sedimentaria calcárea y están representados por los siguientes tipos litológicos: gabros, pórfido gabroide, dioritas, microdioritas y andesitas.

- **Pórfido gabroide**

Los gabros son de color gris oscuro, textura porfírica y pasta fanerítica compuesta por fenocristales (30%) representados por feldespatos blancos y máficos (anfíboles, piroxenos y biotita) y pasta microgranular de composición feldespática, y en menor medida con minerales máficos. Se observa epidoto alterando levemente a los máficos, y posibles cloritas alterando minerales máficos en la pasta. La oxidación se produce como goethita en pátinas y fracturas, afectando también a fenocristales máficos. (Fig.15).

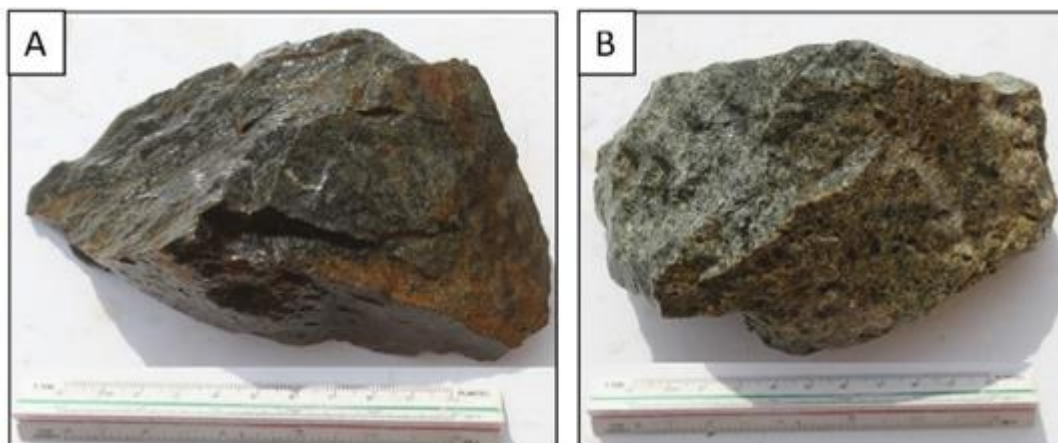


Figura 15: Muestras de mano de los intrusivos básicos del área de estudio.

- Diorita

Las dioritas son de color gris y textura granular fina, compuestas principalmente por feldespatos blancos y cuarzo primario. La alteración está representada por una silicificación moderada y un reemplazo de los feldespatos blancos por minerales arcillosos. También se observó epidoto.

La oxidación está representada por óxidos en forma de motas. No se observan sulfuros, sin embargo, se han detectado anomalías de Zn + Rb y en menor medida Sr + Ti. (Fig 16 A)

- Microdiorita

Las microdioritas tienen gris medio y textura granular fina, y están compuestas por feldespato blanco, cuarzo y máficos tales como anfíboles y biotita. La alteración está representada por cuarzo en la pasta, sericita y turmalina fina. La sericita se encuentra reemplazando a los feldespatos. La mineralización es nula y la oxidación leve, representada por manchas de jarosita y motas de hematita. (Fig 16- B)

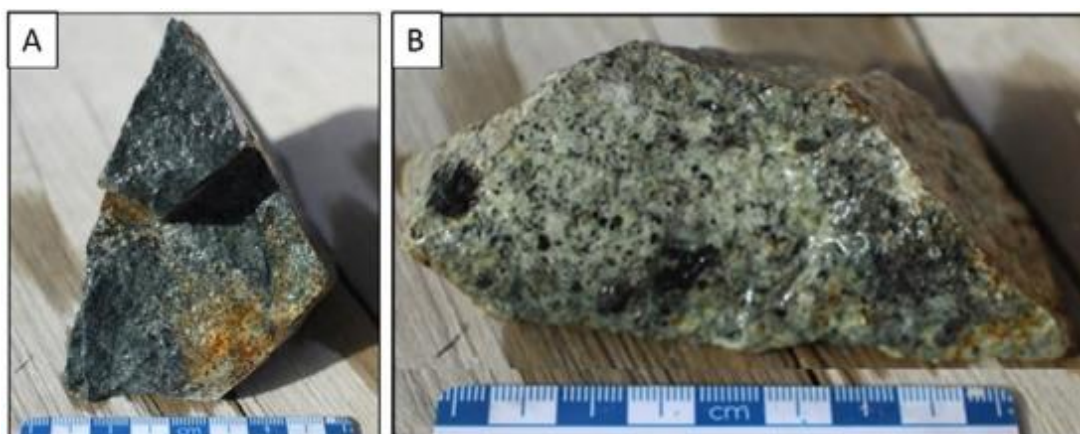


Figura 16. Muestras de mano correspondientes a Dioritas de la Formación Pachón. A) Muestra de roca diorítica. B) Muestra de roca microdiorítica.

Rocas miocenas y post-miocenas

- Granitos Miocenos

Los granitos aparecen en el sector noroeste y continúan hacia el sureste. Se caracterizan por ser rocas félsicas con textura granular. Los minerales más abundantes son feldespatos con hábito tabular moderadamente reemplazados por arcillas blancas. El cuarzo y los minerales máficos (biotita, magnetita y anfíbol) se encuentran en menor proporción. Se ha reconocido una alteración argílica moderada y penetrante en los feldespatos y arcillas en cavidades.

La oxidación es leve, presentándose en pátinas de hematita en la roca. Se han observado sulfuros negros indiferenciados con pátinas coloreadas. (Fig.17-A)

- Dacita

Las dacitas son de color blanco grisáceo, textura porfírica y pasta fanerítica. Los fenocristales están representados por cuarzo y feldespato, la pasta presenta composición feldespática. Los feldespatos están alterados a sericita. La oxidación es nula. (Fig17-B)

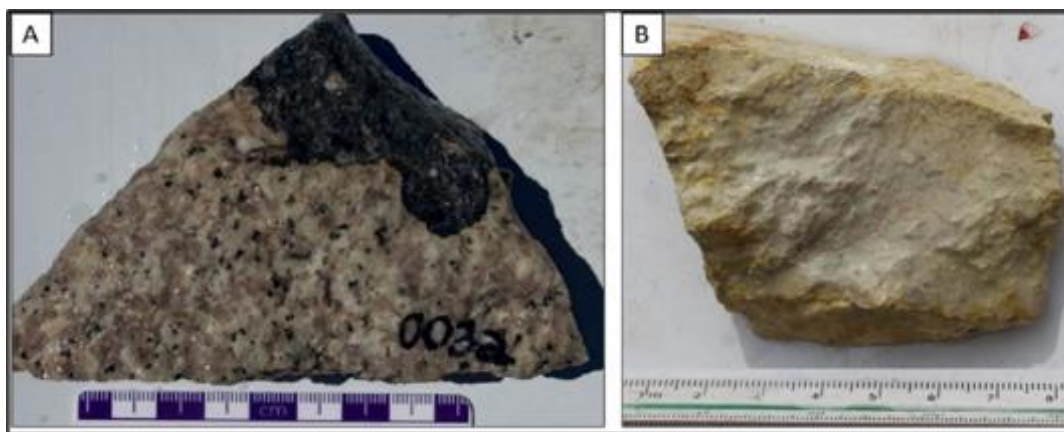


Figura 17: Muestras de mano correspondientes a las litologías de posible edad Miocena. A) Granito Mioceno. B) Dacita.

4.2.2 Brechas

Durante el mapeo se identificaron tres tipos de brecha: brecha de magnetita, brecha de turmalina y brecha hidrotermal.

Brecha de magnetita

Roca brechosa matriz-soportada, compuesta por clastos angulosos a subangulosos de gabro o andesita, de hasta ~3 cm, embebidos en una matriz fina rica en magnetita. La matriz presenta oxidación parcial, evidenciada por manchas rojizas atribuibles a hematita secundaria. Algunos clastos también contienen magnetita, en parte alterada. La muestra presenta fuerte magnetización. (Fig.18-A)

Brecha de turmalina

Roca gris oscura, de textura brechosa, compuesta por posibles fragmentos de dioritas cuya matriz está compuesta por la asociación cuarzo ± turmalina.

La alteración está dominada por una intensa y penetrante turmalinización en toda la roca, que en algunos casos enmascara a los fragmentos. (Fig18-B).

Brecha hidrotermal

Roca de color gris compuesta por fragmentos de granodiorita y posibles andesitas (muy alteradas) de bordes angulosos. La matriz es granular de composición cuarzo- feldespática, con minerales de alteración tales como epidoto y clorita, además de arcillas alterando a los feldespatos. Se identificó magnetita diseminada en matriz y en los fragmentos. Se observan sulfuros finos diseminados en la matriz. La oxidación es de limonita y goethita, principalmente en fracturas. (Fig.18-C)

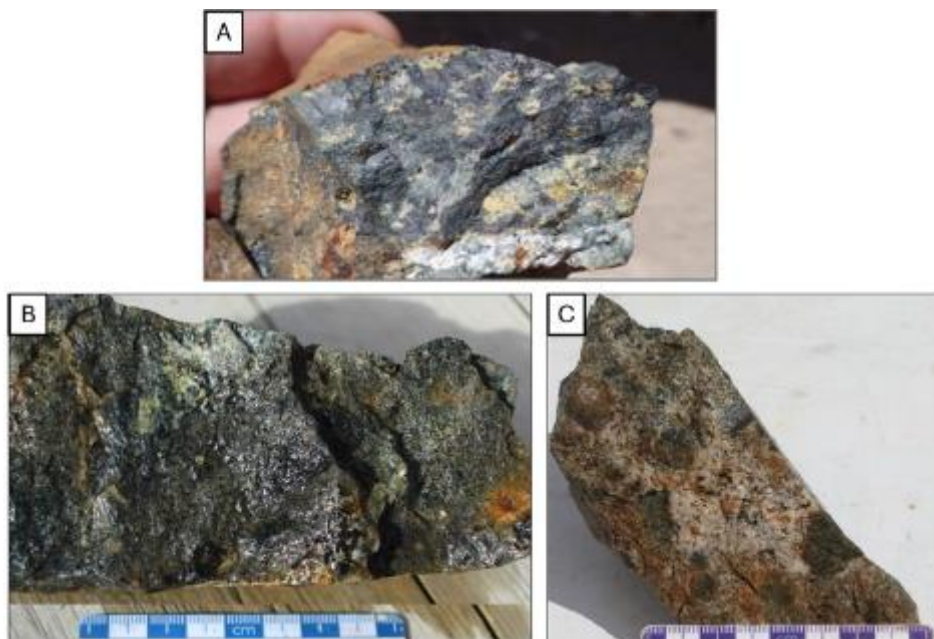


Figura 18. Muestras de mano correspondientes a las brechas observadas en el área de estudio. A) Brecha de magnetita. B) Brecha de turmalina. C) Brecha hidrotermal.

4.3 Mapeo Geológico

Este mapa geológico representa una instancia inicial de interpretación del área, elaborada a partir del análisis preliminar de imágenes satelitales, que permitió una primera delimitación de unidades y contactos. Posteriormente, esta información fue verificada y ajustada mediante observaciones directas en campo, lo que facilitó la identificación y etiquetado de las principales unidades litológicas presentes (Fig.19). La combinación de ambas fuentes de información contribuyó a mejorar la precisión y comprensión de las litologías en el área.

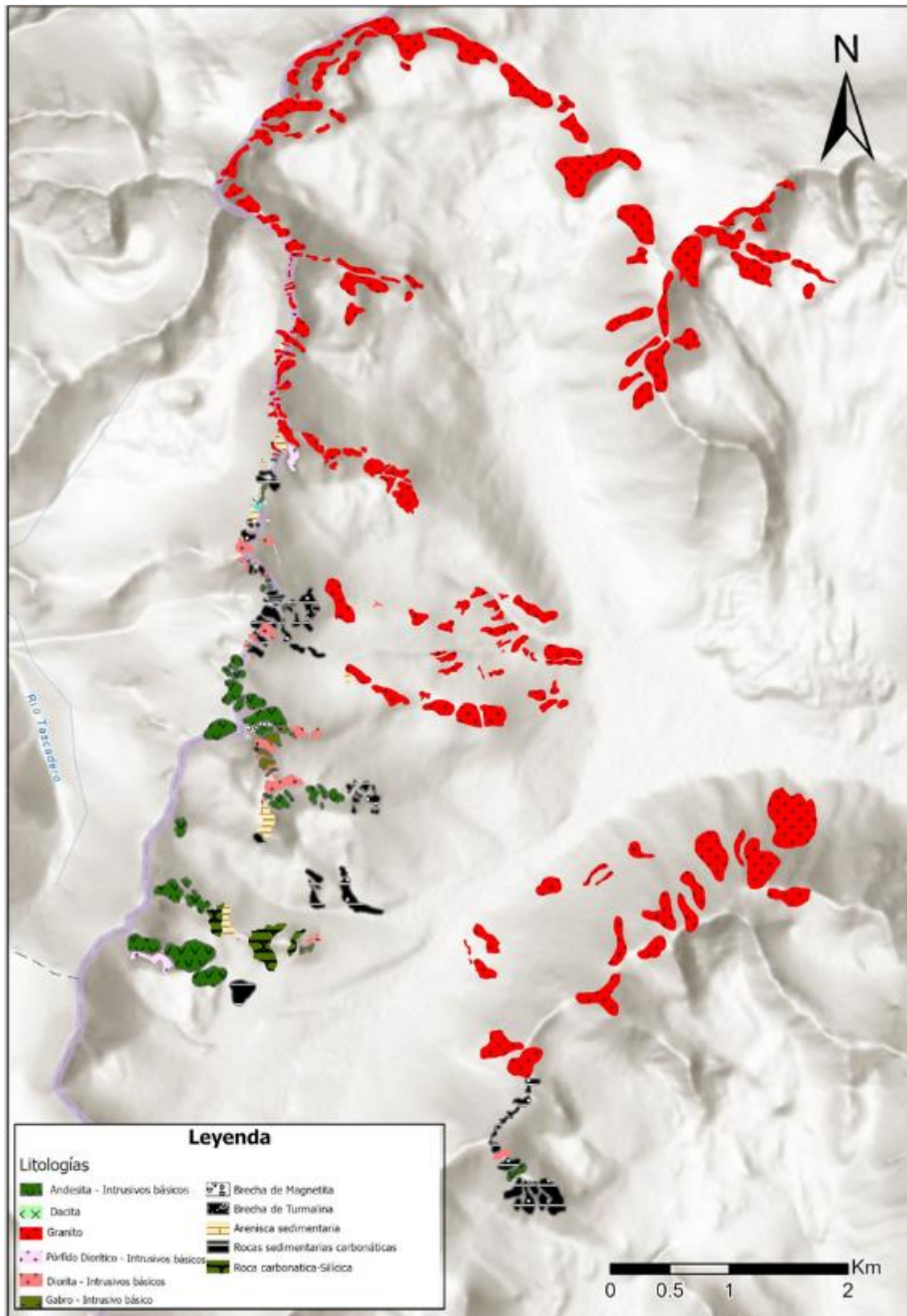


Figura 19: Mapa geológico del área de estudio.

5. Geoquímica

5.1 Introducción

La geoquímica es una rama de la ciencia que estudia el contenido y la distribución de elementos químicos en minerales, rocas, suelos, aguas y la atmósfera, así como la circulación de estos elementos en la naturaleza basada en las propiedades de sus átomos y iones (Goldschmidt, 1954). En el contexto de la exploración minera, la geoquímica se convierte en una herramienta muy importante para localizar y caracterizar depósitos minerales económicos, utilizando la distribución y propiedades de los elementos químicos presentes en el entorno.

5.2 Métodos geoquímicos

En la geoquímica de exploración, se utiliza el método de mapas de calor para visualizar y analizar la distribución de elementos traza en el área de estudio. Este enfoque es fundamental para identificar y caracterizar depósitos minerales potenciales mediante la representación gráfica de las concentraciones de elementos en muestras de suelos, aguas y sedimentos. En estos mapas, se aplica una escala de colores continua, donde cada rango de valores de concentración está representado por un color específico: los tonos fríos (como azul o celeste) indican concentraciones bajas, mientras que los tonos cálidos (como amarillo, naranja y rojo) corresponden a concentraciones elevadas. Para generar estos mapas se utilizó el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting), el cual estima los valores entre puntos de muestreo conocidos asumiendo que la influencia de un punto disminuye con la distancia. De este modo, es posible representar de forma continua las variaciones geoquímicas en el área de estudio, facilitando la identificación de anomalías y patrones espaciales relevantes.

Los elementos traza en los minerales de un yacimiento no están estáticos; están en un estado dinámico y se desplazan desde las rocas primarias (o parentales) hacia otras partes del yacimiento en respuesta a cambios en parámetros naturales como Eh, pH, temperatura, química y presión. Este movimiento, conocido como dispersión. (Gandhi y Sarkar, 2016).

La dispersión de elementos traza puede clasificarse en dos tipos: dispersión primaria y dispersión secundaria. La dispersión primaria ocurre durante la formación inicial de un depósito mineral, cuando estos elementos se movilizan dentro del área original de mineralización. Este proceso está influenciado por variables físicas y químicas que afectan el paso de fluidos en las rocas, resultando en halos de dispersión (Kyser, 2016). Los principales procesos geológicos que contribuyen a esta dispersión incluyen: cristalización magmática, actividad hidrotermal y metamorfismo. En contraste, la dispersión secundaria se produce cuando los elementos traza se lixivian hacia suelos, sobrecarga y vegetación debido a procesos de meteorización, generando halos secundarios. Estos elementos pueden dispersarse a través de aguas subterráneas o sistemas de arroyos superficiales, permitiendo que el análisis de aguas de manantiales, arroyos o sedimentos revele la presencia de depósitos minerales a distancias considerables (Robb, 2005; Gandhi y Sarkar, 2016; Kyser, 2016).

Para llevar a cabo el análisis, se recopilan datos sobre la concentración de elementos traza en muestras de talud. Estos datos se procesaron utilizando el software ArcGis en donde se generaron los mapas de calor, lo cual permitió visualizar los patrones de concentración y dispersión. Los mapas de calor muestran áreas de alta y baja concentración de elementos traza, facilitando la identificación de zonas de interés y la evaluación de la extensión y ubicación de los depósitos minerales potenciales.

La aplicación de mapas de calor en la geoquímica de exploración permite una interpretación más efectiva de los datos geoquímicos y proporciona una herramienta valiosa para la planificación de futuras actividades.

En el marco de la exploración del área prospectiva de tipo pórfido-skarn, se seleccionaron los elementos traza Cu, Mo, Pb y Zn debido a su asociación reconocida con depósitos de este tipo. Estos metales actúan como indicadores geoquímicos fundamentales, permitiendo la identificación de áreas de interés a través de la vectorización. La distribución y concentración de estos elementos en las zonas de alteración hidrotermal proporcionan valiosa información sobre la localización de cuerpos mineralizados, facilitando la delimitación de objetivos prospectivos. (Cooke et al., 2014).

El cobre es un elemento traza esencial en la exploración minera debido a su alta movilidad en ambientes oxidados y su asociación con minerales como la calcopirita. La concentración de cobre en los mapas de calor puede revelar zonas mineralizadas y es fundamental para identificar depósitos de cobre.

El molibdeno, frecuentemente asociado con depósitos de cobre y molibdeno, indica la proximidad a depósitos de mineralización porfírica, relevantes en la minería de cobre y molibdeno. Su distribución en los mapas de calor ayuda a identificar áreas con potencial mineral.

El plomo, común en depósitos de zinc-plomo y mineralizaciones hidrotermales, proporciona información valiosa para localizar depósitos de plomo y zinc y entender la historia mineral del área. Su presencia en los mapas de calor ayuda a identificar zonas de mineralización.

El zinc, asociado con depósitos de zinc-plomo y mineralizaciones sedimentarias, puede señalar la presencia de depósitos mineralizados de zinc y plomo. Los mapas de calor muestran su distribución y concentración, ayudando a delinear áreas con alto potencial minero.

La figura 20 ilustra la distribución de los elementos exploradores (pathfinders) en los sistemas de pórfido, adaptada de Halley et al. (2015). Este gráfico destaca la zonificación geoquímica que se observa alrededor de los depósitos de pórfido, donde elementos como el oro (Au) y el cobre (Cu) se concentran en el núcleo, mientras que el molibdeno (Mo) rodea estas zonas, y los elementos como el plomo (Pb) y el zinc (Zn) se encuentran de forma más distal. Según Halley et al. (2015), esta distribución de los pathfinders refleja la dinámica hidrotermal que influye en la dispersión geoespacial de los elementos en el sistema, lo cual es clave para la exploración mineral y la caracterización de depósitos de pórfido.

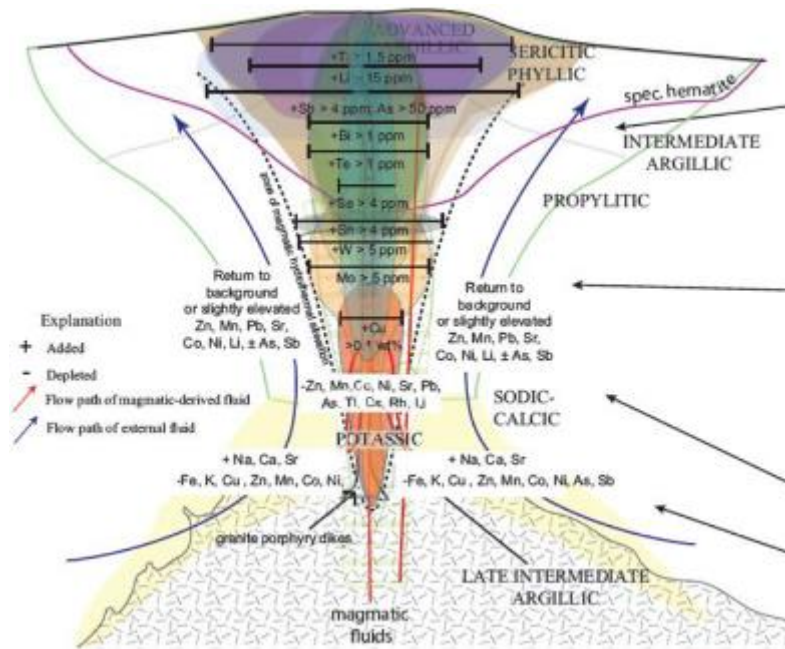


Figura 20: Zonación de elementos traza en los sistemas de tipo pórfido (Halley, et al., 2015)

5.3 Resultados

A continuación, se presentan los mapas de calor realizados, los cuales proveen una representación visual de la distribución y concentración de elementos traza en el área de estudio. Los elementos analizados incluyen Cu, Mo, Au, Ag, Pb y Zn. (Figuras 21, 22 y 23).

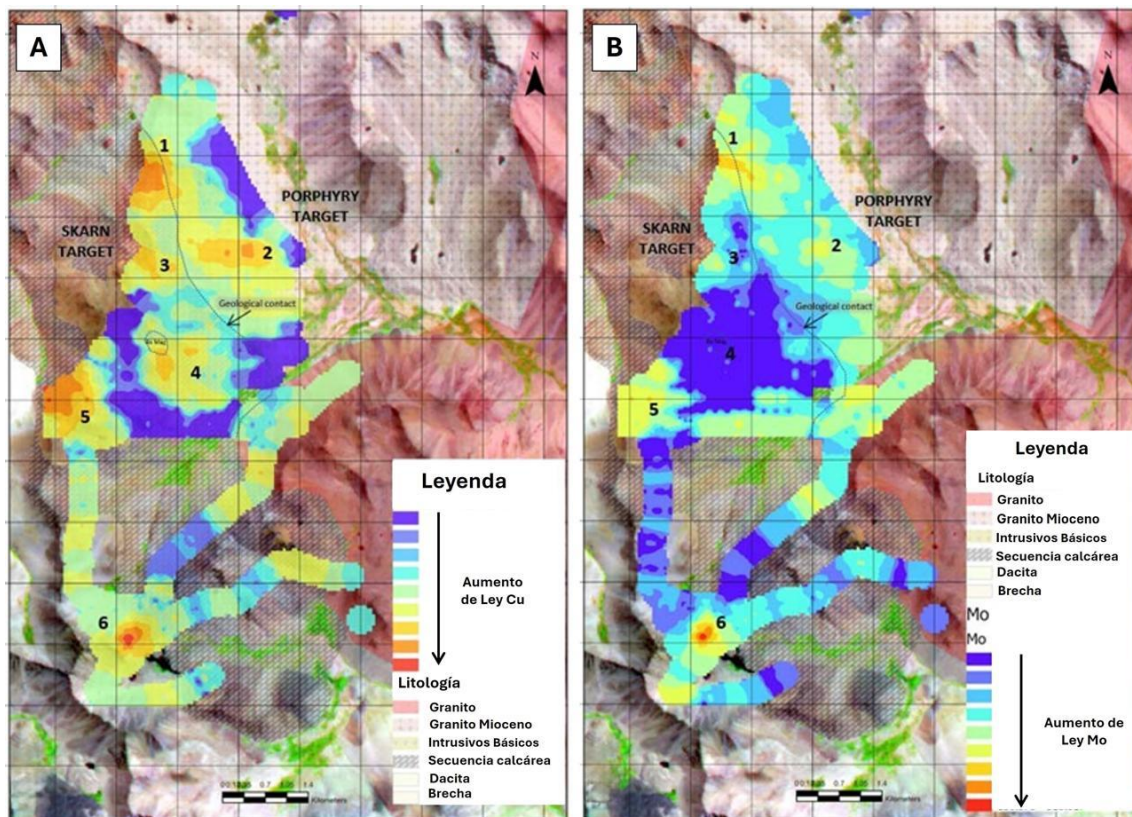


Figura 21. Mapas de calor mostrando la distribución del Cu y Mo

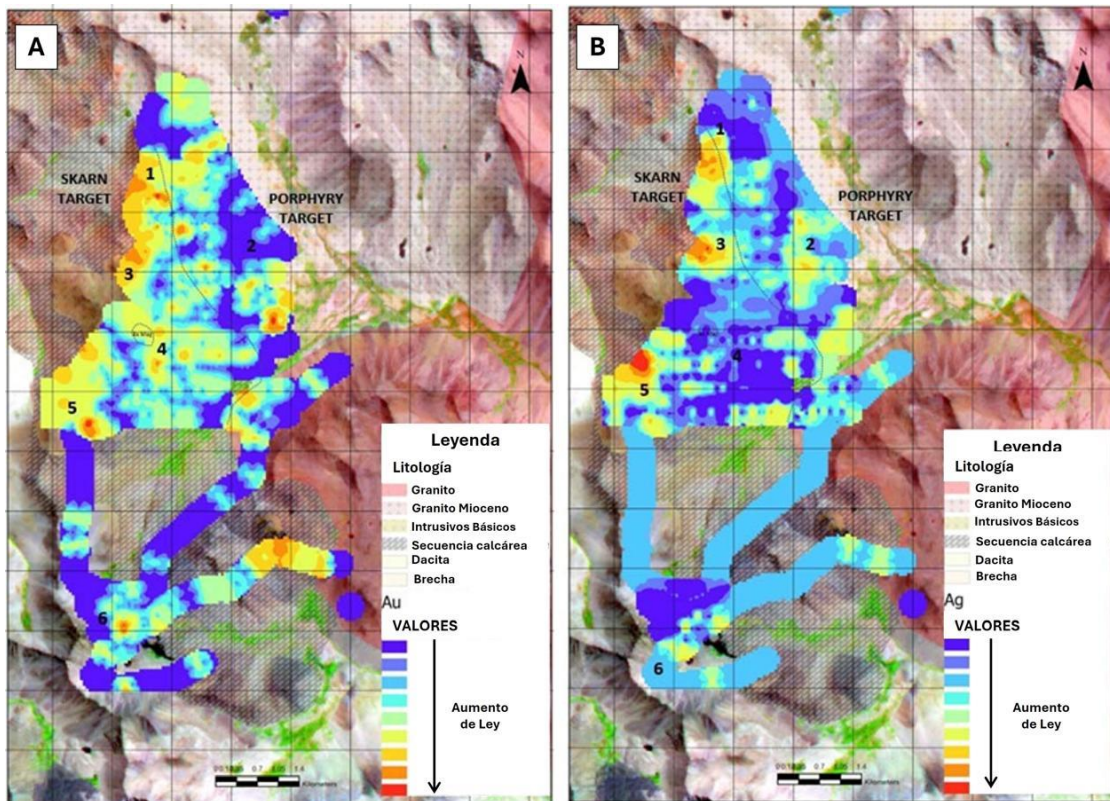


Figura 22. Mapas de calor mostrando la distribución del Au y Ag.

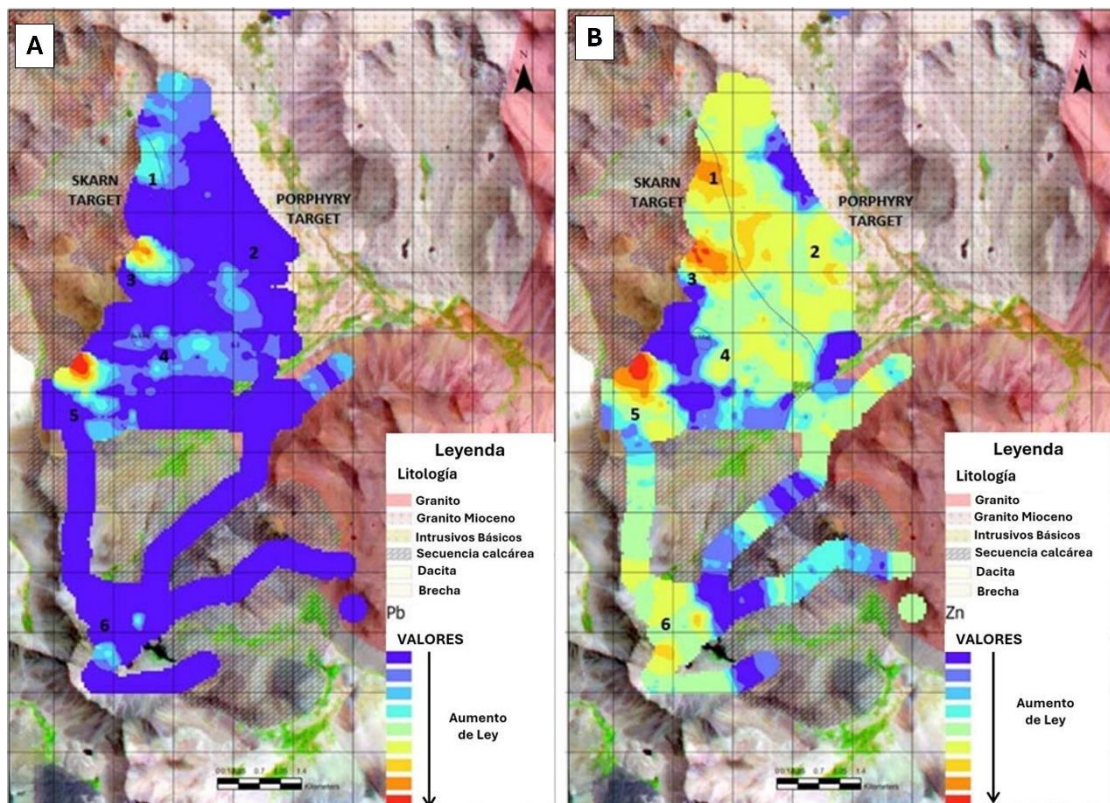


Figura 23. Mapas de calor mostrando la distribución del Pb y Zn.

El análisis de los mapas de calor para diferentes elementos reveló los siguientes patrones:

- **Cobre (Cu):**

Principales anomalías: Se concentran en el sur del proyecto (Anomalía 6), con adicionales anomalías en el sector este (Anomalía 2) y en el centro-oeste (Anomalía 3 y 4). Esto sugiere una mineralización significativa en estas áreas, con el sur mostrando el potencial más alto para depósitos de cobre. (Fig.26).

- **Molibdeno (Mo):**

Principales anomalías: Coinciden parcialmente con las del cobre, destacándose en el sur del proyecto (Anomalía 6) y en el centro-oeste (Anomalía 5), así como en el noroeste (Anomalía 1 y 2). La asociación con el cobre en estas áreas refuerza la presencia de depósitos potenciales, ya que ambos elementos son comúnmente asociados genéticamente en sistemas hidrotermales vinculados a intrusivos, característicos de depósitos tipo pórfido cuprífero y skarn.

- **Oro (Au):**

Principales Anomalías: Siguen un patrón similar a los mapas de calor de molibdeno y el cobre, con concentraciones destacadas en el sur (Anomalía 6), el centro-oeste (Anomalía 3, 4 y 5) y el noroeste (Anomalía 1). Esto sugiere que gran parte de las áreas con interés para el cobre y el molibdeno también pueden ser prometedoras para el oro.

- **Plata (Ag):**

Principales anomalías: Se encuentran principalmente en el sector oeste (Anomalía 3 y 5), con presencia menor en el target tipo pórfido (Anomalía 1 y 2). Esto indica que, aunque la plata está menos concentrada que el cobre y el molibdeno, las áreas con mayores anomalías de plata coinciden con zonas de interés de skarn.

- **Zinc (Zn):**

Principales anomalías: Corroboran en gran medida las anomalías de cobre, molibdeno y oro (Anomalías 1,2, 3, 5 y 6), pero presentan valores anómalos adicionales en el centro del proyecto (Anomalía 4). Esto sugiere que el zinc puede estar asociado con las zonas de mineralización, con algunas anomalías adicionales que podrían requerir una investigación más detallada.

- **Plomo (Pb):**

Principales anomalías: Se observan dos áreas de anomalías en la zona oeste (Anomalía 3 y 5). Esta divergencia respecto a otros elementos podría indicar una mineralización distinta o menos asociada con el cobre en el área, sugiriendo la necesidad de un análisis más específico para comprender su distribución y asociación.

Los resultados obtenidos permiten identificar seis áreas de interés destacadas por anomalías de cobre que alcanzan valores de hasta casi 3% Cu, distribuidas en los sectores norte, centro-oeste y sur del área de estudio. Estas zonas se encuentran presentes tanto en el target de tipo pórfido como de skarn, mostrando una fuerte asociación de anomalías de cobre, molibdeno y oro en las regiones sur, centro-oeste y noroeste, posicionándolas como áreas de prioridad para la exploración. Además, las anomalías de plata y zinc refuerzan estas áreas de interés, aunque con variaciones menores. Por otro lado, el plomo presenta un patrón diferente, concentrándose en la zona del skarn, lo que sugiere una posible mineralización distinta, posiblemente asociada

a un skarn de tipo polimetálico, caracterizado por la presencia de metales como plomo, zinc, plata y eventualmente cobre. Este tipo de mineralización puede originarse por la interacción de fluidos hidrotermales con rocas carbonatadas y suele representar una fase más distal o una etapa superpuesta dentro del mismo sistema mineralizante (Meinert, 1992; Einaudi et al., 1981).

Estos resultados destacan el valor de la geoquímica como herramienta clave para definir áreas con alto potencial, brindando una guía clara para los próximos pasos del proyecto.

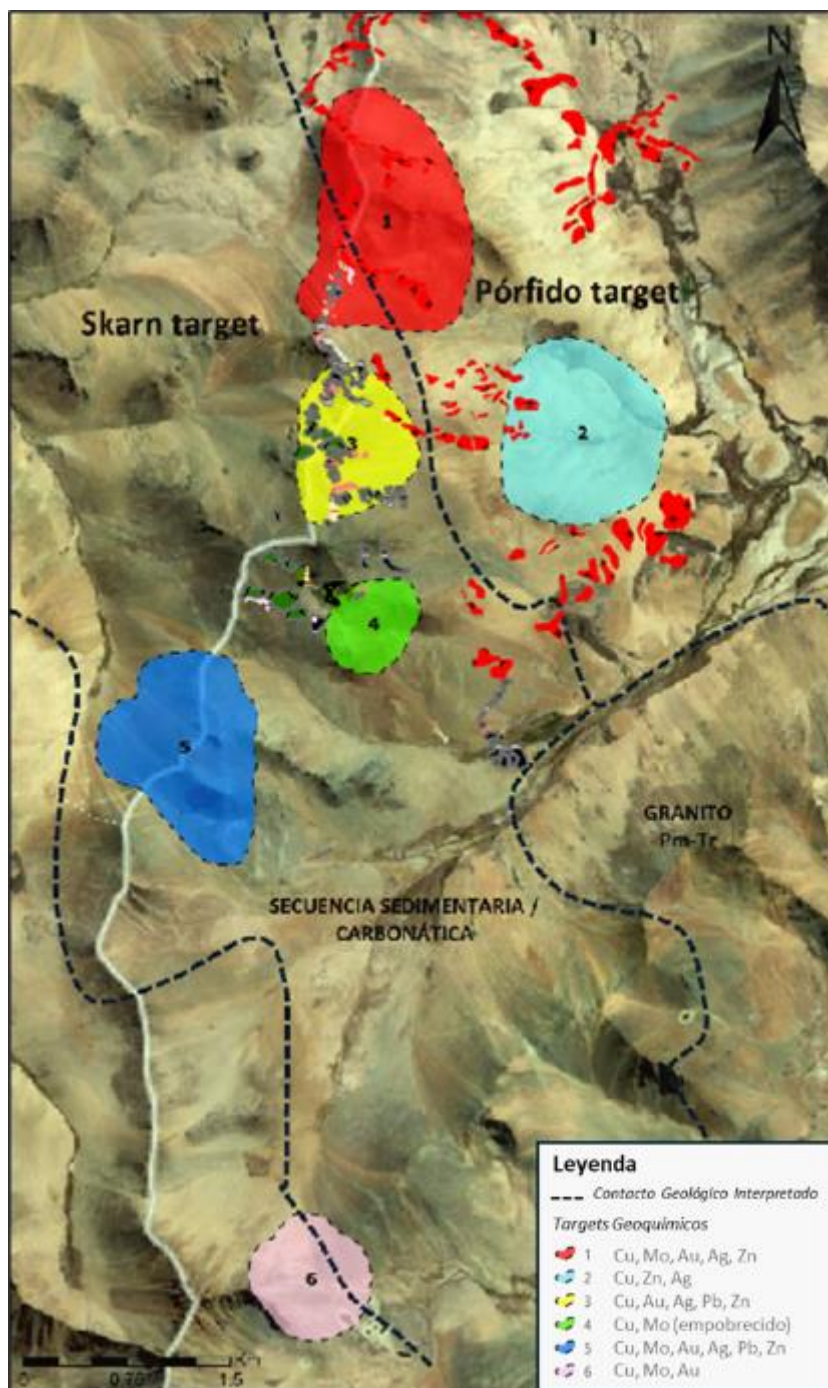


Figura 24: Mapa de distribución de las áreas de interés en base a anomalías geoquímicas.

6. Geofísica

6.1 Introducción

6.1.1- Definición y propósito de la geofísica minera

La geofísica es una parte integral de la mayoría de los programas de exploración mineral, tanto en áreas no exploradas (greenfields) como en aquellas previamente exploradas o en producción (brownfields). En contextos greenfields, donde hay escasa o nula información geológica previa, los métodos geofísicos permiten identificar estructuras favorables, cuerpos intrusivos, alteraciones y otras anomalías que orientan los trabajos iniciales de prospección. En proyectos brownfields, en cambio, la geofísica se emplea para redefinir el potencial de áreas conocidas, identificar extensiones ocultas de mineralización o descubrir depósitos satélite cercanos a operaciones existentes. En ambos casos, la geofísica es ampliamente utilizada porque permite mapear grandes extensiones de terreno de manera rápida y rentable, delinear variaciones físicas sutiles en la geología y detectar la presencia de una amplia variedad de depósitos minerales.

La perspectiva geofísica del entorno geológico se centra en las variaciones de las propiedades físicas dentro de un volumen de roca. Estas dos aproximaciones fundamentalmente diferentes para evaluar el entorno geológico implican que un área particular de la geología puede parecer homogénea para un geólogo, pero puede ser heterogénea geofísicamente, y viceversa.

Algunos métodos geofísicos pueden medir la propiedad física real del subsuelo, pero todos los métodos son sensibles a los contrastes de propiedades físicas o a los cambios relativos en las propiedades, es decir, la yuxtaposición de rocas con diferentes propiedades físicas. Son estos cambios en las propiedades físicas los que se detectan y se mapean.

Los métodos geofísicos se utilizan en la exploración mineral para el mapeo geológico y para identificar entornos geológicos favorables para la mineralización, es decir, para detectar directamente o apuntar al entorno mineralizado. Durante la explotación de recursos minerales, la geofísica se utiliza tanto en la delimitación y evaluación del mineral como en el proceso de ingeniería para acceder y extraer el mineral.

Existen cinco clases principales de métodos geofísicos, diferenciadas según las propiedades físicas de la geología a las que responden. Los métodos gravimétricos y magnéticos detectan diferencias en la densidad y el magnetismo, respectivamente, midiendo variaciones en los campos gravitatorio y magnético de la Tierra. El método radiométrico detecta variaciones en la radiactividad natural, a partir de las cuales se puede estimar el contenido de radioelementos de las rocas. El método sísmico detecta variaciones en las propiedades elásticas de las rocas, manifestadas como variaciones en el comportamiento de las ondas sísmicas al atravesarlas.

Los métodos eléctricos, basados en las propiedades eléctricas de las rocas y minerales, son los más diversos de las cinco clases. La conductividad eléctrica, o su recíproco la resistividad, se puede obtener midiendo diferencias en los potenciales eléctricos en las rocas. Cuando los potenciales surgen de procesos naturales, la técnica se conoce como método de potencial espontáneo o autopotencial (SP). Cuando están asociados con corrientes eléctricas generadas artificialmente que pasan a través de las rocas, la técnica se conoce como método de resistividad. Una extensión de esto es el método de polarización inducida (IP), que mide la capacidad de las rocas para almacenar carga eléctrica. Las propiedades eléctricas también se pueden investigar utilizando corrientes eléctricas creadas y medidas a través del fenómeno de inducción

electromagnética. Estos son los métodos electromagnéticos (EM) y, aunque la conductividad eléctrica sigue siendo un factor importante, diferentes implementaciones de la técnica pueden hacer que otras propiedades eléctricas de las rocas influyan en las mediciones

La categorización basada en las propiedades físicas descrita anteriormente se complementa con una clasificación doble de los métodos geofísicos en métodos pasivos o activos. Los métodos pasivos utilizan fuentes naturales de energía, de las cuales los campos gravitatorio y magnético de la Tierra son dos ejemplos, para investigar el terreno. La medición geofísica se realiza con algún tipo de instrumento, conocido como detector, sensor o receptor, que mide la respuesta de la geología local a la energía natural. Los métodos geofísicos pasivos son los métodos gravimétrico, magnético, radiométrico y de potencial espontáneo, además de una forma de prospección electromagnética conocida como magnetotelúrica. (Telford et al., 1990).

Los métodos geofísicos activos implican la introducción de alguna forma de energía en el suelo, como ondas sísmicas, corrientes eléctricas, ondas electromagnéticas, entre otras. La respuesta del terreno a la energía introducida se mide con algún tipo de detector. La necesidad de complementar el detector con una fuente de esta energía, a menudo llamada transmisor, implica que los métodos activos son más complejos y costosos de trabajar. Sin embargo, tienen la ventaja de que la transmisión de la energía al suelo se puede controlar para producir respuestas que proporcionen información particular sobre el subsuelo y para enfocarse en la respuesta de alguna región (usualmente en profundidad) de interés particular. (Telford et al., 1990).

6.2 Métodos geofísicos aplicados y respectivos resultados

En el área de estudio se llevaron a cabo técnicas geofísicas con el objetivo de obtener datos precisos y detallados para conocer las características del subsuelo. Las metodologías empleadas incluyen helimagnetometría y Polarización Inducida / Resistividad. A continuación, se presenta una descripción teórica de cada uno de estos métodos, seguida por los resultados obtenidos a partir de una consultoría especializada en geofísica.

6.2.1 Método magnético

Introducción

Los métodos magnéticos miden variaciones espaciales en el campo magnético de la Tierra. Las variaciones en el campo magnético se deben a cambios en el magnetismo de las rocas, controlados principalmente por una propiedad física llamada susceptibilidad magnética. Los estudios magnéticos son relativamente económicos y se utilizan ampliamente para la detección directa de varios tipos de depósitos minerales.

Las mediciones magnéticas realizadas desde el aire, conocidas como aeromagnetometría, se utilizan ampliamente en la exploración minera para levantamientos regionales, mapeo detallado a escala de prospecto y detección de objetivos. En áreas donde la exposición es pobre, la magnetometría se ha convertido en un componente indispensable de los programas de exploración.

En esta sección se verán los principios básicos de la medición del magnetismo, haciendo énfasis en su aplicación en el medio geológico. Además, se presentarán los resultados obtenidos en el área de estudio.

Medición del Magnetismo

El magnetismo involucra la interacción de objetos a distancia a través de los campos que los rodean. Un campo magnético es causado por el magnetismo de un objeto. Es común referirse al objeto como la fuente de estos campos. Los campos magnéticos son tipos de campos potenciales, que requieren que se realice trabajo para mover objetos magnéticos dentro de ellos. La intensidad o fuerza del magnetismo de un objeto se define en términos de una corriente eléctrica que fluye en una bobina de alambre produciendo magnetismo. Las unidades son amperios por metro (A/m), aunque miliamperios por metro (mA/m) se utilizan comúnmente en geofísica.

La mayor parte del campo magnético de la Tierra no se origina en la corteza, y son las variaciones localizadas del campo debido a materiales magnéticos en la corteza las que son de interés en la exploración mineral. La intensidad promedio del campo magnético de la Tierra es de aproximadamente 50,000 nT, y las variaciones de origen geológico pueden superar los 10,000 nT, que representan alrededor del 20% de la intensidad del campo, por lo que las variaciones pueden ser extremadamente grandes en comparación con la influencia muy pequeña que tienen las características geológicas locales en el campo magnético. Sin embargo, estas grandes variaciones son raras. Más comunes son las variaciones de decenas o cientos de nanoteslas. (Telford et al., 1990)

El campo magnético de la Tierra es fundamental para determinar la fuerza y forma de las anomalías magnéticas en la corteza. Sin él, no habría anomalías magnéticas ni formación de magnetismo remanente. El campo magnético cambia significativamente tanto en dirección como en fuerza a lo largo de la Tierra y a lo largo de escalas de tiempo que son significativas para las investigaciones de exploración.

El instrumento utilizado para medir el campo magnético es el magnetómetro. Estos dispositivos se emplean principalmente para medir la intensidad total del campo magnético, lo que generalmente se conoce como la intensidad total del campo (TMI), mediante mediciones relativas. Aunque los magnetómetros utilizados en exploración pueden realizar mediciones absolutas, su función principal en este contexto es determinar variaciones en el campo magnético. Además, existen diferentes tipos de magnetómetros, como el magnetómetro vectorial, que mide la intensidad del campo en una dirección específica (es decir, en un componente del campo). Los magnetómetros son instrumentos pequeños y ligeros que permiten realizar mediciones rutinarias tanto en el aire, como en el suelo y en pozos.

Los levantamientos magnéticos realizados en el aire con un avión de ala fija se conocen como aeromagnetismo, y aquellos realizados desde un helicóptero se conocen como heliomagnetismo.

El campo magnético varía menos con la elevación que el campo de gravedad, por lo que no es necesario recopilar información precisa sobre la altura durante un levantamiento. Además, las mediciones de TMI no requieren que se monitoree la orientación del sensor.

Los objetos magnéticos alteran la fuerza y dirección del campo magnético de la Tierra. Los cambios en la dirección del campo debido a la mayoría de las características geológicas son muy pequeños y ofrecen una resolución limitada en la detección de variaciones en las propiedades magnéticas del subsuelo. Sin embargo, el efecto en la intensidad del campo es significativo y es el elemento más sensible a los cambios en las propiedades magnéticas de las rocas de la corteza.

Es la intensidad del campo magnético la que se mide y se mapea en los levantamientos magnéticos. (Telford, Geldart y Sheriff, 1990)

Los levantamientos magnéticos terrestres se pueden realizar "a pie" con el sensor ubicado en la cima de un poste, a unos metros del suelo. También se pueden usar pequeños vehículos todo terreno cuando el acceso lo permite. Los aviones de vuelo bajo ofrecen ventajas significativas sobre el levantamiento en tierra, principalmente porque no están impedidos por el acceso al terreno y la vegetación, y pueden cubrir áreas grandes más rápido y a un costo de encuesta relativamente menor. El sensor magnético se ubica lo más lejos posible de la plataforma de levantamiento para minimizar su efecto magnético en el sensor. Normalmente, se monta al final de un soporte no magnético que se extiende desde el vehículo o el avión. A veces, en trabajos aéreos, el sensor magnético se arrastra, en un cable largo, detrás y debajo del avión. Esto suele ocurrir cuando se recopilan datos magnéticos junto con otros tipos de mediciones geofísicas, por ejemplo, cuando se realizan mediciones electromagnéticas.

A veces, se mide la diferencia en TMI entre uno o más pares de sensores cercanos que forman un gradiómetro magnético, leyendo un gradiente de TMI en una dirección particular. El gradiómetro suele orientarse para medir el gradiente vertical u horizontal del campo magnético. Para levantamientos en tierra, los dos sensores están montados a varios metros de distancia en un poste. En trabajos aéreos, los gradientes horizontales se miden con magnetómetros en las puntas de las alas del avión (gradiente horizontal), o en la parte superior y base de la cola (gradientes verticales). Los errores de orientación pueden ser grandes en las mediciones de gradientes y deben ser monitoreados y registrados de cerca.

Las estrategias para realizar levantamientos magnéticos se determinan principalmente por la necesidad de registrar los cambios temporales en el campo geomagnético que ocurren durante el levantamiento para que puedan ser eliminados durante la reducción de datos. El problema se aborda mediante una combinación de lecturas repetidas y monitoreo continuo del campo. Esto se realiza estableciendo un segundo magnetómetro en una estación base en una ubicación fija cerca o en el centro del área de levantamiento para registrar el campo geomagnético cambiante, generalmente a intervalos de varios minutos. Para levantamientos grandes, las variaciones espaciales en los cambios diurnos requieren múltiples estaciones base. La estación base también permite monitorear la tasa de cambio del campo, que es la base operativa para identificar una tormenta magnética. (Telford et. al, 1990)

Magnetismo en el Medio Geológico

Comprender el magnetismo del entorno geológico y las causas geológicas de las variaciones en el magnetismo es crucial para hacer interpretaciones realistas de los datos magnéticos. El magnetismo de las rocas depende de las propiedades magnéticas de sus minerales constituyentes. A diferencia de la densidad, el magnetismo de las rocas varía mucho más, con la susceptibilidad variando aproximadamente cinco órdenes de magnitud entre los tipos de rocas comunes. El control fundamental del magnetismo de las rocas es el contenido de hierro. Sin hierro, no se pueden formar minerales magnéticos, aunque no todos los minerales de hierro son fuertemente magnéticos. Los minerales magnéticos pueden formarse en el ambiente ígneo primario o ser creados por procesos secundarios como el metamorfismo, y todos pueden ser destruidos por procesos secundarios, especialmente la meteorización.

A diferencia de la densidad, el magnetismo de las rocas no es una propiedad del material en su totalidad, sino que depende de especies minerales que usualmente comprenden solo un pequeño porcentaje del volumen mineralógico de una roca. La mineralogía magnética a menudo

se ve afectada por cambios sutiles en la geoquímica y procesos secundarios, que pueden producir propiedades magnéticas muy diferentes en litotipos similares. Además, el magnetismo es una propiedad vectorial; es decir, tanto la intensidad como la dirección del magnetismo de la roca pueden verse afectadas, y estos efectos pueden afectar tanto al magnetismo remanente como al inducido. Es común que las rocas contengan poblaciones distintas de minerales magnéticos con características diferentes, y estos pueden verse afectados de manera diferente por eventos geológicos.

Aplicaciones relevantes para la exploración mineral incluyen estudios para delimitar estructuras, cuerpos ígneos y zonas mineralizadas.

Respuesta Magnética en el Área de Estudio

En este apartado se presenta la respuesta magnética del área de estudio, basada en la aplicación del método helimagnético.

Los datos obtenidos mediante el método helimagnético han revelado variaciones significativas en la intensidad del campo magnético. Estas variaciones reflejan la influencia de cuerpos ubicados en el subsuelo que poseen propiedades magnéticas, como ciertos minerales o estructuras geológicas capaces de modificar el campo. La figura 26 muestra anomalías magnéticas que podrían estar asociadas a la presencia de intrusiones.

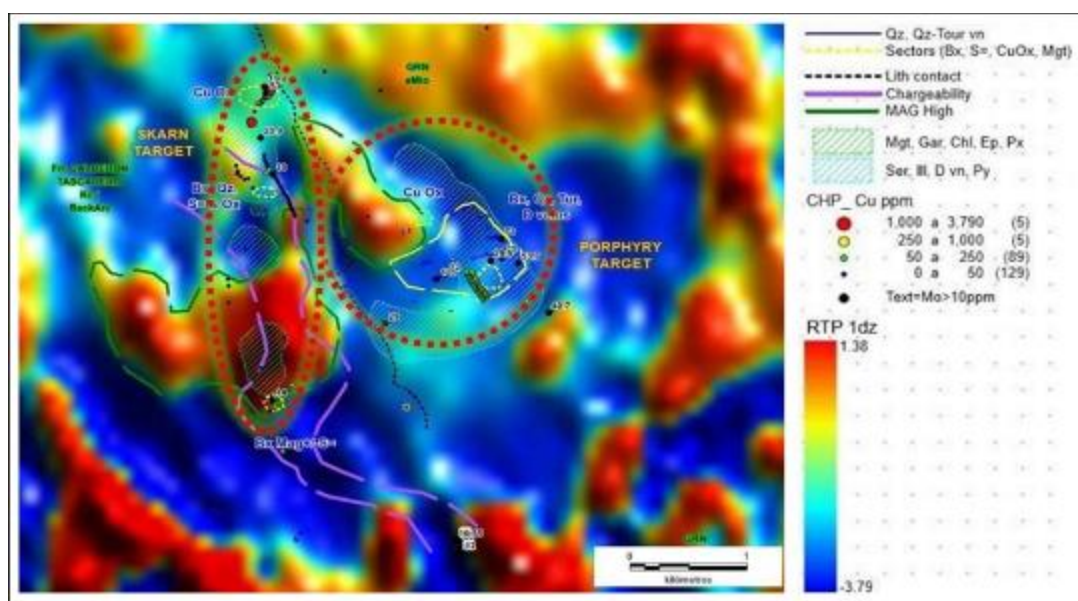


Figura 25: Mapa de intensidad magnética total del área de estudio

6.2.2 Métodos eléctricos: Resistividad y Polarización inducida.

Introducción

Existen una gran variedad de métodos geofísicos basados en fenómenos eléctricos y electromagnéticos que responden a las propiedades eléctricas del subsuelo (Reynolds, 2011; Telford et al., 1990). Algunos son métodos de levantamiento pasivos que realizan mediciones de campos eléctricos o electromagnéticos (EM) naturales y utilizan equipos de prospección bastante simples. Otros son métodos activos que transmiten una señal al subsuelo y emplean equipos multicanal sofisticados para derivar múltiples parámetros relacionados con las propiedades eléctricas del subsuelo.

Las prospecciones electromagnéticas y eléctricas se llevan a cabo rutinariamente en y debajo de la superficie terrestre. Sin embargo, las prospecciones eléctricas requieren contacto directo con el suelo, por lo que solo las mediciones EM son posibles desde el aire (Kearey et al. 2002).

Los métodos de prospección que implican la medición de potenciales eléctricos asociados con el flujo de corriente subterránea mediante contacto eléctrico directo con el suelo se conocen colectivamente como métodos eléctricos. Estos incluyen los métodos de potencial espontáneo (SP), resistividad, polarización inducida (IP) y potencial aplicado (AP) (Sheriff, 2002).

En la exploración mineral, los métodos eléctricos y electromagnéticos se utilizan a escala regional y de prospecto para la detección directa de objetivos eléctricamente anómalos, en particular mineralizaciones de sulfuros y óxidos metálicos (Telford et al., 1990). Se puede obtener información sobre la geometría, dimensiones y características eléctricas de las fuentes de anomalías. Otra aplicación común es el mapeo de la estructura interna y el espesor de los materiales cerca de la superficie, como el regolito o la cobertura sedimentaria no consolidada. El mapeo geológico utilizando técnicas electromagnéticas aéreas está en aumento, gracias a los continuos desarrollos en técnicas de prospección y modelado de datos. Dado que los métodos eléctricos no pueden implementarse desde el aire, tienen un papel mucho menor en el mapeo regional. Al igual que con otros métodos geofísicos, se están desarrollando herramientas de interpretación mejoradas, principalmente basadas en el modelado inverso, que producen imágenes de la distribución subsuperficial de las diversas propiedades eléctricas (Reynolds, 2011).

A continuación, se explicarán los métodos de resistividad y polarización inducida que fueron aplicados en el área de estudio.

Métodos eléctricos

Los métodos eléctricos y electromagnéticos proporcionan información sobre la conductividad eléctrica, una medida de la facilidad con la que las corrientes eléctricas fluyen dentro del subsuelo. Un parámetro asociado es la resistividad, que es la inversa de la conductividad y mide la dificultad con la que las corrientes eléctricas fluyen. Los métodos eléctricos dependen del contraste en las propiedades eléctricas y responden bien en regiones donde el flujo de corriente es inhibido, pero pueden tener dificultades para determinar la conductividad absoluta con precisión, especialmente en objetivos pequeños. En cambio, los métodos EM responden principalmente a la conductividad absoluta del terreno y a las dimensiones de esa distribución, siendo más sensibles en regiones donde el flujo de corriente es menos inhibido, es decir, en objetivos conductores (Kearey et al., 2002).

Los minerales formadores de rocas que constituyen la base de la clasificación geológica ejercen poca influencia sobre las propiedades eléctricas de las rocas. El principal control es la porosidad, por lo que las propiedades eléctricas de las rocas son extremadamente variables y difíciles de predecir geológicamente. Se observan propiedades eléctricas anómalas en muchos tipos de minerales de mena y sus ocurrencias, pero las respuestas varían ampliamente según el entorno geológico (Telford et al., 1990).

Las prospecciones de resistividad y polarización inducida (IP) tienen mucho en común en términos de adquisición, visualización e interpretación de datos. Las prospecciones de solo resistividad se realizan ampliamente en estudios de agua subterránea y medioambientales. En la exploración minera, generalmente se miden ambos parámetros, ya que los datos de

resistividad se adquieren como parte de la metodología de prospección IP, complementándose mutuamente en el análisis (Reynolds, 2011).

En una prospección de resistividad/IP, se aplica una fuerza electromotriz producida por una batería o un generador portátil al suelo mediante un par de electrodos conocidos como electrodos de corriente, que forman el dipolo de corriente o transmisor. Se forma un campo eléctrico en el suelo, resultando en un flujo de corriente a través del subsuelo, el cual se mide. Las diferencias en el potencial eléctrico entre ubicaciones seleccionadas, debido al flujo de corriente subterránea, se miden usando un segundo par de electrodos conocidos como electrodos de potencial, que forman el dipolo de potencial o receptor. La disposición o configuración de los cuatro electrodos se conoce como un arreglo de electrodos.

En cada estación de prospección, se registran la corriente transmitida y la diferencia de potencial medida a lo largo del dipolo receptor, junto con la ubicación de los cuatro electrodos. A partir de estos datos, se puede calcular la resistividad del subsuelo.

La respuesta IP también se registra y se calculan varios parámetros, como la cargabilidad aparente, el tiempo de decaimiento y, en algunos casos, la fase y otros parámetros espectrales si se utiliza polarización inducida en el dominio de la frecuencia. Las variaciones laterales y verticales en las propiedades de resistividad/IP del subsuelo se pueden mapear moviendo el arreglo alrededor del área de prospección y cambiando las posiciones relativas de los electrodos que lo componen. Los datos pueden adquirirse y presentarse en forma de perfiles (1D), mapas o secciones transversales (2D) o volúmenes (3D). Generalmente, los electrodos de potencial y corriente se ubican en la superficie del suelo, pero también es posible colocar algunos de ellos dentro de perforaciones (taladros) para mejorar la sensibilidad del arreglo en profundidad. Esta configuración puede llevar a mejoras significativas en la detección y resolución del objetivo.

Las mediciones de resistividad/IP están influenciadas por las propiedades eléctricas del gran volumen de roca a través del cual pasa la corriente, por lo que no necesariamente son indicativas de las propiedades eléctricas del material inmediatamente debajo del punto de medición. Además, no se muestran en forma similar a la geología, por lo que se requieren técnicas complejas de interpretación y modelado para transformar las mediciones en modelos eléctricos del subsuelo. El modelado de inversión de volúmenes de datos 3D se está volviendo más común con la creciente adquisición masiva de volúmenes detallados de datos de resistividad/IP en 3D. Estas técnicas producen resultados en una forma similar a la geología, siguiendo una tendencia similar a los métodos de campo potencial y electromagnético (Kearey et al., 2002; Reynolds, 2011).

Respuesta eléctrica en el área de estudio

En las figuras 26 y 27 se presentan el modelo de cargabilidad y el modelo de resistividad, respectivamente.

En el modelo de cargabilidad se destacan dos anomalías importantes: una ubicada en el sector correspondiente al target de pórfido y otra al sur, en las cercanías del target skarn. Estas anomalías podrían estar relacionadas con la presencia de mineralización o alteraciones hidrotermales en esos sectores, características comunes en este tipo de objetivos (Reynolds, 2011; Meinert et al., 2005).

En lo que respecta a la anomalía asociada al skarn podría deberse a la presencia de sulfuros diseminados como piritita, calcopiritita y magnetita, minerales comunes en este tipo de depósitos, los cuales generan una fuerte respuesta de cargabilidad (Telford et al., 1990;

Rodríguez y Troncoso, 2017). Además, ciertas alteraciones hidrotermales, como la sericitización o la cloritización, también pueden generar respuestas elevadas debido al desarrollo de minerales con capacidad de polarización.

Cuando se comparan estos resultados con el modelo de resistividad, se observan anomalías principalmente en el área de skarn, lo que sugiere la posible presencia de materiales con propiedades resistivas contrastantes, como cuerpos mineralizados o zonas de alteración. Además, se detecta una pequeña anomalía al sur del área de skarn, lo que podría indicar una extensión de la alteración o una mineralización asociada a estructuras geológicas cercanas. Esta respuesta se compatibiliza con la distribución de cargabilidad observada, ya que ambas propiedades —cargabilidad elevada y resistividad reducida o contrastante— suelen correlacionarse en ambientes hidrotermales y mineralizados (Reynolds, 2011; Rodríguez y Troncoso, 2017).

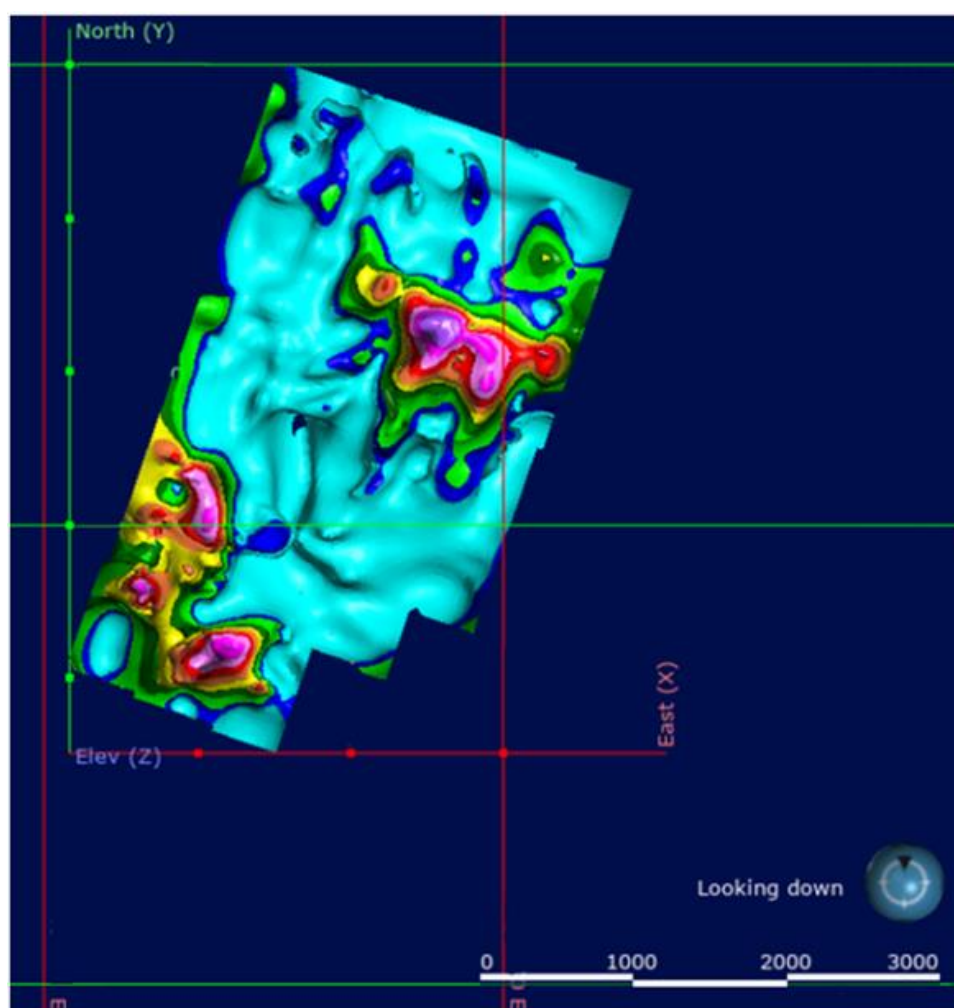


Figura 26: Modelo de cargabilidad del área de estudio.

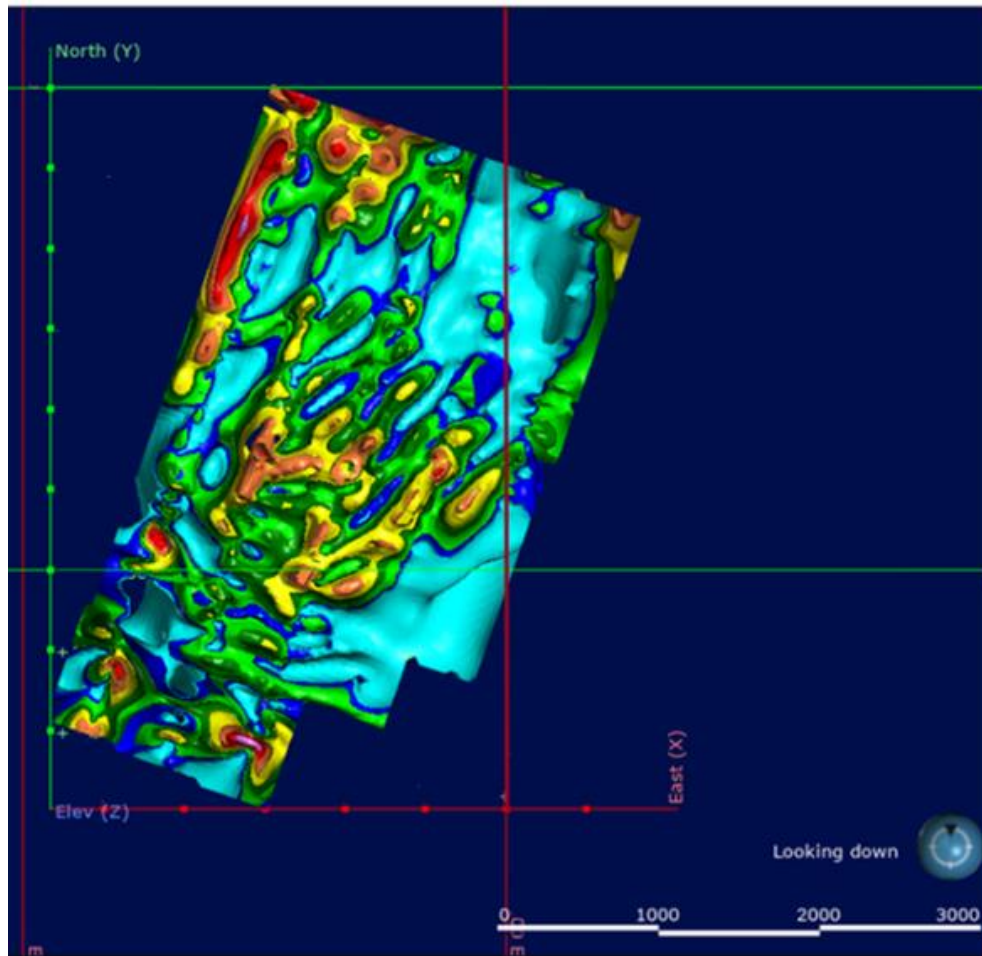


Figura 27: Modelo de resistividad del área de estudio.

7. Aspectos legales, ambientales y sociales

7.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo abordar los aspectos legales y ambientales fundamentales para realizar minería dentro de la Argentina y así aplicarlo en el proyecto Calderón.

La integración de estos elementos garantiza que las actividades de exploración se realicen de manera sostenible y conforme a las leyes vigentes, minimizando así los impactos negativos sobre el entorno y las comunidades locales.

7.2 Marco Legal

La legislación nacional, como la Ley de Minería y la Ley de Protección Ambiental, regula las actividades mineras y establece los requisitos para obtener los permisos necesarios. Es fundamental seguir un riguroso proceso para la obtención de licencias, que incluye estudios de impacto ambiental y audiencias públicas.

7.2.1 Legislación Nacional

En la República Argentina, la actividad minera se encuentra regulada por un conjunto de normativas de carácter nacional y provincial que establecen el marco legal para la exploración, explotación y cierre de yacimientos. Entre las principales normas de alcance nacional se destacan el Código de Minería (Ley N.º 1.919) y la Ley de Inversiones Mineras (Ley N.º 24.196), cuya aplicación se articula con las competencias jurisdiccionales de cada provincia, conforme al principio de dominio originario de los recursos naturales establecido por la Constitución Nacional.

Código de Minería (Ley N.º 1.919)

El Código de Minería constituye el cuerpo normativo que regula integralmente la actividad minera en el país, estableciendo principios, derechos, obligaciones y procedimientos aplicables al desarrollo de proyectos mineros, en un marco de gestión racional de los recursos minerales.

Si bien fue sancionado originalmente en 1887, el Código ha sido objeto de sucesivas modificaciones, entre las que se destacan la reforma ambiental introducida por la Ley N° 24.585 (1995) y los cambios derivados de la reforma constitucional de 1994, que otorgaron a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio.

Este cuerpo legal contempla, entre otros, los siguientes tópicos:

1. Concesiones mineras:

- **Definición y Clasificación:** El Código establece una clasificación de minas en tres categorías (primera, segunda y tercera), y define los instrumentos jurídicos de concesión de exploración y de explotación, los cuales otorgan al titular un derecho real minero, de carácter especial, sobre el área concesionada.
- **Proceso de Adquisición:** Regula el procedimiento para la solicitud y obtención de concesiones, incluyendo etapas como el pedimento, la publicación, el cateo, la mensura y el registro ante la autoridad minera jurisdiccional.
- **Duración y Renovación:** La validez de las concesiones está sujeta al cumplimiento de condiciones establecidas por el Código, tales como el pago del canon minero y la realización de labores mínimas de trabajo, so pena de caducidad.

2. Derechos y Obligaciones:

- **Derechos del titular minero:** El titular adquiere un derecho exclusivo para explorar o explotar los recursos minerales dentro del perímetro autorizado, en los términos que establezca su título minero.
- **Obligaciones del titular:** Entre las principales obligaciones se incluyen el pago del canon anual por concesión, la ejecución de tareas mínimas de desarrollo y explotación, el cumplimiento de los planes de trabajo aprobados y el respeto de la normativa ambiental vigente, incluyendo la presentación de informes técnicos y ambientales.

3. Regulaciones Ambientales y de Seguridad:

La dimensión ambiental de la actividad minera fue incorporada formalmente al Código mediante la Ley N.º 24.585, que establece la obligatoriedad de presentar un Informe de Impacto Ambiental (IIA) previo al inicio de cada etapa del proyecto (exploración, explotación, cierre), incluyendo su actualización periódica y la presentación de una línea de base ambiental.

Asimismo, deben cumplirse los principios generales de la Ley General del Ambiente N.º 25.675, promulgada en 2002, que rige de manera transversal en todo el territorio nacional.

- **Evaluación ambiental:** El IIA debe ser aprobado por la autoridad minera competente en cada provincia, quien actúa como autoridad de aplicación. El cumplimiento de este procedimiento es condición para el avance de cada etapa del proyecto.
- **Seguridad y salud laboral:** Aunque el Código alude a la protección de los trabajadores, los aspectos vinculados a seguridad e higiene en el trabajo están regulados por legislación complementaria, tales como la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo N.º 19.587 y normas provinciales.

4. Aspectos Económicos y Fiscales:

Los aspectos económicos y fiscales no se encuentran directamente regulados por el Código de Minería, sino por legislación específica complementaria.

- **Regalías mineras:** Están reguladas a nivel provincial, con un máximo legal del 3 % del valor “boca mina” del mineral extraído, según lo establecido por el artículo 22 de la Ley de Inversiones Mineras N.º 24.196.
- **Régimen de inversiones:** La mencionada Ley N.º 24.196, junto con sus modificatorias, establece un régimen promocional para el sector minero, incluyendo estabilidad fiscal por 30 años, amortización acelerada, exención de ciertos aranceles de importación y reintegros a la exportación.
- **Otros incentivos:** A nivel provincial pueden existir regímenes fiscales específicos para promover la inversión minera en zonas de interés geológico-económico.

5. Resolución de Conflictos:

- **Mecanismos de Resolución:** El Código prevé mecanismos legales para la resolución de conflictos entre concesionarios, comunidades locales y el Estado.
- **Arbitraje y Mediación:** Se incluyen procedimientos para la mediación y el arbitraje en disputas relacionadas con la actividad minera.

6. Cierre de Minas:

- **Plan de Cierre:** Establece los requisitos para la presentación de un plan de cierre de minas, que debe incluir medidas para la rehabilitación ambiental y la seguridad a largo plazo.
- **Rehabilitación y Post-cierre:** Detalla las responsabilidades de los titulares para la rehabilitación del sitio minero y el monitoreo post-cierre.

Ley de Inversiones Mineras (Ley N.º 24.196)

La Ley de Inversiones Mineras, promulgada en 1993, es una normativa diseñada para incentivar y regular las inversiones en el sector minero de Argentina. Su objetivo principal es proporcionar un entorno fiscal y legal estable para los inversores, ofreciendo beneficios como la estabilidad fiscal por 30 años, exenciones impositivas y la libre disponibilidad de divisas. Esta ley busca fomentar el desarrollo de la minería en el país, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento de las normativas ambientales y el respeto por las comunidades locales.

La adhesión al régimen se formaliza mediante la inscripción del proyecto en el Registro de Inversiones Mineras que administra la Secretaría de Minería de la Nación.

A continuación, se detallan algunos de los aspectos más relevantes:

1. **Estabilidad Fiscal:** La ley garantiza a los inversores estabilidad fiscal por un periodo de 30 años desde la fecha de presentación del estudio de factibilidad. Esto implica que las condiciones impositivas no podrán ser modificadas en perjuicio del inversor durante ese período.
2. **Deducciones Impositivas:** Permite la deducción del 100% de los costos de exploración del Impuesto a las Ganancias. Además, se autoriza la amortización acelerada de inversiones en infraestructura.
3. **Exención de Derechos de Importación:** Los equipos, maquinarias e insumos necesarios para la explotación minera pueden importarse sin pagar derechos de importación.
4. **Régimen de Devolución del IVA:** Los inversores pueden solicitar la devolución anticipada del IVA sobre las inversiones realizadas durante la etapa de exploración.
5. **Acceso a Divisas:** Garantiza el derecho a acceder libremente al mercado de cambios para la compra y venta de divisas necesarias para las operaciones mineras.
6. **Reinversión de Utilidades:** Ofrece beneficios adicionales para las utilidades que se reinviertan en el país, bajo las condiciones establecidas en la reglamentación correspondiente.

7.2.2 Permisos y Licencias

Para llevar a cabo las actividades de exploración en el proyecto Calderón – Calderoncito, se requiere la obtención de varios permisos y licencias, los cuales son emitidos por distintas autoridades y tienen procedimientos específicos de obtención. A continuación, se enumeran algunos de los permisos más relevantes junto con una breve descripción y el proceso de obtención:

1. Informe de Impacto Ambiental de Exploración

- **Autoridad:** Ministerio de Minería
- **Plazo del permiso:** El informe de impacto ambiental es aprobado por el Ministerio de Minería de la provincia de San Juan, el cual realiza una resolución denominada DIA (Declaración de impacto ambiental) la cual tiene una duración de 2 años. Pasado este

plazo, se deberá realizar una actualización del informe de impacto ambiental y se generará una nueva DIA.

- **Descripción:** Este informe es necesario para evaluar y mitigar los impactos ambientales de las actividades de exploración.
- **Proceso de obtención:** Se requiere un estudio ambiental que aborde las actividades específicas de exploración el cual debe ser aprobado por el Ministerio de Minería de la provincia de San Juan.

2. Inscripción provincial como Generador de Residuos Peligrosos – Certificado Ambiental Anual

- **Autoridad:** Autoridad Ambiental Provincial el cual depende del Ministerio de Minería y dentro del mismo, la Secretaría de Gestión Ambiental y Control Minero.
- **Plazo:** 1 año.
- **Descripción:** Este certificado es necesario para las empresas que generan residuos peligrosos, asegurando su correcta gestión y disposición.
- **Proceso de Obtención:** Se debe registrar a la empresa como generadora de residuos peligrosos, proporcionando información sobre la cantidad y tipo de residuos generados. El certificado se renueva anualmente tras una evaluación de cumplimiento.

3. Permiso Temporario de Extracción de Agua para Perforación

- **Autoridad:** Autoridad Hídrica Provincial, administrada por el Departamento de Hidráulica de San Juan que pertenece al Ministerio de Infraestructura, Agua y Energía.
- **Plazo:** Temporal, según duración del proyecto
- **Descripción:** Este permiso es requerido para extraer agua subterránea necesaria para las actividades de perforación durante la exploración.
- **Proceso de Obtención:** Se debe presentar una solicitud detallando la cantidad de agua requerida y el impacto previsto en los recursos hídricos locales. La evaluación de la solicitud del permiso de extracción de agua lo realiza el Departamento de Hidráulica el cual tiene un procedimiento específico regido por la Resolución 211-DH-2023 en donde intervienen distintas áreas. Existe un Registro y Catastro General de Aguas, en donde la autoridad evalúa si se otorgaron permisos para el cauce en cuestión. Entre otras áreas internas la solicitud pasa por Hidrología y Control y Calidad de Aguas que suelen exigir un caudalímetro en la toma y análisis de cauce del río de la solicitud.

4. Autorización para la Investigación Arqueológica

- **Autoridad:** Autoridad Arqueológica Provincial depende de la Dirección de Cultura dentro del Ministerio de Turismo, Cultura y Deporte.
- **Plazo:** Según duración del proyecto.
- **Descripción:** Este permiso es necesario para garantizar que las actividades de exploración no afecten sitios arqueológicos de valor histórico o cultural.
- **Proceso de Obtención:** Se requiere la presentación de un plan de trabajo detallado y un estudio preliminar que identifique posibles sitios arqueológicos, estos se incluyen en los estudios de base del Informe de Impacto Ambiental y sus respectivas actualizaciones y luego se lleva a cabo un monitoreo u otra prospección si es requerido por la autoridad. La autorización se concede tras la evaluación y, en algunos casos, puede requerirse la supervisión de un arqueólogo.

5. Autorización de Equipos de comunicación

- **Autoridad:** Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM)
- **Plazo:** Según duración del proyecto
- **Descripción:** Permiso necesario para la instalación y uso de equipos de comunicación, como radios y sistemas de telecomunicaciones, en el área de exploración.
- **Proceso de Obtención:** Se debe presentar una solicitud indicando el tipo de equipos, su uso y la cobertura esperada. ENACOM evalúa la solicitud y verifica que los equipos cumplan con las normativas técnicas y de seguridad.

En conclusión, la obtención de estos permisos y licencias permitirá que las actividades de exploración en el Proyecto Calderón-Calderoncito se realicen de manera legal y responsable. Cada permiso asegura el cumplimiento de normativas ambientales, sociales y técnicas específicas, protegiendo tanto el medio ambiente como las comunidades locales.

7.3 Aspectos ambientales

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es una herramienta clave que permite identificar y mitigar los impactos negativos del proyecto sobre el medio ambiente. Un Plan de Manejo Ambiental (PMA) detallado debe ser implementado, abordando aspectos como el manejo de residuos, la protección de cuerpos de agua y la preservación de la biodiversidad. Los programas de monitoreo ambiental asegurarán el cumplimiento de los estándares establecidos durante todo el ciclo de vida del proyecto.

7.3.1 Evaluación de Impacto Ambiental

Introducción

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es el procedimiento obligatorio que permite identificar, predecir, evaluar y mitigar los potenciales impactos que un proyecto o actividad puede causar al ambiente en el corto, mediano y largo plazo; siendo un instrumento que se aplica previamente a la toma de decisión sobre la ejecución de un proyecto.

Se trata de un procedimiento técnico-administrativo con carácter preventivo, previsto en la Ley Nº 25675 —la Ley General del Ambiente—, que permite una toma de decisión informada por parte de la autoridad ambiental competente respecto de la viabilidad ambiental de un proyecto y su gestión ambiental. La autoridad se expide a través de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o Certificado de Aptitud Ambiental (CAA) según la norma particular de cada jurisdicción. Estos documentos son conocidos como “licencia ambiental” en la mayoría de los países.

El documento técnico central de la EIA es el Estudio de Impacto Ambiental (EsIA), que realiza la persona proponente del proyecto (sea pública o privada) y contiene: una descripción del proyecto, su línea de base ambiental y social, el marco legal de cumplimiento, un análisis de alternativas que contempla distintas formas posibles de llevar a cabo el proyecto, como variaciones en la ubicación, el diseño, las tecnologías empleadas, los métodos de operación o incluso la posibilidad de no realizarlo; la identificación y valoración de los potenciales impactos ambientales y sociales que el proyecto (en todas sus etapas) puede causar en el corto, mediano y largo plazo, así como la previsión de la gestión ambiental para abordarlos (prevención, mitigación y compensación), que se concreta a través del Plan de Gestión Ambiental dentro del EsIA.

Los principales objetivos de la EIA son:

- determinar la viabilidad ambiental de un proyecto para la toma de una decisión informada
- promover la transparencia y la participación pública en el proceso de planificación y toma de decisiones
- propiciar la prevención y adecuada gestión de los potenciales impactos ambientales y sociales asociados a determinados proyectos.

Procedimiento de la Evaluación de Impacto Ambiental

Un procedimiento de EIA tiene distintas etapas, que pueden variar de acuerdo con lo previsto en cada marco normativo o procedimiento aprobado por las autoridades ambientales competentes. Las etapas más comunes son (Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019; Ley N.º 24.585):

1. **Aviso de Proyecto:** Inicia formalmente el procedimiento mediante la presentación de un documento que contiene una descripción general del proyecto, su localización, características principales y una evaluación preliminar de los posibles impactos. Este documento permite a la autoridad determinar el nivel de evaluación requerido.
2. **Categorización (Screening):** Determina si el proyecto requiere un EIA y el tipo de estudio necesario, basado en la complejidad ambiental del proyecto y en las normativas locales.
3. **Determinación del Alcance - Términos de Referencia (TDR):** Establece las especificaciones técnicas para el estudio, siguiendo guías, normativas o criterios específicos.
4. **Revisión del Estudio de Impacto Ambiental:** Evalúa el EsIA presentado para asegurar que la información es suficiente. Puede incluir la consulta a expertos y la solicitud de estudios adicionales. El resultado es un dictamen técnico que puede preceder la participación pública.
5. **Participación Pública:** Se realiza una consulta o audiencia pública para obtener opiniones y comentarios de la comunidad antes de tomar una decisión sobre la viabilidad del proyecto.
6. **Toma de Decisión:** Tras revisar el EsIA y la participación pública, la autoridad ambiental elabora un informe técnico que fundamenta su decisión sobre la autorización ambiental del proyecto.

Los componentes de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) suelen incluir los siguientes elementos esenciales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022):

1. **Descripción del Proyecto:** Detalles sobre la localización, alcance, tecnología, procesos y objetivos del proyecto propuesto.
2. **Marco Legal y Normativo:** Identificación de la normativa ambiental aplicable al proyecto.
3. **Descripción del Entorno Ambiental:** Línea de base ambiental y social del área de influencia, incluyendo componentes físicos, bióticos y socioeconómicos.
4. **Identificación y Evaluación de Impactos:** Determinación y valoración de los impactos ambientales y sociales potenciales, positivos y negativos, directos e indirectos.
5. **Medidas de Mitigación y Prevención:** Acciones previstas para minimizar o compensar los impactos negativos identificados, así como planes de manejo de contingencias.
6. **Plan de Monitoreo y Seguimiento:** Estrategias para verificar el cumplimiento de las medidas de mitigación durante la ejecución y operación del proyecto.

- 7. Consultas y Participación Pública:** Descripción del proceso de participación pública, su metodología y resultados.
- 8. Análisis de Alternativas:** Evaluación de distintas opciones para la ejecución del proyecto, incluyendo la posibilidad de no realizarlo, con el fin de seleccionar la alternativa más sustentable.
- 9. Conclusiones y Recomendaciones:** Evaluación final de la viabilidad ambiental del proyecto y recomendaciones para su ejecución.

Caso de estudio Proyecto Calderón – Calderoncito

El estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto fue llevado a cabo por el área correspondiente de asuntos legales y ambientales, asegurando un enfoque exhaustivo y meticuloso en la evaluación.

El informe proporcionó información general del proyecto para el establecimiento de las bases para una comprensión integral. Posteriormente, se llevó a cabo una minuciosa descripción del ambiente circundante, incluyendo la evaluación de los aspectos físicos, biológicos y socioeconómicos del área afectada.

Además, se realizó una descripción de los trabajos previstos con las actividades y procesos que involucran al proyecto. A partir de esta base, se identificaron y analizaron los impactos ambientales potenciales, evaluando tanto los efectos positivos como negativos. Se incluyeron recomendaciones para mitigar estos impactos, con una descripción de las medidas de protección ambiental para asegurar la sostenibilidad del proyecto.

El EIA fue sometido a una revisión exhaustiva y posterior aprobación de la autoridad minera competente, resultando en la generación del Documento de Impacto Ambiental (DIA). (Argentina Minera S.A., 2008).

7.3.2 Gestión Ambiental

El Plan de Gestión Ambiental establece y define las medidas de monitoreo, prevención y mitigación que se realizarán antes, durante y después de la generación de un proyecto, las cuales responden a los impactos identificados a través del Estudio de Impacto Ambiental.

Durante las tareas de exploración del proyecto Calderón – Calderoncito, se identificaron diversos impactos ambientales que se detalla a continuación (Argentina Minera S.A., 2008):

Geomorfología

La geomorfología del área será alterada debido a la apertura de caminos y la construcción de plataformas de sondaje. Estos impactos son negativos y directos, con una duración temporal y reversibles, aunque requerirán medidas de mitigación. La extensión del impacto es reducida, afectando solo el 0,011% del área total del proyecto, y su intensidad es muy baja.

Suelo

El suelo se verá afectado principalmente por actividades de perforación y posibles vertidos de lodos y combustibles. Los impactos son negativos, directos y a corto plazo, con una extensión reducida y baja intensidad. Aunque los impactos por vertidos de lodos son neutros debido a la biodegradabilidad de los aditivos, los derrames de combustibles podrían tener un impacto negativo si no se previenen adecuadamente. El acopio de residuos también puede impactar negativamente, aunque se espera que se minimicen con medidas preventivas. Estas medidas

incluyen la correcta gestión y almacenamiento de combustibles en áreas delimitadas y con sistemas antiderrame, la capacitación del personal para manipulación segura de sustancias peligrosas, el uso de barreras de contención para evitar infiltraciones, y el manejo controlado y adecuado de residuos para evitar su dispersión y contaminación del suelo.

Agua superficial

El consumo del agua del Río Calderón para los sondeos generará un impacto negativo, directo e irreversible, dado que el agua captada no regresa a la fuente original. El impacto es temporal mientras duren las actividades, y la extensión es reducida, con una intensidad moderada en función del caudal utilizado.

Aire

El aire se verá afectado por la generación de material particulado y gases debido al movimiento de tierra y la operación de equipos. Estos impactos son negativos, directos, y se consideran poco significativos debido a la baja emisión y a la capacidad dispersante de la atmósfera. Son temporales y reversibles, cesando una vez que las actividades que los generan concluyan.

Fauna

El desplazamiento de especies causado por el ruido y la presencia humana resulta en impactos negativos, directos y temporales.

Ambiente socioeconómico y cultural

Finalmente, el ámbito socioeconómico experimentará impactos positivos, como la generación de empleo y la compra de insumos. Estos efectos son directos, temporales y reversibles, con una extensión reducida y una intensidad baja. Las comunidades más directamente impactadas serán las del departamento de Calingasta, en la provincia de San Juan, quienes podrían beneficiarse por la dinamización económica local y las oportunidades laborales. Asimismo, se considera positivo el impacto de las capacitaciones en Higiene y Seguridad y Medio Ambiente, ya que fortalecen las competencias del personal y la comunidad, reducen riesgos laborales y ambientales, y promueven prácticas sostenibles que contribuyen a la preservación del entorno y bienestar social. En el ámbito cultural, la probabilidad de encontrar restos arqueológicos es baja; sin embargo, en caso de hallazgos, el impacto sería positivo y regulado por la legislación vigente.

Para delinear las medidas de protección ambiental se tuvo en cuenta un principio ambiental fundamental, “la capacidad de acogida” de los factores del área del proyecto, normas ambientales vigentes nacionales y provinciales, aplicadas al proyecto y uso de criterios internacionales de protección ambiental (Norma ISO 14001, EMAS; USEPA; Banco Mundial).

La capacidad de acogida significa la autodepuración del agua, la asimilación de los suelos y la dispersión del aire.

A continuación, se mencionan las medidas de protección de ambiental para algunas de las tareas que se realizarán:

- **Para la habilitación de caminos**, se despejarán caminos existentes y se construirán nuevos con un ancho máximo de 4 metros, incluyendo ampliaciones en curvas, berma de seguridad y señalización adecuada. Se construirá una canaleta contrapendiente para gestionar aguas de deshielo y prevenir erosión.

- **El campamento** será limpiado y acondicionado para proporcionar un entorno saludable para los empleados. La energía se obtendrá mediante generadores eléctricos de 7500 watts, ubicados en bandejas metálicas para prevenir fugas de combustible.

- **Las plataformas de perforación** se construirán con una superficie de 400 m², minimizando la perturbación del terreno y evitando áreas cercanas a cursos de agua. Se inspeccionarán los equipos para prevenir fugas de combustibles y se instalará señalética para la prevención de riesgos.

- **En el manejo de lodos de perforación**, se utilizarán piletas de decantación para separar sólidos y clarificar el agua. Se realizará un control diario para asegurar la ausencia de hidrocarburos y se permitirá la evaporación e infiltración del agua.

- **Para la protección del agua**, se minimizarán captaciones y se mantendrán camiones cisterna en buen estado para evitar fugas. No se humedecerán caminos para evitar el aumento de captación de agua y se controlará el uso del recurso.

- **Los residuos domésticos** se recogerán en un patio cerrado con contenedores separados por tipo de material, y serán gestionados por una empresa autorizada. Los residuos peligrosos, como baterías y filtros, se almacenarán en un patio específico con geomembrana y serán manejados según la normativa vigente.

- **Los residuos sólidos** se separarán y gestionarán adecuadamente, mientras que los residuos industriales peligrosos se reducirán y se almacenarán en un patio especializado, con disposición final por operadores autorizados.

- **En términos de capacitación y contratación**, se priorizará el empleo local y se capacitará al personal en seguridad, salud y medio ambiente. Se promoverá el uso responsable del agua, se prohibirá la caza y recolección de flora, y se tomarán medidas para proteger sitios arqueológicos.

- Finalmente, **en caso de contingencias ambientales**, como derrames de combustibles, se seguirán procedimientos de emergencia para contener y remediar el área afectada, con equipos de extinción de incendios disponibles en los campamentos y áreas de almacenamiento.

En definitiva, la implementación de medidas detalladas y rigurosas garantiza una gestión efectiva de los impactos ambientales del proyecto, asegurando la protección de los recursos naturales y el cumplimiento de las normativas, y promoviendo prácticas sostenibles en todas las fases de operación.

7.4 Aspectos sociales

La participación de las comunidades locales es esencial para el desarrollo exitoso del proyecto. Se deben llevar a cabo consultas previas y mecanismos de participación pública para asegurar que las preocupaciones de las comunidades sean tomadas en cuenta. Además, la implementación de programas para fomentar el desarrollo socioeconómico y garantizar que los beneficios del proyecto se distribuyan equitativamente.

7.4.1 Lineamientos para la gestión social de la Minería Argentina

Introducción

El sector minero, fue incorporando, cada vez con mayor fuerza, aspectos relativos a la evaluación de impactos sociales de los proyectos, a la participación ciudadana, al relacionamiento comunitario y los procesos de consulta, a la inversión social y la conducta empresarial responsable, al rol de los proyectos respecto del desarrollo de las comunidades

locales, a la protección y respeto a los derechos humanos, a una perspectiva de inclusividad, a la planificación de una transición socio-económica en pos de un legado positivo luego del cierre de minas, entre otros.

Tales avances se evidencian, por ejemplo, en la inclusión temprana de los aspectos sociales en el diseño de los proyectos, en la elaboración de planes de gestión, en un mayor compromiso de las operaciones por el desarrollo local, en la consolidación de los procesos participativos y de diálogo con las comunidades y en la incorporación de procesos de debida diligencia.

En este contexto, en el plano internacional fueron surgiendo una serie de iniciativas público– privadas que brindan herramientas para una adecuada gestión de los aspectos sociales relativos a la actividad minera por parte de los proyectos y los gobiernos. En Argentina esta tendencia se ve reflejada en el surgimiento de diferentes iniciativas, a nivel provincial y nacional, que apuntan a una mayor atención a cuestiones relativas a la inserción social de los proyectos en los territorios (Secretaría de Minería de la Nación, 2021).

Objetivos

Para fortalecer el desempeño social de las actividades en los territorios la Secretaría de Minería Argentina propone lineamientos con el fin de contribuir a la maximización de los beneficios y el aprovechamiento por parte de las poblaciones que albergan a los proyectos. Estos lineamientos se fundamentan en que la minería puede y debe realizar un aporte significativo y sostenible a las poblaciones y regiones donde se encuentran los proyectos. Debido a que se trata de una actividad económica basada en la explotación de un recurso no renovable y con tiempo finito de operación, se espera que al finalizar los proyectos las poblaciones hayan tenido la oportunidad de un mejor despliegue de sus capacidades (económico-productivas, socioculturales y político-institucionales) con la consiguiente mejora en su calidad de vida (Secretaría de Minería de la Nación, 2021).

Las iniciativas y estándares sectoriales que buscan orientar las prácticas de las empresas y los gobiernos en esta dirección reconocen que la generación de escenarios territoriales sostenibles no se da de manera espontánea. Se trata de un trabajo que requiere un marco de gobernanza adecuado, en el cual confluyan el diálogo, la planificación y la articulación de esfuerzos en procesos de conformación de escenarios virtuosos de desarrollo en los que participen todos los actores.

Principios de los lineamientos

La implementación de estos lineamientos busca que la gestión social de los territorios mineros contribuya a mejorar las condiciones de las poblaciones, protegiendo sus derechos y promoviendo un desarrollo local integral. El sector público debe liderar la generación de sinergias para consolidar el desarrollo sostenible, trabajando de manera articulada con empresas del sector y las comunidades locales.

Con el propósito de plasmar este modelo de gestión, se propone que los Lineamientos se guíen por los siguientes principios generales (Secretaría de Minería de la Nación, 2021):

- **Solidaridad Transgeneracional:** Maximizar los beneficios socioeconómicos actuales de la minería y proporcionar un legado para las futuras generaciones, siguiendo la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y la Estrategia a Largo Plazo en relación con el cambio climático de Argentina.

- **Enfoque Integral:** Considerar aspectos socio-comunitarios, económicos y ambientales en las políticas mineras, alineándolas con otras políticas locales, provinciales, regionales y nacionales.

- **Desarrollo Equitativo e Inclusivo:** Garantizar la protección de los derechos humanos y el cumplimiento de acuerdos internacionales y normativa nacional y provincial.

- **Creación de Valor Compartido:** Beneficiar a todas las personas respetando y comprometiéndose con la cultura, entorno y visiones de las poblaciones locales.

- **Perspectiva de Género:** Incorporar la perspectiva de género en las políticas sectoriales.

- **Enfoque Basado en Derechos:** Identificar, evaluar y gestionar riesgos e impactos sociales en las decisiones gubernamentales sobre la minería.

Lineamientos específicos según dimensiones estratégicas

Los lineamientos reconocen y priorizan las siguientes dimensiones estratégicas que hacen a la gestión social de la actividad en los territorios:

- Marco Institucional de la Gestión Social
- Gestión de Riesgos e Impactos Sociales
- Acceso a la Información, Participación Ciudadana y Educación Ambiental
- Articulación para el Desarrollo Territorial

Cada dimensión incluye lineamientos sobre temas clave, estrategias, instrumentos y mejores prácticas reconocidas nacional e internacionalmente, adaptables a diferentes tipos de minería y contextos sociales e institucionales de cada provincia. Estos lineamientos sirven como herramienta para sistematizar políticas y acciones gubernamentales orientadas a la gestión social y el desarrollo local.

Estos principios y dimensiones estratégicas aseguran una inserción responsable de la actividad minera, priorizando la sostenibilidad de los territorios involucrados y proporcionando un marco integral para el diseño y planificación de estrategias en conjunto con otros organismos del Estado.

7.5 Conclusiones

En resumen, todas las empresas que realicen actividad minera deben cumplir con una serie de obligaciones legales y ambientales para operar de manera sostenible y legal. La conformidad con estas regulaciones no solo asegura el éxito de los proyectos, sino que también protege el medio ambiente y promueve el bienestar de las comunidades locales.

8. Explotación y tratamientos metalúrgicos

8.1 Introducción

El área de estudio se encuentra actualmente en una etapa de exploración intermedia, lo que implica que aún se requieren numerosos estudios y evaluaciones para determinar su viabilidad como yacimiento explotable. La incertidumbre sobre la factibilidad de la explotación lleva a abordar este capítulo desde una perspectiva teórica, proporcionando una visión general de cómo se podrían explotar los yacimientos de minerales metalíferos, como el cobre y el oro, y los tratamientos metalúrgicos necesarios para su beneficio.

En este capítulo, se describirán brevemente las técnicas de explotación minera y los procesos metalúrgicos aplicables a estos minerales. La intención es ofrecer una comprensión básica de los métodos de extracción y procesamiento que podrían ser relevantes en caso de que el yacimiento demuestre ser viable. Esto incluye tanto las técnicas de minería a cielo abierto como subterránea, así como los procesos de concentración, lixiviación y refinación que permiten la obtención de metales de alta pureza a partir de sus menas.

8.2 Métodos de explotación

8.2.1- Métodos de Explotación a Cielo abierto

Aspectos Generales

Cuando los yacimientos presentan una forma regular y están en la superficie o cerca de ella, se utiliza la extracción a rajo abierto. Este método permite retirar el material estéril a un costo que puede ser absorbido por la explotación de la porción mineralizada. La ventaja de este sistema es que se puede emplear maquinaria de gran tamaño debido al espacio disponible, aunque las operaciones pueden verse limitadas por las condiciones climáticas, especialmente en áreas de alta cordillera.

La elección del método de explotación se basa en decisiones económicas y ambientales, considerando inversiones, costos y beneficios del proyecto, y depende de varios factores del yacimiento, tales como el tipo de mineral, ubicación, tamaño, forma, topografía superficial, profundidad del cuerpo mineral, complejidad y calidad de la mineralización, características del macizo rocoso y calidad de la información de reservas. También se tienen en cuenta las políticas, necesidades y recursos de la empresa que realizará la explotación.

Los yacimientos de cobre y otros metales suelen estar compuestos por minerales oxidados y sulfurados, tanto primarios como secundarios. La tecnología moderna permite que los costos de explotación sean rentables, especialmente para minerales oxidados y sulfurados secundarios. En yacimientos mixtos, los minerales oxidados se encuentran más cerca de la superficie debido a la acción del oxígeno atmosférico.

La minería a cielo abierto utiliza equipos de gran tamaño y capacidad, como palas gigantes que pueden extraer hasta 100 toneladas de mineral por operación y camiones tolva con capacidad superior a 300 toneladas. El mineral extraído varía en tamaño y debe ser fragmentado para adecuarse a los procesos de tratamiento posteriores. En algunos casos, se extrae cobre de antiguos botaderos que aún contienen cantidades explotables de metal debido a métodos de extracción ineficientes utilizados en el pasado.

El objetivo del proceso de extracción es remover la porción mineralizada del macizo rocoso y transportarla a la planta de procesamiento de manera eficiente, segura y ambientalmente

responsable. Para lograrlo, la roca debe ser fragmentada, removida de su posición original, y luego cargada y transportada a sectores de acopio con un tamaño adecuado para los procesos siguientes.

La explotación a rajo abierto requiere datos iniciales obtenidos de campañas de exploración o sondeos, los cuales se procesan para crear un modelo tridimensional de bloques. Cada bloque contiene información relevante, como tipo de roca, leyes del mineral y datos económicos, lo cual es fundamental para planificar la explotación eficiente del yacimiento (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Recuperaciones metalúrgicas

Una vez obtenida la información necesaria, se procede a la etapa de diseño, donde se determinan los límites económicos de la explotación del llamado pit final o rajo final. En esta etapa, también se definen las distintas fases de explotación, estableciendo la secuencia de extracción del yacimiento.

Con los límites económicos del rajo final y las fases de explotación, se debe planificar cómo se extraerán las reservas, lo cual corresponde a la etapa de planificación de la explotación. Esta planificación consta de tres etapas paralelas: corto, mediano y largo plazo, cada una definiendo las actividades de explotación para diferentes periodos de tiempo.

La planificación minera establece las bases para asegurar una operación eficiente y confiable, con criterios de mínimo costo o máximo beneficio. Se define la porción del yacimiento que se explotará según la ley de corte, entendida como el valor mínimo de ley que debe tener una unidad de mineral para que su extracción, procesamiento y comercialización resulten económicamente rentables. Esta ley depende de factores como los costos de extracción y tratamiento, el precio del metal, la recuperación metalúrgica y otros parámetros económicos y técnicos, y permite diferenciar material mineralizado de material considerado estéril (Luz y Nava, 2003).

En la operación de una mina, intervienen varios equipos de trabajo, cuyas acciones deben ser coordinadas para lograr alta eficiencia y seguridad (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006):

- **Geología:** Proporciona información sobre las características físicas, químicas y mineralógicas del material a extraer.
- **Planificación:** Elabora el plan minero considerando todas las variables de geología, operación, mantenimiento, costos y plazos.
- **Operaciones:** Realiza el movimiento del material en la mina mediante perforación, tronadura, carguío y transporte.
- **Mantenimiento:** Asegura la disponibilidad electromecánica de los equipos como perforadoras, palas, camiones y equipos auxiliares.
- **Administración:** Apoya en la gestión de recursos humanos, adquisiciones y contratos.
- **Otros:** Incluyen asesores en seguridad, medio ambiente y calidad, para garantizar el cumplimiento de normas y orientaciones para un trabajo seguro y de calidad.

El material que tiene una ley inferior a la ley de corte se considera estéril si no contiene metales, o mineral de baja ley si tiene metales recuperables a través de otros procesos.

La extracción del mineral, del estéril y del mineral de baja ley sigue una secuencia de operaciones unitarias:

- Perforación
- Tronadura
- Carga
- Transporte

Estas operaciones son apoyadas por exploraciones paralelas a la operación, sistemas de manejo de materiales y servicios de apoyo. El objetivo principal de este proceso es entregar el mineral para su procesamiento en la planta de beneficio.

Límites económicos de una explotación a rajo abierto

Métodos de Determinación de Límites Económicos

Existen varios métodos para definir los límites económicos de un rajo (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006). Los más comunes son:

- **Algoritmo del Cono Móvil Optimizante:** Este método utiliza la teoría de conos flotantes para determinar los límites económicos del rajo. Consiste en una rutina que evalúa la conveniencia de extraer un bloque y su respectiva sobrecarga, aplicando un algoritmo a cada bloque de valor económico positivo y generando un cono invertido. La superficie lateral del cono representa el ángulo de talud. Solo se extrae el cono si el beneficio neto es igual o mayor al beneficio deseado. La desventaja es que genera un óptimo para un solo precio y analiza solo el máximo beneficio sin considerar el perfil de costos en la definición de expansiones.
- **Método de Lerchs-Grossman:** Este método tridimensional permite diseñar la geometría del pit que ofrece la máxima utilidad neta en una "envolvente". Es atractivo porque elimina los procesos de prueba y error de diseñar manualmente el rajo en cada sección. Es conveniente para el procesamiento computacional y permite establecer el costo incremental entre expansiones, facilitando la definición de la secuencia de explotación antes del diseño operacional.
- **Método de la Relación Estéril/Mineral vs Ley Media:** Este método se basa en la ecuación de beneficio: $B = \text{Ingresos} - \text{Costos}$ y asume un beneficio nulo: $B=0$ e $I=C$.

Ley de Corte Crítica

Uno de los principales métodos para definir los límites económicos de explotación de un rajo se basa en un modelo económico de beneficio nulo al extraer la última expansión marginal (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006). (Fig.28).

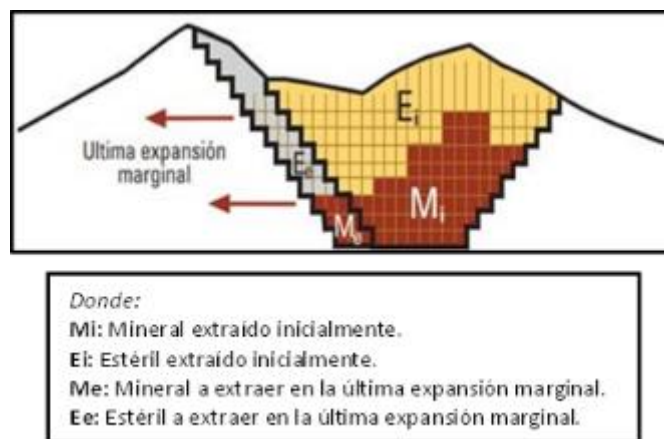


Figura 28: Esquema del modelo económico de beneficio nulo (Panorama Minero, 2006).

Además, se tiene en cuenta: **Beneficio neto = Ingresos – Costos**

Donde:

B: Beneficio neto esperado de la última expansión marginal. **I:** Ingresos por venta del producto.

C: Costos para obtener el producto.

Se sabe que la extracción de Mi generó beneficios mayores que cero y que Me reportará también un beneficio mayor que cero. Lo anterior significaría que Me por sí solo permite la extracción de su estéril asociado Ee así como Mi logró pagar los costos asociados a la extracción de Ei.

Considerando lo anterior se tiene que en la extracción inicial se obtuvo:

$$Bi = Ii - Ci > 0$$

Lo que permitió que el rajo se explote inicialmente con esos límites. Entonces, para explotar la última expansión marginal se debe obtener:

$$Be = Ie - Ce > 0$$

Lo que permitiría ampliar los límites iniciales del rajo. Si, por el contrario, en los cálculos de la última expansión marginal se obtuviera:

$$Be = Ie - Ce < 0$$

Definiría que la última expansión marginal “no se explotará” y el límite de la explotación quedaría definido por la explotación de Mi.

Este modelo permite obtener las líneas finales del rajo en una zona tal que el estéril es pagado única y exclusivamente por el mineral, sin que se produzcan pérdidas ni ganancias, en función de las variables y costos estimados para la futura explotación.

Bajo el concepto de “beneficio nulo”, es decir, que el ingreso que se perciba al explotar un cierto tonelaje de mineral sea igual a su costo de extracción asociado, el balance para una tonelada de mineral (T) que se encuentre expuesta, sin estéril asociado, es el siguiente:

Ingresos por venta = Costos de obtención

$$T * L * RM * PV = T * CE + T * CP + T * (L * RM * CR) L * RM * (PV - CR) = CE + CP$$

L: Ley.

RM: Recuperación total metalúrgica.

PV: Precio de venta de la unidad de la especie de interés. **CR:** Costo de refinería.

CE: Costo de extracción del mineral en la mina.

CP: Costo del proceso del mineral.

CD: Costo de depreciación.

CC: Costo de comercialización.

Esta expresión da origen a la siguiente fórmula para la determinación de la ley de corte crítica:

$$\text{Ley de corte crítica} = (CE+CP) / (RM \times (PV-CC))$$

Se debe tomar en cuenta que tanto el costo mina como el costo planta varían durante la vida de la explotación, ya que la distancia de transporte tanto para el mineral como para el estéril es variable y el tratamiento del mineral en la planta varía dependiendo de las características del mineral que le es alimentado, las cuales pueden variar dependiendo de la profundidad en la cual se encuentre la explotación. Por lo tanto, en ambos casos debe utilizarse la mejor estimación posible, en función del criterio y la experiencia de quien este a cargo del diseño del rajo.

La fórmula inicial para la ley de corte crítica puede expresarse de la siguiente manera al incluir las unidades y en el costo mina considerar el costo de capital:

$$\text{Ley de Corte (\%)} = ((CE + CD) + CP) \times 100 / (2204.6 \times RM/100 \times (PV - CC))$$

En esta expresión se considerarán como costos de “categoría I” los costos en US\$/Ton de material movido relacionados con la extracción del mineral, es decir, los costos mina, que incluyen los siguientes procesos:

Como Costos Directos (CE):

- Perforación.
- Tronadura.
- Carga.
- Transporte.
- Servicios de apoyo mina.
- Administración.

Además, se maneja un Costo de Depreciación (CD). Este costo representa la amortización o desgaste del valor de los activos fijos utilizados en la operación minera, tales como maquinaria, equipos, infraestructura y edificaciones. La depreciación distribuye el costo de estos activos a lo largo de su vida útil estimada, reflejando su pérdida de valor con el tiempo. Incluir el costo de depreciación en la ley de corte es fundamental para asegurar que el proyecto cubra no solo los costos operativos inmediatos, sino también la recuperación de la inversión en activos, garantizando la sustentabilidad financiera a largo plazo.

La suma de estos valores CE + CD conforma la categoría I.

Se consideran como costos de “categoría II” los relacionados con el proceso del mineral (CP) y se expresan en unidades de US\$/Ton de mineral tratado. Además, se incluyen costos administrativos en las mismas unidades. Cabe destacar que la depreciación de las instalaciones de la planta está incluida dentro del costo de proceso.

Se considera como costos de “categoría III” los relacionados con la comercialización del producto (CC), en el cual se incluyen el transporte, seguros, créditos, refinera, etc., y se expresa en unidades de US\$/lb.

El factor 2204.6 proviene de la conversión de toneladas métricas a libras (1 tonelada métrica = 2204.6 libras), necesaria para que los ingresos expresados en US\$/libra de metal puedan ser comparables con los costos que se manejan en US\$/tonelada de material. Esta conversión es habitual en minería metálica, especialmente cuando se trabaja con metales como el cobre, donde el precio se cotiza por libra en los mercados internacionales. Es importante destacar que esta ley de corte crítica representa una condición límite en la que el beneficio neto es igual a cero. No debe confundirse con la ley de corte operativa o simplemente “ley de corte”, la cual puede variar durante la operación en función de diferentes factores económicos, técnicos o estratégicos.

La ley de corte crítica se utiliza principalmente en la planificación de largo plazo, para determinar si ciertos bloques del yacimiento serán parte o no del rajo final. En cambio, la ley de corte operativa puede ajustarse para maximizar el valor presente neto del proyecto, adaptándose a condiciones cambiantes como precios de mercado, costos operativos o políticas de blending.

En otras palabras, la ley de corte crítica define el umbral mínimo de ley bajo el cual el material ya no justifica su procesamiento, mientras que la ley de corte operativa es una herramienta flexible para optimizar el rendimiento económico del yacimiento en un momento dado (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

De este modo se puede resumir la expresión de ley de corte crítica como:

$$\text{Ley de Corte Crítica \%} = \frac{(\text{categoría I} + \text{categoría II}) \times 100}{2.204,6 \times \text{RM}/100 \times (\text{precio} - \text{categoría III})}$$

Aspectos teóricos de planificación

Con los límites económicos del rajo final y las fases de explotación definidas, se procede a planificar la extracción de las reservas, etapa que se divide en tres fases paralelas, cada una correspondiente a diferentes períodos de tiempo:

- Planificación a corto plazo.
- Planificación a mediano plazo.
- Planificación a largo plazo.

La planificación minera establece las bases para asegurar que la explotación sea eficiente y confiable en todas sus operaciones. Esto implica determinar la porción del yacimiento a explotar de acuerdo con la ley de corte, la cual no es necesariamente constante, asegurando así el beneficio económico.

- Períodos de Planificación
- Planificación a corto plazo: días, semanas, meses, trimestres y semestres.
- Planificación a mediano plazo: trimestres, semestres, años y bienios.

- Planificación a largo plazo: años, bienios, 10 años, 15 años o más.

La planificación a corto plazo es la única que puede asignarse un tiempo preciso. En cambio, los horizontes de planificación a mediano y largo plazo dependen de la duración del proyecto, variando significativamente, por ejemplo, entre un proyecto de cuarenta años y uno de cinco años.

La planificación programa la extracción de los recursos según la información disponible en la operación. A medida que se mejora la información, se visualizan detalles más relevantes para la planificación. Por ejemplo, al inicio del proyecto, se cuenta con información estadística obtenida de una campaña de sondeos. Esta información permite dividir el yacimiento en bloques dimensionados, asignándoles leyes, recuperación metalúrgica, tipo de roca, densidad, entre otros datos (modelo de bloques). Posteriormente, en la operación, se perforan estos bloques para tronarlos, obteniendo muestras con valores más reales de la ley de estos.

La información es fundamental en esta etapa, ya que los resultados del período dependerán del cumplimiento de lo programado. En función de este programa, se estudiarán a futuro las variaciones necesarias en la operación para mejorar el sistema (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.2.2- Métodos de Explotación Subterránea

Aspectos generales

Cuando un yacimiento está cubierto por una cantidad significativa de material estéril, que hace inviable su extracción a rajo abierto, se opta por la explotación subterránea. Este método implica la construcción de túneles y labores en la roca para acceder a las zonas mineralizadas y formar una red de niveles para hundimiento, producción y transporte. Las labores subterráneas pueden incluir túneles horizontales, verticales, inclinados, galerías, rampas, piques o chimeneas, que facilitan la fragmentación, carga y transporte del mineral desde el interior de la mina hasta la planta en la superficie.

Para la construcción de túneles y piques, se emplean explosivos que se colocan en perforaciones dispuestas de acuerdo con el diseño geométrico deseado de la excavación. La tronadura se lleva a cabo en forma secuencial, generalmente desde el centro hacia los bordes. Luego de la voladura, se procede a ventilar el área, retirar los escombros y extraer el material fragmentado. Para prevenir desprendimientos, se estabilizan las paredes y el techo mediante fortificaciones apropiadas, cuya elección depende de las características geomecánicas del terreno y del uso proyectado de la labor subterránea (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

En una mina subterránea, se dividen las áreas en:

- **Producción:** Incluye los niveles de transporte, producción, hundimiento, ventilación, piques de traspaso y carguío de mineral.
- **Servicios e Infraestructura:** Comprende accesos principales, piques de transporte de personal, talleres de mantenimiento, redes de agua y electricidad, drenajes, redes contra incendios, oficinas, comedores, baños, policlínicos, bodegas, entre otros.

El método más utilizado en grandes yacimientos subterráneos es el "hundimiento por bloques". Este consiste en provocar el desprendimiento de una porción del macizo rocoso al

socavar la base de una columna mineralizada con explosivos, permitiendo que el resto de la columna se fragmente y desplome por gravedad hacia los puntos de extracción. Los bloques suelen tener dimensiones de entre 100 y 200 metros de altura y un área basal de aproximadamente 60 x 90 metros, con un peso entre 1.000.000 y 2.500.000 toneladas por bloque. Cuando el hundimiento se realiza de manera secuencial en tajadas menores, se conoce como "Hundimiento por Paneles" o "Panel Caving" (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Construcción de una mina subterránea

En una mina subterránea, a diferencia de la explotación a rajo abierto, se extrae el mineral desde abajo hacia arriba, utilizando lo más posible la fuerza de gravedad para producir la fragmentación y el desplazamiento del mineral hacia los puntos de carguío. Además, no se extrae roca estéril, sino que la explotación se concentra preferentemente en las zonas de mineral.

En la minería subterránea existen diversos tipos de excavaciones, las cuales se realizan con distintos fines dependiendo de la función requerida. Las principales excavaciones y estructuras que se utilizan en la explotación subterránea son: túneles, galerías, desquiches, estocadas, rampas, niveles, piques, chimeneas, entre otros (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.3 Procesos de conminución y concentración de minerales

La conminución se refiere a los procesos que reducen el tamaño de los minerales para liberar las especies valiosas que contienen. La tronadura en la mina es el primer paso de conminución, y es crucial disponer de toda la información necesaria para realizar balances de materiales en cada etapa, lo que permite verificar que los equipos operen dentro de los márgenes de diseño y detectar variaciones en parámetros operacionales como la granulometría y el porcentaje de sólidos.

Desde la mina hasta las etapas iniciales de chancado, se opera en seco, pero a partir de la molienda, el proceso se realiza con pulpas. Esto requiere un conocimiento detallado del proceso para llevar a cabo los cálculos necesarios. El mineral extraído de la mina llega con tamaños variados, por lo que el objetivo del chancado, la primera etapa de conminución en la planta es reducir los fragmentos a un tamaño uniforme máximo de ½ pulgada (1,27 cm). Este proceso se realiza con chancadores, equipos mecánico-eléctricos que trituran la roca mediante movimientos de atrición. El mineral es manejado en la planta mediante correas transportadoras hasta su entrega a la siguiente etapa (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.3.1 Procesos de conminución

Chancado

El objetivo de la conminución es reducir el tamaño de las rocas. Sin embargo, no existe un equipo capaz de realizar todo el proceso en una sola etapa para todos los tipos de materiales, lo que obliga a utilizar varias etapas de fragmentación y diferentes equipos. La combinación de chancado y molienda responde a razones técnicas y económicas. Los chancadores son eficientes hasta cierto límite de tamaño; más allá de este, los molinos resultan más efectivos en la reducción de tamaño.

La selección de los equipos adecuados y su disposición en un circuito eficiente es clave para lograr la reducción de tamaño necesaria para el siguiente proceso. La resistencia del mineral a la fragmentación es fundamental, ya que afecta la razón de reducción de tamaño y define el tipo de maquinaria a utilizar. Un material con bajo índice de trabajo es fácilmente fragmentable,

permitiendo una mayor razón de reducción y menos etapas de fragmentación. Por el contrario, un material con un alto índice de trabajo requiere más etapas para alcanzar el tamaño deseado.

La elección del chancador adecuado depende de cuatro factores clave: el tipo de mineral, el tamaño de la alimentación, la capacidad requerida, y las características del producto final. De estos, solo los dos primeros están directamente relacionados con el mineral; los otros dependen de la máquina seleccionada.

Las empresas proveedoras de equipos de chancado suelen contar con laboratorios donde realizan pruebas para definir el comportamiento de sus máquinas con el material en cuestión. Sin embargo, los resultados de estas pruebas dependen de la representatividad de la muestra tomada, lo que justifica la inversión en una correcta toma de muestras para evitar errores costosos.

El rendimiento de un chancador depende de la relación entre la apertura de la cámara de alimentación y la de descarga. Si el material no se reduce al tamaño deseado, se ajusta la abertura de descarga. Si el equipo no logra alcanzar la granulometría requerida, se utiliza otro chancador, lo que lleva a la existencia de varias etapas de chancado: primario, secundario, terciario, y a veces cuaternario (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

El proceso de chancado continúa hasta que se alcanza un punto donde la reducción adicional solo es posible mediante la molienda. Insistir en usar un equipo inapropiado podría ser técnicamente viable, pero no rentable debido a la disminución de capacidad y mayor desgaste. Por lo tanto, la conminución requiere una combinación de chancado y molienda para liberar las especies valiosas de los minerales, alcanzando tamaños de liberación que suelen estar entre 100 y 10 micrones (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Molienda

Después del chancado, la molienda es la siguiente etapa en el proceso de conminución, donde se reduce aún más el tamaño de las partículas del mineral hasta alcanzar una granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm). Este tamaño permite liberar la mayoría de los minerales metálicos como partículas individuales, que luego pueden recuperarse mediante flotación.

La molienda se realiza utilizando grandes molinos cilíndricos que operan bajo tres esquemas principales: molienda convencional, que combina un molino de barras seguido por un molino de bolas; molienda unitaria, que emplea solo un molino de bolas; y molienda SAG (semi-autógena), que utiliza tanto el propio mineral como bolas de acero como medio de molienda. Durante esta etapa, se añade agua al material mineralizado para formar una pulpa, junto con los reactivos necesarios para el proceso de flotación que sigue. La molienda es la fase del proceso de conminución que más energía consume, lo que ha impulsado avances tecnológicos significativos en busca de una mayor eficiencia, especialmente en el diseño de molinos de mayor tamaño capaces de procesar mayores volúmenes de mineral en un solo equipo (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.3.2 Proceso de concentración: flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico que separa los minerales sulfurados del metal valioso del resto de los componentes de la roca original. La pulpa, proveniente de la molienda y ya mezclada con reactivos, se introduce en celdas de flotación donde se agita y se burbujea aire

desde el fondo. Esta agitación permite un contacto eficiente entre las partículas de mineral, el agua, el aire, y los reactivos, facilitando así el proceso de separación.

Los reactivos utilizados en la flotación cumplen diversas funciones:

- **Espumantes:** crean burbujas resistentes.
- **Colectores:** hacen que las partículas de sulfuro se adhieran a las burbujas de aire, separándolas del agua.
- **Depresores:** evitan que minerales no deseados se recojan con los sulfurados.
- **Modificadores de pH:** estabilizan el pH para crear el ambiente óptimo para la flotación.

Las burbujas de aire transportan los minerales sulfurados a la superficie, donde se recolectan y se envían a las etapas siguientes para un mayor refinamiento. Este proceso se repite en varios ciclos, produciendo concentrados cada vez más ricos. Además, en algunos casos, se realiza una segunda flotación con diferentes reactivos para obtener un segundo concentrado de otro metal de interés económico. La primera flotación se denomina flotación colectiva, mientras que la segunda es flotación selectiva.

La flotación involucra tres fases: sólida (materiales a separar), líquida (medio de separación), y gaseosa (aire inyectado para formar burbujas). La efectividad del proceso se basa en las propiedades hidrofílicas (afinidad por el agua) e hidrofóbicas (afinidad por el aire) de los minerales, permitiendo separar las especies valiosas de las gangas o materiales sin valor comercial.

Para cuantificar las propiedades hidrofóbicas de un mineral, se utiliza el ángulo de contacto, que se define como el ángulo formado entre la interfase líquido-gas y el plano del sólido en un punto de contacto trifásico (sólido-líquido-gas). Pocas partículas minerales tienen flotabilidad natural, es decir, la capacidad de formar una unión estable entre burbuja y partícula. Por lo tanto, es necesario utilizar reactivos colectores que cambian las propiedades superficiales de las partículas de hidrofílicas a hidrofóbicas. Además, las partículas deben tener un tamaño adecuado para garantizar la liberación efectiva de las especies minerales (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Actualmente, existen tres tipos principales de celdas de flotación (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006):

- **Mecánicas:** el tipo más común, que utiliza un impulsor mecánico para agitar y dispersar la pulpa.
- **Neumáticas:** no tienen impulsor y usan aire comprimido para agitar y airear la pulpa.
- **Columnas:** caracterizadas por un flujo en contracorriente de burbujas de aire con la pulpa y de burbujas mineralizadas con el agua de lavado.

Los minerales flotantes forman una espuma estable en la parte superior de la celda, de donde se retiran por rebose para formar el concentrado. Los productos de la flotación suelen contener entre 50% y 70% de sólidos. La mayor parte del agua en la pulpa se elimina en los espesadores de concentrado y cola, donde se llevan a cabo los procesos de sedimentación y clarificación. El sólido obtenido de la descarga de los espesadores puede contener entre 50% y 65% de sólidos. El agua restante en estos concentrados espesados se retira mediante filtros, logrando un producto final con un 8% a 10% de humedad, que se utiliza en la siguiente etapa del proceso (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.4 Procesos de extracción (Hidrometalurgia)

Los procesos de extracción de metales mediante métodos fisicoquímicos en fase líquida se denominan "hidrometalúrgicos". Ejemplos comunes de estos procesos incluyen la obtención de cobre mediante lixiviación en pilas, extracción por solventes y electroobtención (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

La hidrometalurgia se desarrolla generalmente en tres etapas:

Lixiviación: Es la primera etapa, donde se disuelven selectivamente los metales de los minerales en una solución acuosa.

Purificación y/o concentración: En esta etapa, se procesan y transforman los metales disueltos en la solución acuosa mediante agentes que permiten su purificación o concentración.

Precipitación: Finalmente, se recuperan selectivamente las especies metálicas disueltas, generando el metal como producto final, ya sea en forma pura o como parte de un compuesto.

Durante la lixiviación (LX), se utilizan agentes lixiviantes que disuelven los metales en la solución acuosa. A veces, es necesario añadir otro agente externo como oxidante o reductor para modificar los potenciales redox y facilitar la disolución del metal. En ciertos casos, se aplican condiciones especiales como presión, vacío o variaciones de temperatura.

La purificación y concentración pueden incluir procesos como la adsorción con carbón activado o la extracción con resinas de intercambio iónico o líquidas (SX). Estos últimos utilizan reactivos líquidos orgánicos disueltos en un diluyente polar.

La precipitación comprende procesos como la cristalización, cementación, y electroobtención (EW) y electro – refinación (ER). En EW, el metal disuelto se precipita desde la solución, mientras que, en la ER, el metal se disuelve en un ánodo y se deposita en un cátodo.

En la hidrometalurgia, las reacciones suelen ser de tipo sólido-líquido, aunque en la extracción por solventes se da un intercambio líquido-líquido entre fases inmiscibles. También se presentan reacciones gas-líquido, como en la oxidación de soluciones con oxígeno gaseoso o la introducción de dióxido de azufre en procesos de reducción. En estos casos, el gas se burbujea o inyecta en la solución y reacciona con los iones metálicos o agentes oxidantes presentes, modificando el estado de oxidación del metal y facilitando su posterior recuperación. Estas reacciones gas-líquido requieren un adecuado control del pH, la temperatura y la transferencia de masa entre fases, y son típicamente heterogéneas (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.4.1 Procesos de lixiviación

Como se mencionó anteriormente, la primera etapa en la hidrometalurgia es la disolución selectiva, conocida comúnmente en minería como lixiviación o LX.

En el caso típico de un yacimiento porfídico de cobre, este se forma a partir de un cuerpo intrusivo con mineralización primaria finamente diseminada de calcopirita (CuFeS_2) y pirita (FeS_2), junto con subproductos como molibdenita (MoS_2), oro en estado nativo (Au^0) y plata, que puede presentarse en estado nativo (Ag^0) o como sulfuro (Ag_2S). La mineralización no solo se encuentra en el intrusivo mineralizante, sino también en las rocas de caja circundantes, producto de procesos hidrotermales que facilitan la diseminación del mineral hacia el entorno del intrusivo (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Este tipo de yacimiento primario es sometido a una intensa transformación durante largos períodos geológicos, medidos en millones de años, debido a fenómenos de óxido-reducción que ocurren en profundidad, bajo condiciones de presión y temperatura significativamente superiores a las ambientales. En las zonas más cercanas a la superficie, en un rango de solo decenas de metros, se desarrollan procesos supergénicos caracterizados por meteorización y oxidación en condiciones cercanas a las ambientales. Estos procesos están condicionados principalmente por la interacción con aguas meteóricas, que contienen oxígeno y sales disueltas, además de la acción catalizadora de bacterias sulfuro- y ferro-oxidantes, lo que promueve la formación de minerales secundarios oxidados (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006). Es importante destacar que estos procesos supergénicos ocurren solo en la zona de intemperismo próxima a la superficie, y su intensidad depende de la exposición del depósito a la atmósfera y la circulación de aguas superficiales y subterráneas.

Durante estas transformaciones, las soluciones ácidas de sulfato de cobre que han agotado su contenido de oxígeno descienden hacia niveles por debajo del nivel freático, donde predominan condiciones reductoras. Allí, reaccionan con sulfuros frescos y minerales primarios como pirita y calcopirita, transformándolos en sulfuros secundarios tales como calcosina y covelina. Este proceso conduce a la formación de una zona de enriquecimiento supergénico, caracterizada por la concentración de sulfuros secundarios de valor económico (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006). La importancia económica de esta zona radica en que el movimiento y concentración de soluciones mineralizadas dependen del flujo de las napas subterráneas, facilitado por fracturamiento y erosión que permiten una adecuada permeabilidad del depósito.

La oxidación posterior de esta zona de enriquecimiento, especialmente cuando el nivel freático desciende y los minerales supergénicos quedan expuestos a un ambiente oxidante, puede generar la formación de minerales oxidados como crisocola, tenorita, brochantita, malaquita y atacamita. Estos minerales se forman a partir de la alteración de los sulfuros secundarios y primarios bajo condiciones oxidantes (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Finalmente, las reacciones del ácido sulfúrico generado durante la oxidación con minerales de ganga, tales como las ortoclasas, contribuyen a la formación de arcillas, que pueden influir en las propiedades físicas y químicas del yacimiento y su comportamiento durante los procesos metalúrgicos.

Para que todos estos procesos supergénicos puedan desarrollarse a lo largo de extensos períodos geológicos, es fundamental que el depósito haya experimentado fracturamiento y erosión significativos, lo que permite la circulación de aguas meteóricas y la permeabilidad necesaria para el desplazamiento de soluciones mineralizadas. De esta manera, se facilita la transformación mineralógica y la concentración secundaria de minerales de interés económico (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Métodos de lixiviación

Los diferentes métodos disponibles hoy en día para llevar a cabo el proceso de lixiviación de minerales deben necesariamente maximizar los beneficios económicos con los menores costos posibles de inversión y operación.

Actualmente, en la mayoría de los casos, los procesos de lixiviación se aplican directamente sobre los minerales mediante un ataque químico. Para mejorar la eficiencia

cinética de estos procesos, se consideran factores como el uso de reactivos, agitación, temperatura y presión, cuando sea necesario. El tiempo también es un factor crítico al seleccionar el método de lixiviación más rentable para un mineral en particular (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Existen diversos métodos de lixiviación, entre los más conocidos se encuentran:

- **Lixiviación in situ:** Consiste en la disolución de los minerales directamente en el yacimiento sin necesidad de extraer el mineral. Se inyectan soluciones lixiviantes en el subsuelo y luego se recupera el metal disuelto.
- **Lixiviación en botaderos:** Se aplica a grandes volúmenes de material de bajo tenor acumulado en botaderos. Las soluciones lixiviantes se aplican en la superficie y percolan disolviendo el metal, que es recuperado en las bases mediante sistemas que recogen y procesan las soluciones cargadas de metal para extraerlo.
- **Lixiviación en pilas:** Similar a la lixiviación en botaderos, pero se utilizan pilas controladas de mineral. Es un método eficiente y común para minerales de cobre y oro, donde las pilas son rociadas con la solución lixivante.
- **Lixiviación en bateas:** En este método, el mineral se coloca en recipientes o bateas, donde se le aplica la solución lixivante. Es un proceso más controlado y suele utilizarse para minerales de alta ley o en procesos de laboratorio.

Al elegir el método de lixiviación más adecuado, es esencial considerar:

- **Valor económico del metal a recuperar:** Esto incluye su ley, calidad, reservas disponibles y precio de venta.
- **Recuperación metalúrgica de cada método:** Evaluar la eficiencia de extracción del metal con cada técnica disponible.
- **Costo de explotación minera y transporte:** Considerar los costos asociados con la extracción del mineral y su traslado a la planta de procesamiento.
- **Costos de los procesos de reducción de tamaño:** Incluye el chancado, molienda, clasificación y pretratamientos como aglomeración y curado.
- **Costos de procesos de concentración y pretratamiento térmico:** Esto puede incluir procesos como flotación, tuesta u otros procesos pirometalúrgicos necesarios.
- **Facilidad de disolución de las especies deseadas y costos de reactivos:** Evaluar la facilidad con la que se disuelven las especies minerales de interés y los costos asociados al uso de reactivos necesarios para la lixiviación. (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Lixiviación química de minerales sulfurados

En los procesos industriales existen dos modalidades para el tratamiento de los minerales sulfurados según su proceso o procedencia de origen (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006):

- A partir de “minerales sulfurados”, la lixiviación puede ser in situ, en botaderos o en pilas. Especial relevancia toma en este punto la lixiviación bacteriana. La particularidad de este procesamiento es que las partículas de mineral a lixiviar son de mayor tamaño, tal como sale de la mina y/o chancado. Son grandes volúmenes y sus leyes son bajas.

- A partir de “concentrados sulfurados”, los cuales son producidos generalmente por chancado, molienda y flotación. Un proceso similar es el de la molienda de matas sulfuradas

enfriadas y molidas después del horno de fusión y antes de la conversión. Todos estos concentrados presentan como características generales estar siempre finamente molidos por debajo de 200 mallas, tener bajo volumen y alta ley. (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.4.2 Procesos de purificación

Los procesos de purificación y concentración en hidrometalurgia son:

- **Adsorción con carbón activado:** es un proceso en el cual ciertos compuestos presentes en una solución se adhieren a la superficie de partículas de carbón activado. Este método aprovecha la alta área superficial y la capacidad de adsorción del carbón activado para purificar soluciones. Es comúnmente utilizado en la industria del oro y en la purificación de agua. Sin embargo, no es un proceso típico para la purificación del cobre, ya que el cobre se trata mediante métodos diferentes.
- **Intercambio iónico con resinas sólidas:** este método se basa en el intercambio de iones entre una solución acuosa y una resina sólida cargada. En este proceso, los iones presentes en la solución se intercambian con iones en la resina, permitiendo la eliminación de impurezas o la recuperación de metales. Aunque este método puede ser útil para tratar soluciones de cobre y en el tratamiento de aguas residuales de la minería del cobre, no es el principal proceso utilizado para la purificación del cobre.
- **Extracción por solventes:** La extracción por solventes es un método ampliamente utilizado en la industria del cobre. En este proceso, el cobre presente en una solución acuosa se disuelve en una fase orgánica utilizando un solvente específico. Posteriormente, el cobre se recupera de la fase orgánica mediante técnicas como la electrólisis. Este método es fundamental para la recuperación eficiente del cobre de soluciones de lixiviación y se emplea extensamente en la minería y procesamiento del cobre para obtener cobre puro. (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.5 Procesos Pirometalúrgicos

8.5.1- Secuencia clásica en la piroextracción de cobre

Aproximadamente el 90% del cobre primario a nivel mundial se extrae de minerales sulfurados, que presentan dificultades para ser procesados mediante métodos hidrometalúrgicos, por lo que se emplean técnicas pirometalúrgicas a partir de sus concentrados. Este proceso se desarrolla a altas temperaturas (1.150-1.300 °C) con el fin de separar el cobre del hierro, azufre y otras impurezas. Las etapas consecutivas de fusión, conversión y refinación permiten incrementar progresivamente la concentración de cobre desde un 30-40% en el concentrado hasta un 99,5% en el ánodo (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

Las etapas de un proceso moderno de fundición incluyen la recepción y manejo de materias primas, secado de concentrados, tostación parcial, alimentación y fusión de concentrados, limpieza de escorias, granallado y preparación del eje de alta ley, conversión, refinación, moldeo de ánodos, y plantas de limpieza de gases. El eje de alta ley es la corriente concentrada de cobre obtenida tras la fusión, que se prepara para la siguiente etapa del proceso. La conversión consiste en la oxidación controlada del azufre y hierro presentes para eliminarlos y obtener cobre más puro. La tostación parcial, aunque opcional y menos utilizada en su forma

tradicional, ha recuperado importancia con los reactores de lecho fluidizado, que son sistemas en los que el material sólido se mantiene en suspensión gracias a un flujo de gas ascendente, lo que genera una mezcla homogénea y mejora la transferencia de masa y calor. Esto permite una reacción más eficiente y controlada durante la tostación de minerales sulfurados, optimizando la oxidación de los sulfuros y reduciendo emisiones contaminantes. Por otro lado, el secado, aunque no se considera una etapa independiente, ha cobrado relevancia en procesos como la fusión flash, que consiste en una fusión rápida a alta temperatura donde el control de humedad del concentrado es fundamental para lograr mayor eficiencia. La pirorefinación, o refinación térmica, ajusta el grado de oxidación del cobre blíster —un cobre intermedio con impurezas y azufre residual— y reduce contaminantes para preparar el material para la electrorrefinación, asegurando ánodos con buena calidad mecánica y química. Entre todas las etapas, la fusión y la conversión son las más importantes, ya que la primera concentra el cobre separando las fases sulfuradas y oxidadas, y la segunda elimina azufre y hierro por oxidación, produciendo cobre relativamente puro. En las últimas décadas, el aumento en el precio de los combustibles incentivó el desarrollo de procesos pirometalúrgicos que combinan fusión y conversión en una sola etapa, aprovechando el calor de la oxidación para fundir el concentrado, mejorar la eficiencia energética y obtener gases efluentes más concentrados y fáciles de tratar. La tecnología convencional para la producción de cobre a partir de concentrados sulfurados se basa en tres etapas principales: la producción de mate (un material fundido con cobre y compuestos residuales) en un horno de fusión; la posterior conversión del mate en convertidores Peirce Smith para obtener cobre blíster; y la refinación en hornos de ánodos, preparando el cobre para la refinación electrolítica posterior (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

8.5.2- Desarrollo de procesos continuos de producción de cobre

La tecnología tradicional para la producción de cobre a partir de concentrados sulfurados consta de tres etapas principales: primero, la obtención de mate —mezcla fundida de cobre, hierro y azufre— en hornos de fusión; luego, el mate se procesa en convertidores Peirce Smith para generar cobre blíster; y finalmente, la refinación en hornos de ánodos prepara el cobre para la etapa final de refinación electrolítica.

A fines de los años cincuenta, este proceso presentaba desventajas importantes: discontinuidad operativa, baja eficiencia energética, emisiones contaminantes con baja y variable concentración de dióxido de azufre en los gases, además de elevados costos de capital y operación en plantas de gran capacidad.

Estas limitaciones, junto con la posibilidad de automatizar completamente los ciclos productivos y aumentar la productividad en las etapas de fusión y conversión, motivaron la búsqueda de métodos más modernos. Entre las innovaciones destacan procesos de fusión autógena flash para concentrados sulfurados, hornos ciclónicos que aprovechan mejor el espacio interior, y la automatización con menores costos, especialmente en la producción de cobre blíster (Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2006).

9. Mercado

9.1 Introducción

El mercado de minerales metalíferos es un componente fundamental de la economía global, con un impacto significativo en diversas industrias, desde la manufactura hasta la tecnología avanzada. Estos minerales no solo son la base de múltiples productos de consumo, sino que también juegan un papel crucial en la infraestructura de las economías modernas. La demanda y oferta de estos recursos están intrínsecamente ligadas a factores económicos, sociales y políticos que determinan su disponibilidad y precio en el mercado global.

A medida que las economías emergentes continúan expandiéndose y las tecnologías avanzadas demandan materiales cada vez más específicos, el mercado de minerales se vuelve más dinámico y complejo. Comprender las fuerzas que impulsan este mercado es importante para cualquier análisis económico dentro del sector minero, permitiendo anticipar tendencias y preparar estrategias que maximicen el valor de estos recursos.

9.2 Visión General del Mercado

El mercado global de minerales metalíferos se caracteriza por su amplitud y diversidad, abarcando desde metales básicos como el cobre y el zinc, hasta metales preciosos como el oro y la plata. Cada uno de estos minerales tiene un mercado único que depende de factores específicos de oferta y demanda.

El cobre, en particular, ha sido uno de los pilares de la industria minera durante siglos. Este metal es esencial para la infraestructura eléctrica y la manufactura de componentes electrónicos, y su importancia ha crecido exponencialmente con la transición hacia energías renovables y la electrificación de vehículos. La demanda de cobre está estrechamente ligada al crecimiento industrial y al desarrollo urbano, especialmente en economías emergentes como China e India, que han sido los mayores consumidores de cobre en las últimas décadas (MiningIR, 2023).

En las últimas dos décadas, la demanda mundial de cobre refinado creció notablemente, pasando de 15,2 millones de toneladas en el año 2000 a 25 millones en 2021, principalmente debido a la industrialización asiática (Comisión Chilena del Cobre, 2024). Para 2024, la demanda alcanzó los 25,7 millones de toneladas, impulsada especialmente por sectores tecnológicos emergentes como vehículos eléctricos, infraestructura energética y automatización (Cochilco, 2024).

Las proyecciones indican que esta demanda continuará aumentando aproximadamente en un millón de toneladas métricas anuales hasta 2035, duplicando el ritmo observado en años anteriores. Este incremento responde principalmente a la expansión tecnológica, la transición energética y el crecimiento en sectores clave como transporte y servicios públicos (BHP, 2024; Rumbo Minero, 2024).

Respecto a los precios, en mayo de 2024, el cobre alcanzó un máximo histórico de 5,20 USD por libra. Las proyecciones futuras sugieren que los precios se mantendrán elevados, entre 4,25 y 4,70 USD por libra en 2025, debido a la alta demanda sostenida y una oferta limitada (Trading Economics, 2025; PrecioOro.com, 2025).

La figura 29 muestra la proyección del uso global de cobre refinado entre 2021 y 2050, desglosado por sectores clave. Se observa un aumento sostenido en la demanda total, que pasa de alrededor de 25 millones de toneladas en 2021 a más de 50 millones en 2050. La mayor parte

del crecimiento corresponde al sector de la transición energética, con incrementos marcados en el uso de cobre para energías renovables (solar, eólica), almacenamiento de baterías, vehículos eléctricos (auto and charging) y transmisión-distribución eléctrica (TyD). También se destaca una importante y creciente proporción atribuida a sectores no energéticos ("Nonenergy transition demand"). (SyP Global, 2022)

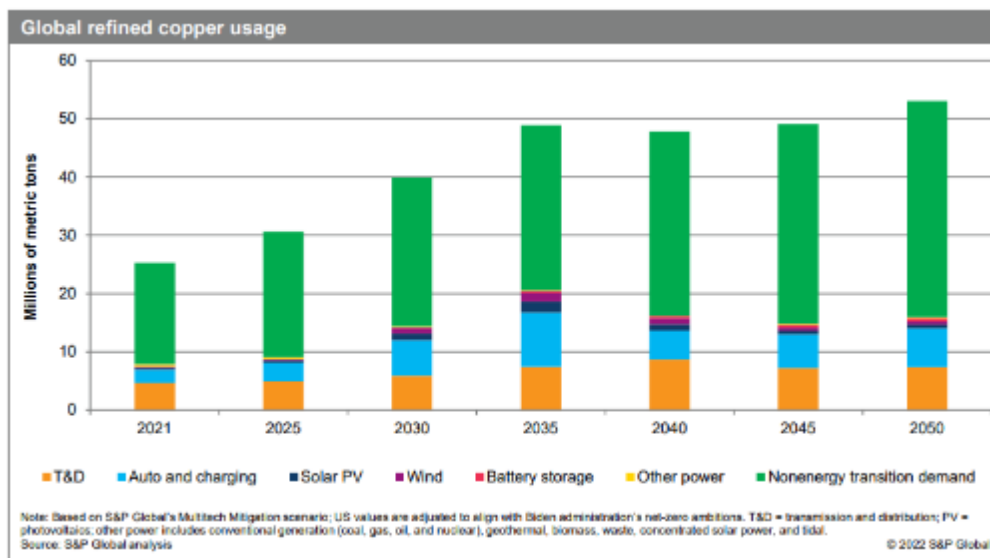


Figura 29: Proyección de la demanda de cobre refinado por sector hasta 2050 (SyP Global, 2022).

9.3 Factores que Afectan el Mercado

El mercado de minerales metalíferos, y en particular el del cobre, está influenciado por una serie de factores que interactúan de manera compleja para determinar su estabilidad y crecimiento. A continuación, se destacan algunos de los factores más relevantes:

- **Factores Económicos Globales**

Durante los períodos de expansión económica, los sectores de construcción y manufactura experimentan un crecimiento que incrementa la demanda de metales como el acero, el aluminio y el cobre. Por ejemplo, el auge en la construcción de infraestructuras y la expansión industrial elevan la necesidad de estos metales para diversas aplicaciones. En contraste, durante las recesiones económicas, la disminución en la actividad económica reduce la demanda de estos materiales, lo que puede llevar a un exceso de oferta y a una caída en los precios. El cobre es especialmente sensible a los ciclos económicos debido a su uso extensivo en sectores industriales clave, como la construcción y la manufactura de equipos electrónicos (Investing News Network, 2025).

- **Innovaciones Tecnológicas**

Las innovaciones tecnológicas determinan la demanda de minerales metalíferos. Un ejemplo destacado es la adopción creciente de vehículos eléctricos (EV), que ha impulsado una demanda significativa de cobre. Este metal es esencial no solo para las baterías de los vehículos eléctricos, sino también para el cableado y otros componentes eléctricos necesarios en estos vehículos. De manera similar, la expansión de tecnologías de energía renovable, como los paneles solares y las turbinas eólicas, está aumentando la demanda de cobre debido a sus excelentes propiedades conductoras. A medida que la tecnología continúa avanzando y la transición hacia una economía más verde se acelera, el cobre está llamado a desempeñar un

papel fundamental. Las expectativas de crecimiento en estos sectores tecnológicos sugieren que la demanda de cobre seguirá siendo robusta, con nuevas aplicaciones tecnológicas impulsando su uso. (IEF, 2023)

- **Políticas Gubernamentales y Geopolítica**

Las políticas gubernamentales y la geopolítica también tienen un impacto significativo en el mercado de minerales. Las políticas de restricción de exportaciones y las tensiones geopolíticas en países productores clave, como Chile y Perú, pueden afectar la estabilidad del suministro global de cobre. Estas políticas pueden crear incertidumbre en el mercado, influyendo en los precios y en la disponibilidad de cobre. Además, las regulaciones ambientales más estrictas en varias regiones están elevando los costos de producción y limitando la expansión de nuevas minas. Las políticas que promueven la sostenibilidad y la protección ambiental están modificando las prácticas mineras y afectando el acceso a ciertos recursos (SyP, 2023).

- **Factores Sociales y Ambientales**

La creciente demanda por prácticas mineras más sostenibles está influyendo en el mercado de minerales metalíferos. La presión para reducir el impacto ambiental de la minería está impulsando la adopción de tecnologías más limpias y la búsqueda de fuentes alternativas de cobre, como depósitos menos convencionales. Las comunidades locales están desempeñando un papel cada vez más activo en la regulación de las operaciones mineras, demandando prácticas más responsables y transparentes. Esta participación puede afectar la producción y el acceso a ciertos recursos, ya que las empresas mineras deben adaptarse a las expectativas sociales y ambientales. La evolución hacia una minería más sostenible no solo impacta los métodos de extracción, sino también la dinámica de oferta y demanda en el mercado de minerales (The Guardian, 2025)

En conjunto, estos factores económicos globales, tecnológicos, políticos, sociales y ambientales crean un entorno dinámico para el mercado de minerales metalíferos. Las empresas mineras deben adaptarse a estas influencias multifacéticas para gestionar riesgos, aprovechar oportunidades y satisfacer las demandas del mercado de manera efectiva.

9.4 Perspectivas Futuras

El futuro del mercado de minerales metalíferos se presenta como prometedor, pero también desafiante, marcado por una alta volatilidad y cambios constantes en la dinámica de oferta y demanda. El crecimiento continuo de las economías emergentes y la transición hacia una economía global más verde impulsarán una demanda elevada para ciertos metales. La electrificación del transporte y la expansión de las energías renovables seguirán siendo motores clave de la demanda, especialmente para metales como el cobre (UNCTAD,2025).

Tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el análisis de big data, están comenzando a ser adoptadas en la minería, lo que promete aumentar la eficiencia y reducir los costos operativos. Estas innovaciones también facilitarán la creación de nuevas demandas y mejorarán los procesos de extracción y procesamiento (CME Group,2025).

A medida que crece la conciencia sobre la sostenibilidad y el impacto ambiental de la minería, se prevé una adopción más amplia de prácticas responsables y una búsqueda de nuevos depósitos en lugares menos convencionales. La exploración en áreas remotas o en el lecho marino, así como el reciclaje de metales, podrían convertirse en tendencias clave. Estas

tendencias reflejan una creciente preocupación por minimizar el impacto ambiental y encontrar alternativas a los métodos de extracción tradicionales (International Copper Association, 2022).

Las fluctuaciones en los precios de los minerales seguirán siendo una constante, impulsadas por la inestabilidad política en regiones mineras, cambios en las políticas gubernamentales y variaciones en la demanda industrial. Los actores del mercado deberán estar preparados para adaptarse rápidamente a estos cambios para maximizar oportunidades y mitigar riesgos.

En particular, el mercado del cobre enfrenta un futuro prometedor pero lleno de desafíos (Fig.30). La demanda global de cobre se espera que aumente en un 3% anual en la próxima década, impulsada por la necesidad de infraestructura eléctrica tanto en economías emergentes como desarrolladas (Investing News Network, 2025). La tendencia de aumento en la demanda, observada desde finales del siglo XX con la industrialización y urbanización de economías emergentes, se ha acompañado de avances en tecnología de extracción que han permitido acceder a depósitos de cobre de menor ley.

A largo plazo, el mercado del cobre continuará su crecimiento, impulsado por el desarrollo de nuevas tecnologías que requieren grandes cantidades de este metal. Sin embargo, el mercado también enfrentará desafíos significativos, como la necesidad de encontrar nuevas fuentes de cobre a medida que los depósitos existentes se agotan y la competencia por recursos en regiones políticamente inestables se intensifica (WRI, 2025).

Esta presión sobre la oferta se ve reflejada en las proyecciones de precios del cobre para los próximos años. Según SyP Global Market Intelligence, se espera que el precio del cobre aumente de forma sostenida desde aproximadamente 8.500 USD por tonelada en 2023 hasta superar los 12.000 USD en 2035, impulsado por un déficit de concentrados y una creciente demanda estructural.

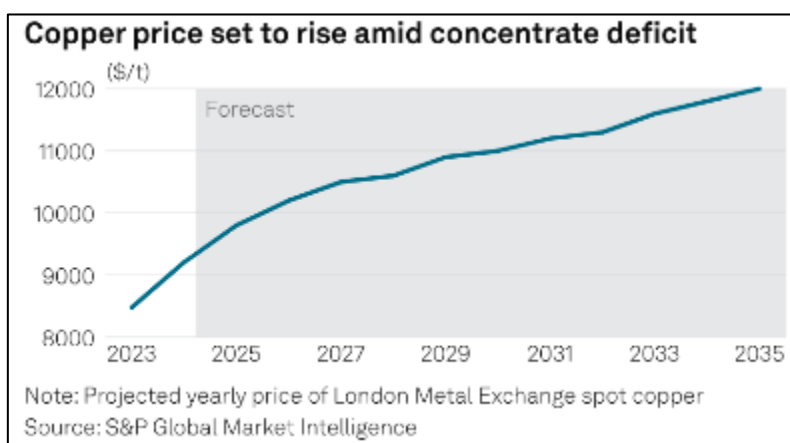


Figura 30: Proyección del precio del cobre según el London Metal Exchange, destacando el aumento sostenido esperado ante el déficit de concentrados (SyP Global Market Intelligence, 2023).

10. Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo permitió llevar a cabo un análisis integral del proyecto Calderón, combinando herramientas de exploración minera en las áreas de mapeo geológico, análisis espectral, geoquímica y geofísica. Esta integración resultó fundamental para identificar y caracterizar zonas con alto potencial mineralizado, sirviendo como base para futuras etapas de exploración.

El análisis espectral, mediante índices específicos y combinaciones de bandas, permitió identificar alteraciones hidrotermales. Se destacaron zonas con alteraciones argílicas avanzadas en el sector este, mientras que en el noreste se identificó la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro asociados a minerales arcillosos. Sin embargo, dado que este método tiene un enfoque regional, sería recomendable complementar estos resultados con un muestreo detallado de superficie y la interpretación de espectrometría en las muestras recolectadas, lo que permitiría validar y refinar las alteraciones identificadas.

En el análisis geoquímico, los mapas de calor de elementos traza como cobre, molibdeno, oro, plata, zinc y plomo identificaron patrones de anomalías consistentes con sistemas minerales de pórfidos y skarn. Las zonas sur, centro-oeste y noroeste se definieron como regiones prioritarias, donde el cobre, el molibdeno y el oro presentaron una fuerte asociación, mientras que el plomo mostró un patrón diferenciado en el skarn, lo que podría indicar una mineralización distinta, posiblemente asociada a un skarn de tipo polimetálico. Para reforzar estos hallazgos, sería importante ampliar la cobertura del muestreo geoquímico en toda el área, con énfasis en el sector este, donde las anomalías espectrales también sugieren un alto potencial.

La geofísica aportó datos complementarios a través de métodos magnéticos y eléctricos. Las anomalías magnéticas sugieren la presencia de intrusiones, mientras que las respuestas de cargabilidad y resistividad (cargabilidad elevada y resistividad reducida, o contrastante) en sectores específicos señalaron zonas favorables para mineralización o alteraciones hidrotermales. Integrar estos resultados con las observaciones geoquímicas y espectrales permitiría una mayor precisión en la delimitación de áreas prioritarias, lo que facilitaría el diseño de campañas de perforación focalizadas en las zonas más prometedoras.

El trabajo incluyó también el análisis de los aspectos legales, ambientales y sociales, fundamentales para asegurar que las actividades de exploración se realicen conforme a la normativa vigente y con un enfoque responsable hacia las comunidades locales. Además, se evaluaron distintos métodos de explotación y tratamientos metalúrgicos, con el fin de determinar las mejores alternativas para el procesamiento del cobre. Por último, se incorporó un análisis del mercado del cobre, que proporcionó una perspectiva sobre su evolución y la demanda futura, permitiendo establecer una evaluación más completa sobre la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

En síntesis, los resultados obtenidos permitieron definir áreas prioritarias para futuras perforaciones y estudios detallados en el proyecto Calderón, proporcionando una comprensión más profunda de los procesos geológicos y del potencial del área de estudio.

11. Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que me acompañaron en la realización de este trabajo.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por estar siempre presente en cada desafío que emprendo. A mis amigos, por su compañía, y aliento en todo momento.

A mi director, por su guía y consejos a lo largo de este proceso.

Y, sobre todo, a Fortescue que me permitió trabajar con sus datos, confiando en mí para llevar adelante este estudio. Su apoyo y la posibilidad de aplicar estos conocimientos en un caso real fueron fundamentales.

A todos los que, de una u otra forma, contribuyeron a que este trabajo fuera posible, muchas gracias.

12. Bibliografía

- Allmendinger, R. W. (1991). Structural geology and tectonics of the Andes. En R. S. Harmon y C. W. Rapela (Eds.), *Andean Magmatism and Its Tectonic Setting* (pp. 1–24). Geological Society of America Special Paper 265.
- Argentina Minera S.A. (2007). *Informe de exploración – Proyecto Calderón-Calderoncito – Temporada 2006/2007* (Informe técnico inédito). San Juan, Argentina.
- Argentina Minera S.A. (2008). *Actualización del Informe de Impacto Ambiental. Etapa de Exploración, Anexo II, Proyecto Calderón – Calderoncito, Departamento Calingasta, Provincia San Juan*. Declaración de Impacto Ambiental emitida por la Dirección de Minería de la Provincia de San Juan.
- Astini, R. A. (2003). El Ordovícico del Sistema de Famatina: una aproximación a su análisis de cuenca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58(1), 51–62.
- Azcurra, A., Gómez, J., y Fernández, M. (2003). *Combinaciones de bandas en teledetección para mapeo de minerales*. Editorial Científica.
- Baldi, B. A., Beresi, M. S., y Bordonaro, O. (1984). El Ordovícico de la Precordillera Argentina. En *9° Congreso Geológico Argentino, Actas* (Vol. 2, pp. 211–226). San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Beigie, C. E. (1981). *The economics of mineral resources*. Studies in Economic Geology. Pergamon Press.
- BHP. (2024, septiembre 30). BHP expects copper demand to grow by 1 mln metric tons a year until 2035. *Reuters*. Recuperado de <https://www.reuters.com/markets/commodities/bhp-expects-copper-demand-grow-by-1-mln-metric-tons-year-until-2035-2024-09-30/>
- Bjerg, E., Linares, E., y Massabie, A. (1990). El Complejo Metamórfico Guarguaráz: Una revisión. *Revista de Geología y Mineralogía*, 42(1), 17–28.
- Cardó, R., Litvak, V. D., y Kay, S. M. (2005). Magmatismo Neógeno en el sector norte de la Precordillera Oriental (30°30'–31°30' L.S.): Petrogénesis y evolución tectónica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(4), 787–802.
- Chuvieco, E. (1995). *Teledetección ambiental: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- CME Group. (2025). *Harnessing AI and Big Data to Enhance Market Data Efficiency*. Chicago, IL: CME Group.
- Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2024). *Informe de tendencias del mercado del cobre. Proyecciones 2024–2025*. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/web/informe-de-tendencias-del-mercado-del-cobre-proyecciones-2024-2025-3/>
- Condie, K. C. (2011). *Geology of the Precambrian and the origin of continents*. Elsevier.
- Congreso de la Nación Argentina. (1995). *Ley N.º 24.585 de Protección Ambiental para la Actividad Minera*.
- Cooke, D. R., Hollings, P., y Champion, D. C. (2014). Porphyry and skarn copper-gold deposits: Characteristics and exploration implications. En *Geology and Exploration of Porphyry Copper Systems* (pp. 105–120). Elsevier.
- Cortés, J. (1992). Lavas basandesíticas en los Andes Centrales. *Revista de Geología y Mineralogía*, 45(2), 103–116.
- Cortés, J., y Kay, S. M. (1994). Redefinición de la Formación Sandalio en la Precordillera. Editorial Universitaria de San Juan.

- Cortés, J., Gómez, J., y Martínez, M. (1997). Estratigrafía de la Formación Sandalio y su relación con la Formación Lomitas Negras. *Revista de Geología de América del Sur*, 8(3), 119–134.
- Cristallini, E. O. (1999). *Estructura y evolución tectónica de la Cordillera Principal en el segmento comprendido entre los 31°00' y 32°00' LS* [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires]. Biblioteca Digital Exactas UBA. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n2911_Cristallini.pdf
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D., y Newberry, R. J. (1981). Skarn deposits. En B. J. Skinner (Ed.), *Economic Geology 75th Anniversary Volume* (pp. 317–391). Society of Economic Geologists.
- ERSDAC. (2002). *Características de los subsistemas de ASTER*. Earth Remote Sensing Data Analysis Center.
- Frenzel, H., Berninger, W., Schaefer, H., y Schlegel, P. (2003). *Espectro electromagnético*. Springer.
- Gandhi, M., y Sarkar, S. (2016). Dispersal and mobility of trace elements in mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 175, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.02.006>
- Giambiagi, L., Bechis, F., García, V. H., y Clark, A. H. (2016). Cenozoic orogenic evolution of the Southern Central Andes (32°–36°S). En G. A. Davis y V. A. Ramos (Eds.), *Andean Tectonics* (pp. 133–151). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00006-7>
- Giambiagi, L., Ramos, V. A., Cristallini, E. O., y Hoke, G. D. (2005). Structural evolution of the Andes at 33°50'S latitude, during the Late Cenozoic: Insights from the Andean retroarc thrust belt in the Cordillera Frontal, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 20(4), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.06.002>
- Gobierno de Chile. (2006). *Manual general de minería y metalurgia*. Ministerio de Minería.
- Goldschmidt, V. M. (1954). *Geochemistry*. Oxford University Press.
- Halley, S. W., Dilles, J. H., y Tosdal, R. M. (2015). Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 110(4), 1051–1070.
- Harris Geospatial Solutions. (2024). *ENVI Raster Color Slice* [Software tool]. L3Harris Geospatial. <https://www.l3harrisgeospatial.com>
- Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. (2006). *Manual de minería y metalurgia*. Santiago, Chile: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- International Copper Association. (2022, febrero). *Copper recycling*. <https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2022/02/ICA-RecyclingBrief-202201-A4-R2.pdf>
- Investing News Network. (2025). *Copper price update: Q1 2025 in review*. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/base-metals-investing/copper-investing/copper-forecast/>
- John Wiley y Sons. (2008). *Handbook of commodity market analysis*.
- Jones, N. W., Kay, S. M., Mpodozis, C., y Litvak, V. D. (2016). Geochemistry and tectonic significance of Miocene volcanic rocks in the southern Central Andes (28°–33°S). *Lithos*, 252–253, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.02.024>
- Kay, S. M., Coira, B., y Viramonte, J. (2005). Young mafic back-arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna Plateau,

- Central Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B12). <https://doi.org/10.1029/2005JB003928>
- Kay, S. M., Godoy, E., y Kurtz, A. (2005). Episodic arc magmatism, tectonic setting, and crustal evolution in the southern central Andes. En *4th International Symposium on Andean Geodynamics* (pp. 367–370). Toulouse.
 - Kay, S. M., y Mpodozis, C. (2002). Magmatism as a prove to the Neogene shallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flat slab. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 39–57. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00005-6)
 - Kay, S. M., Mpodozis, C., y Gardeweg, M. (2005). Magma sources and tectonic setting of Central Andean volcanism. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 39–64.
 - Kay, S. M., Mpodozis, C., Ramos, V. A., y Munizaga, F. (1991). Magma source variations for mid-Tertiary to Quaternary volcanics associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (28° to 33°S). En R. S. Harmon y C. W. Rapela (Eds.), *Andean Magmatism and its Tectonic Setting* (pp. 113–137). Geological Society of America Special Paper 265.
 - Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.). Blackwell Science.
 - Kley, J., y Monaldi, C. R. (1998). Tectonic shortening and crustal thickness in the Central Andes: How good is the correlation? *Geology*, 26(8), 723–726.
 - Kogel, J. E. (Ed.). (2006). *Industrial minerals y rocks: Commodities, markets and uses*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
 - Kokogian, A., y Mancilla, J. (1989). *Caracterización de la cuenca Cuyana*. Editorial del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas.
 - Koukharsky, M. (1966). Formación y características del Grupo Ciénaga del Medio. *Instituto de Geología y Recursos Minerales*, Boletín 127, 1–24.
 - Kozlowski, E. E., Llambías, E. J., y Sato, A. M. (1996). El batolito de Colangüil-Pachón, provincia de San Juan: nuevas edades y su relación con la mineralización. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 51(2), 109–118.
 - Kozlowski, E. E., Ramos, V. A., y Roller, E. O. (1996). *Hoja Geológica 25c, Barreal, provincias de San Juan y Mendoza*. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Boletín 214.
 - Kyser, T. K. (2016). Primary and secondary dispersion of trace elements. *Geology Today*, 32(3), 89–99. <https://doi.org/10.1111/gto.12167>
 - Makshev, V., y Oyarzún, R. (2014). *Geología de la Cordillera de los Andes en Chile: Evolución y tectónica*. Editorial Universitaria de Chile.
 - Mamani, T. (2017). *Aplicación de imágenes ASTER en la detección de zonas de alteraciones hidrotermales, sector Titire, Carumas, Moquegua* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú. 181 pp.
 - Marquetti, C., Garofalo, S., y Menna, M. (2004). Técnicas de análisis espectral. En *Aplicaciones de sensores remotos en geología* (pp. 45–67). Editorial Minera.
 - Martínez, M., Folguera, A., Litvak, V. D., y Giambiagi, L. (2022). Evolución tectono-estructural y magmática del segmento andino entre 30° y 36°S durante el Cenozoico: relación con la geometría de la subducción. *Andean Geology*, 49(3), 493–531. <https://doi.org/10.5027/andgeoV49n3-3394>
 - Meinert, L. D. (1992). Skarn types, their origin and economic significance. *Economic Geology*, 87(6), 1215–1236. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.6.1215>

- Meinert, L. D., Dipple, G. M., y Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits. En *Economic Geology 100th Anniversary Volume* (pp. 299–336). Society of Economic Geologists.
- Mésigos, F. (1953). Estratigrafía de la Formación Hilario. *Instituto Geológico Nacional*, Boletín 122, 1–42.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Ley General del Ambiente (Ley N.º 25.675)*. Recuperado de <http://www.ambiente.gob.ar>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Guía para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental*. Buenos Aires, Argentina.
- Ministerio de Justicia y Derechos Humanos de la Nación Argentina. (n.d.). *Código de Minería de la Nación Argentina*. Recuperado de <http://www.jus.gob.ar>
- MiningIR. (2023, junio 5). *The growing influence of copper in China and India*. <https://miningir.com/the-growing-influence-of-copper-in-china-and-india/>
- MiningIR. (2023). *Global Metal Market Overview*. Recuperado de <https://miningir.com/global-metal-market-overview/>
- Mombrú, J., Fernández, R., y Zúñiga, A. (1981). Estudio tectónico y estructural de la cuenca Cuyana. *Instituto Geológico Nacional*, Boletín 131, 1–54.
- Mpodozis, C., y Kay, S. M. (1990). Provincias magmáticas de la Cordillera de los Andes. *Revista Geológica de Chile*, 17(2), 153–180.
- Mpodozis, C., y Ramos, V. A. (1989). The Andes of Chile and Argentina. En G. E. Ericksen, M. T. Cañas Pinochet, y J. A. Reinemund (Eds.), *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources* (Vol. 11, pp. 59–90). Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources.
- Panorama Minero. (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia*. Santiago de Chile: Panorama Minero.
- Padula, R., López, J., y De Alba, E. (1967). Formación y evolución de los depósitos sedimentarios en la Precordillera. Editorial de la Universidad Nacional de Mendoza.
- Pérez, M., Martínez, S., y Gómez, J. (2007). Espectrometría de reflectancia y aplicaciones en geología. *Geosistemas Editores*.
- Pérez, M., Martínez, S., y Gómez, J. (2010). Espectrometría de reflectancia y aplicaciones en geología. *Geosistemas Editores*.
- Pérez, P. (2001). *Estratigrafía del Terciario en los Andes Centrales*. Editorial de la Universidad Nacional de Mendoza.
- Petsch, S. T. (2014). The role of the carbon cycle in climate change. *Chemical Geology*, 367, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.014>
- Polanski, J. (1963). Estratigrafía, estructuras y evolución de los Andes argentinos (Cuyanos) entre los paralelos 30° y 36°. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 18(3), 251–300.
- Polanski, S. (1958). Basamento Proterozoico en los Andes Centrales. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*, Publicación 132, 1–42.
- PrecioOro.com. (2025). *Precio del cobre por libra hoy*. Recuperado de <https://www.preciooro.com/cobre-libra.html>
- Ramos, V. A. (1988). *Tectónica de los Andes Centrales*. Editorial de la Universidad de Buenos Aires.
- Ramos, V. A. (1999). Cordillera Principal. En R. Caminos (Ed.), *Geología Argentina* (pp. 705–758). SEGEMAR.
- Ramos, V. A. (1999). Las provincias geológicas del territorio argentino. *Anales del SEGEMAR*, 29, 1–75.

- Ramos, V. A., Cristallini, E. O., y Pérez, D. J. (2002). The Pampean flat slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 59–78. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00006-8)
- Ramos, V. A., y Kay, S. M. (1991). Cuenca Cuyana y su evolución tectónica. *Revista de Geología y Ciencias Ambientales*, 9(1), 45–62.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Rodríguez, J. A. (2008). ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. NASA. <http://earthdata.nasa.gov/>
- Rodríguez, R., y Troncoso, L. (2017). *Exploración geofísica aplicada a la minería*. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- Rumbo Minero. (2024). *Demanda de cobre mundial crecerá más de 9 millones de toneladas en próxima década*. Recuperado de <https://www.rumbominero.com/peru/demanda-de-cobre-mundial/?amp=1>
- Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2019). *Guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, Argentina.
- Secretaría de Minería de la Nación. (2021). *Lineamientos para la gestión social de la minería argentina*. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/lineamientos_para_la_gestion_social_de_la_minera_argentina_0.pdf
- Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics* (4th ed.). Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802969>
- SyP Global. (2023, diciembre). *Copper supply chain risks in Latin America*. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/copper-supply-chain-risks-latin-america-2023-12>
- SyP Global Market Intelligence. (2023). Copper price set to rise amid concentrate deficit [Gráfico]. Recuperado de <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/copper-price-set-to-rise-amid-concentrate-deficit-72797421>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>
- The Guardian. (2025, enero 18). *Demand grows for greener mining as copper boom continues*. <https://www.theguardian.com/environment/2025/jan/18/green-mining-copper-demand>
- Tommaso, F., Collins, D., y Vázquez, L. (2005). Combinaciones de bandas para mapeo de minerales. *Revista Internacional de Geociencias*, 22(3), 78–92.
- Trading Economics. (2025). *Cobre - Precios | 1988–2025 Datos*. Recuperado de <https://es.tradingeconomics.com/commodity/copper>
- Turner, S., y Méndez, R. (1975). Ciclo Famatiniano y su influencia en la geología de los Andes. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*, Publicación 155, 1–38.
- UCTAD. (2025). *The Future of Strategic Metals*. Recuperado de <https://unctad.org/future-strategic-metals>
- UNCTAD. (2025). *World copper market trends and forecasts 2025–2035*. United Nations Conference on Trade and Development. <https://unctad.org/webflyer/world-copper-market-trends-2025>

- Zappettini, E. O. (1999). *Mapa Metalogenético de la República Argentina 1:2.500.000*. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Buenos Aires.
- Zappettini, E. O. (1999). *Metalogénesis de la República Argentina*. Anales del SEGEMAR, 35, 1–220.