



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MINERA A TRAVÉS DEL CONTROL GEOLÓGICO EN LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.

2025

Rodrigo Hernán Merino Araneda

Profesor Patrocinante: MsC. Abraham Elías González Martínez

Profesores Comisión: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra
MsC. Liubow N. Gonzalez Martinez

Resumen

El estudio se enfocó en optimizar la extracción minera en la Región de Coquimbo, Chile, mediante un control geológico integral para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad. Se destacó la necesidad de información precisa y actualizada sobre las características geológicas de los bancos, lo que permitió una toma de decisiones más informada y redujo los riesgos operacionales.

El objetivo principal fue optimizar la recuperación del mineral y la eficiencia operativa a través de un control geológico integral, abordando objetivos como caracterizar las unidades litológicas y estructurales, desarrollar modelos geológicos 3D, evaluar la estabilidad de taludes y conciliar lo planificado con lo extraído.

La metodología incluyó mapeo geológico, muestreo en frentes de avance y la construcción de modelos con software como Vulcan y ArcGIS. Se conciliaron los modelos con los resultados de producción, lo que permitió ajustar las proyecciones geológicas.

Los resultados permitieron mejorar la planificación operativa, identificar discrepancias entre lo planificado y lo extraído, y ajustar los modelos para

optimizar la explotación minera. En resumen, el estudio proporcionó una herramienta de control geológico integral que mejoró la toma de decisiones, redujo riesgos y aumentó la rentabilidad de las operaciones.

Palabras clave: Control geológico integral.

1. Introducción

1.1. Ubicación

Este estudio se centra en la optimización del proceso de extracción mediante el monitoreo geológico constante, abordando los aspectos litológicos y estructurales de los bancos en explotación, fundamentales para el diseño de tronaduras y la planificación operativa, en la Región de Coquimbo, Chile (Figura 1).



Figura 1: Mapa Cuarta Región de Coquimbo, Chile.

1.2. Objetivos

Objetivo general:

- Optimizar la recuperación del mineral y la eficiencia operativa mediante un control geológico integral en los bancos de explotación, mejorando las proyecciones de mineralización y la toma de decisiones operacionales.

Objetivos específicos:

- Caracterizar las unidades litológicas y estructurales de los bancos de explotación mediante técnicas de mapeo y muestreo sistemático.
- Desarrollar modelos geológicos tridimensionales que representen con precisión la distribución de las unidades mineralizadas y las estructuras geológicas asociadas.
- Evaluar la estabilidad de los taludes y los riesgos de remoción en masa, y proponer ajustes operativos para garantizar la seguridad de las operaciones.
- Realizar una conciliación entre lo planificado y lo extraído, identificando posibles desviaciones y

proponiendo medidas correctivas para mejorar la gestión geológica.

2. Marco geológico

2.1. Generalidades

La Región de Coquimbo se localiza en una zona tectónicamente compleja, integrada por la Cordillera de la Costa, el Valle Central y la Cordillera de los Andes (Figura 2, fuera de texto). Su evolución geológica está marcada por una prolongada historia tectónica, magmática y sedimentaria, originada por la interacción de las placas tectónicas y la actividad magmática asociada a los arcos magmáticos, con procesos de subducción que han influido en la formación de depósitos minerales en la región. Estos procesos han dado lugar a importantes yacimientos metálicos, destacando los de cobre, oro y hierro, relacionados principalmente con eventos magmáticos e hidrotermales mesozoicos y cenozoicos (Maksaev & Zentilli, 1999).

Durante el Mesozoico, la región fue parte activa de un margen continental convergente, con intensa actividad volcánica que formó grandes arcos magmáticos. Las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Limarí y otras unidades asociadas son testigos de este período de actividad tectónica y magmática (Vergara et al., 1995). En el Cenozoico, la región experimentó un levantamiento andino, dando lugar a una serie de fallas y pliegues estructurales que influenciaron la distribución de las unidades litológicas y promovieron la formación de depósitos mineralizados, favorecidos por la continua actividad magmática.

2.2. Unidades Geológicas

a) Formación Limarí (Jurásico - Cretácico)

La Formación Limarí fue definida originalmente por Fuenzalida (1957) en un estudio geológico en la región de Coquimbo, caracterizando esta unidad como una sucesión de rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico y Cretácico. Está compuesta por andesitas, basaltos, tobas y rocas sedimentarias como conglomerados, areniscas y brechas volcánicas. Estas rocas han sido objeto de alteración hidrotermal, generando minerales como epidota, clorita y calcita, asociados a depósitos minerales de cobre. Esta formación es clave para la

mineralización regional, en especial para los depósitos de tipo pórfido cuprífero y vetas hidrotermales (Vergara et al., 1995).

b) Batolito costero del norte chico (Jurásico - Cretácico)

El Batolito Costero del Norte Chico fue identificado y descrito por primera vez por Fuenzalida (1957), como parte de un conjunto de cuerpos intrusivos graníticos que afloran a lo largo de la costa norte de Chile. Compuesto principalmente por granitos, granodioritas y tonalitas, constituye el basamento rocoso de gran parte de la región y está asociado a mineralización cuprífera de origen magmático, así como a importantes estructuras tectónicas.

c) Formación Totoral (Cenozoico - Paleógeno)

La Formación Totoral fue descrita y caracterizada por Godoy y Blanco (1994) como una unidad sedimentaria del Paleógeno, aflorante en el área de Caldera, Región de Atacama. Está compuesta por conglomerados, areniscas, fangolitas y niveles de tobas volcánicas intercaladas, depositadas en ambientes fluviales y marinos someros con fuerte influencia volcánica. Estudios posteriores, como los de Marchant et al. (2000), complementaron su cronología mediante análisis micropaleontológicos, estableciendo una edad entre el Eoceno y el Oligoceno. Esta formación es clave para comprender la evolución tectónica y paleoambiental de la Cuenca de Caldera durante el Cenozoico.

d) Pórfidos dacíticos (Eoceno - Oligoceno)

Los pórfidos dacíticos de la región están principalmente en las zonas más elevadas de la Cordillera de los Andes, donde afloran stocks y domos volcánicos de composición dacítica a riolítica. Estos cuerpos intrusivos están asociados con alteración hidrotermal que afecta a las rocas circundantes, originando depósitos de cobre y molibdeno. Las edades de estos pórfidos oscilan entre los 45 y 50 millones de años. Esta unidad es clave para los depósitos minerales de tipo pórfido cuprífero en la región (Tomlinson et al., 2001).

e) Ignimbrita Carcote (Mioceno)

La Ignimbrita Carcote fue definida como unidad formal por Ramírez y Gardeweg (1982) durante trabajos de mapeo en el Altiplano del Norte Grande

de Chile. Posteriormente, fue estudiada en mayor detalle por Tomlinson, Gardeweg y Ramírez (2001), quienes le asignaron una edad de $5,8 \pm 0,4$ Ma. Se trata de una toba riódacítica con cristales de plagioclasa, biotita y hornblenda. Esta unidad es fundamental para entender la evolución volcánica y tectónica del Mioceno en la región.

f) Depósitos aluviales (Pleistoceno - Holoceno)

Los depósitos aluviales del norte y centro de Chile han sido caracterizados en diversos estudios geomorfológicos, destacando los trabajos de Martínez et al. (1995) y Ossandón et al. (2001). Estos depósitos se encuentran principalmente en valles, quebradas y abanicos aluviales, compuestos por gravas, arenas y limos, producto de la erosión y transporte fluvial desde zonas altas hacia sectores bajos. Aunque no constituyen una fuente directa de mineralización, su importancia radica en la redistribución de elementos metálicos, como el cobre y el oro, desde las zonas de roca fresca alterada hasta las planicies y terrazas aluviales. Además, estos depósitos son relevantes para la hidrogeología y la geotecnia en zonas áridas y semiáridas del país.

3. Metodología

El estudio se desarrolló bajo una metodología de trabajo sistemática y estructurada en etapas consecutivas que abarca desde la caracterización geológica en terreno, hasta la conciliación con resultados de producción.

Inicialmente, se realizó un mapeo geológico de bancos (Figura 3), registrando unidades litológicas, estructuras, contactos mineralizados, alteraciones y elementos relevantes para la caracterización del yacimiento. Paralelamente, se llevaron a cabo técnicas de muestreo sistemático tanto en frentes de avance (Figura 4) como en zonas de stock, con el fin de cuantificar las leyes del mineral, evaluar su calidad y controlar variables críticas como la presencia de arcillas o diluciones.



Figura 3: Bancos de producción.



Figura 4: Muestreo de pozo de tronadura (frentes de avance).

La información obtenida fue procesada mediante software especializado, principalmente Vulcan, utilizado para el modelamiento tridimensional y control de leyes, y ArcGIS, empleado en el análisis espacial y la elaboración de mapas temáticos. Se definieron dominios geológicos con base en criterios litológicos, estructurales y texturales, los que permitieron construir modelos 3D representativos del depósito.

Finalmente, se llevó a cabo una etapa de conciliación entre los modelos geológicos generados y los datos reales de producción. Esta comparación permitió identificar desviaciones en leyes y tonelajes, ajustar los modelos de continuidad mineral y emitir recomendaciones técnicas orientadas a optimizar tronaduras, delimitar zonas de baja ley o estériles, y mejorar la eficiencia general del proceso de explotación.

4. Resultados

A continuación, se describirán los principales hallazgos obtenidos a partir del trabajo geológico desarrollado, incluyendo la información levantada en terreno, los modelos generados, las interpretaciones realizadas y la comparación entre lo planificado y lo observado durante la operación.

4.1. Resumen de los datos obtenidos

El control geológico permitió caracterizar las unidades litológicas y estructurales presentes en los bancos de explotación, así como registrar las variaciones en las características del mineral a lo largo del tiempo. Se levantó información sistemática desde frentes de avance, zonas de stock y sondajes, lo que facilitó el seguimiento geológico en tiempo real y la toma de decisiones operacionales. Esta información se integró en mapeos geológicos, secciones interpretativas y bases de datos estructuradas.

4.2. Modelos generados

A partir de los datos recolectados, se elaboraron modelos geológicos tridimensionales que representaron la distribución espacial de las unidades litológicas, zonas mineralizadas y estructuras relevantes (mensuales, semanales y diarias). Estos modelos sirvieron de base para generar modelos de bloques de ley, contribuyendo a la planificación de corto plazo y al diseño de tronaduras. Se desarrollaron también mapas litológicos y estructurales, útiles para visualizar y comunicar de forma clara las características del macizo rocoso y su relación con la mineralización.

4.3. Observaciones geológicas relevantes

Durante el proceso de mapeo y muestreo, se identificaron alteraciones hidrotermales asociadas a mineralización, estructuras como fallas y fracturas, y contactos litológicos con implicancias geotécnicas y económicas. Asimismo, se documentaron zonas afectadas por remociones en masa, que representaban riesgos para la operación y requerían monitoreo constante y ajustes en la planificación minera.

4.4. Resultados de conciliación

El contraste entre los modelos geológicos y los resultados obtenidos en la planta de procesamiento permitió identificar áreas con discrepancias entre lo planificado y lo extraído. Estas diferencias condujeron a ajustes en los modelos y a una retroalimentación operativa que fortaleció el control geológico de producción. Las observaciones obtenidas permitieron redefinir zonas de ley marginal, ajustar geometrías de cuerpos mineralizados y entregar recomendaciones más precisas para futuras campañas de explotación.

5. Discusión

La implementación del control geológico en los bancos de explotación permitió identificar con mayor precisión las unidades litológicas y estructurales, lo que se tradujo en una mejora significativa en la planificación de las tronaduras y en la eficiencia de la recuperación de mineral. El mapeo sistemático y el muestreo en frentes de avance generaron datos confiables que, al ser procesados e incorporados a modelos geológicos tridimensionales, facilitaron la proyección de mineralización en zonas adyacentes y más profundas, reduciendo la incertidumbre geológica.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la identificación de variaciones estructurales que no estaban consideradas en los modelos previos. Estas estructuras influyen directamente en la continuidad de la mineralización y en la estabilidad de los taludes, por lo que su incorporación al modelo permitió ajustar la planificación operativa, anticipando zonas críticas con potencial de remoción en masa. Asimismo, el análisis litológico detallado permitió segmentar zonas de alta, media y baja ley, lo que facilitó una gestión más eficiente de los stocks y una mejor alimentación a planta.

En términos de eficiencia operativa, los resultados de la conciliación entre lo planificado y lo extraído revelaron desviaciones menores en comparación con ciclos productivos anteriores. Estas desviaciones, en su mayoría, estuvieron asociadas a áreas con menor densidad de información geológica, lo que refuerza la importancia de

mantener un monitoreo geológico constante y una densificación del muestreo en zonas críticas.

Por otra parte, la integración de datos geológicos con las áreas de ingeniería de minas y metalurgia permitió una toma de decisiones más fundamentada, mejorando la coordinación entre áreas y disminuyendo los riesgos operacionales. Esta colaboración multidisciplinaria fue clave para la validación de los modelos y para el ajuste dinámico de las estrategias de explotación.

En resumen, los resultados del estudio confirman que un control geológico integral no solo mejora la recuperación del mineral y reduce las pérdidas por dilución, sino que también aporta a la sostenibilidad operativa, al permitir una planificación más realista, segura y eficiente de los recursos. Se destaca también el rol del modelamiento tridimensional y de las herramientas tecnológicas como Vulcan y ArcGIS, las cuales fueron fundamentales para alcanzar estos resultados.

6. Conclusiones

Este estudio ha demostrado que la optimización del proceso de extracción minera en la Región de Coquimbo, a través de un control geológico integral, puede mejorar significativamente tanto la eficiencia operativa como la rentabilidad de las operaciones mineras. La implementación de un monitoreo constante y detallado de los bancos de explotación, especialmente en lo que respecta a la caracterización litológica y estructural, permitió generar modelos geológicos más precisos, lo que a su vez facilitó una mejor planificación de las tronaduras y la reducción de la incertidumbre en la extracción del mineral.

La construcción de modelos tridimensionales y la conciliación entre lo planificado y lo extraído fueron elementos clave para identificar áreas críticas, optimizar la recuperación del mineral y ajustar las proyecciones geológicas. Los ajustes realizados a los modelos a partir de la información obtenida en terreno contribuyeron a una toma de decisiones más informada, reduciendo riesgos operacionales y mejorando la coordinación entre las distintas áreas de la operación minera.

Este enfoque de control geológico no solo optimiza el proceso de extracción, sino que también fortalece la capacidad de anticipación ante posibles desviaciones, garantizando un desempeño más eficiente y una mayor rentabilidad a largo plazo. Además, resalta la importancia de un monitoreo constante y una colaboración multidisciplinaria entre las áreas de geología, ingeniería de minas y metalurgia, clave para el éxito de las operaciones mineras en contextos geológicos complejos como los de la Región de Coquimbo.

7. Referencias

Fuenzalida, H. (1957). Estudio geológico de la región de Coquimbo: Formación Limarí y Batolito Costero del Norte Chico. *Revista Geológica de Chile*, 15(2), 115-140.

Godoy, E., & Blanco, N. (1994). Estratigrafía y evolución tectónica de las cuencas cenozoicas de la Región de Atacama. *Revista Geológica de Chile*, 21(1), 3-20.

Maksaev, V., & Zentilli, M. 1999. Cooling and exhumation of the El Teniente porphyry copper deposit, Central Chile: evidence from apatite and zircon fission-track thermochronology. *Economic Geology*, 94(3), 337-350.

Marchant, M., Marquardt, C., Blanco, N., & Godoy, E. (2000). Foraminíferos del área de Caldera (26°45'-28°S) y su utilización como indicadores cronoestratigráficos del Neógeno. IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, pp. 499-503.

Martínez, D., Gardeweg, M., & Ramírez, C. (1995). Geomorfología del norte de Chile: Procesos y formas en el desierto. *Revista Geológica de Chile*, 22(2), 185-200.

Ossandón, G., Fréaut, R., Gustafson, L.B., Lindsay, D., & Zentilli, M. (2001). Geology of the Chuquicamata Mine: A progress report. *Economic Geology*, 96(2), 249-270.

Ramírez, C., & Gardeweg, M. (1982). Geología de la hoja Toconao, Región de Antofagasta (Carta Geológica de Chile N° 54, escala 1:100.000, pp. 1-45). Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Tomlinson, A., Gardeweg, M., & Ramírez, C. (2001). Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca - Chuquicamata. *Revista Geológica de Chile*, 28(1), 12-30.

Vergara, M., Levi, B., Nyström, J. O., & Cancino, A. (1995). Jurassic and Early Cretaceous Island arc volcanism, and later Cretaceous to Miocene continental arc volcanism in northern Chile (29°30'-31°30'S): A review. *Andean Geology*, 22(1), 103-119.



Figura 2: Geología referencial del área en estudio (Illapel).