



**TITULO: “SISTEMA DE CONTROL DE MINERAL EN MINA BAJO DE LA ALUMBRERA, CATAMARCA, ARGENTINA”.**

**AUTORES:**

I. ZAPATA (zapata@xstratacopper.com.ar)  
J. BASSAN (jbassan@xstratacopper.com.ar)  
J. BRUNA NOVILLO (jbruna@xstratacopper.com.ar)

**EMPRESA: MINERA ALUMBRERA LTD.**

**DIRECCION POSTAL:**

HUALFIN, 4139 – OFICINA N° 2 - BELEN, CATAMARCA - ARGENTINA.



## INTRODUCCION

El yacimiento de Bajo de la Alumbreira, está ubicado en el noroeste de Argentina, en el Departamento Belén, Distrito Hualfín de la provincia de Catamarca.

Se encuentra a 400 Km al noroeste de Catamarca capital y a 320 Km al suroeste de San Miguel de Tucumán.

La ruta que posibilita el acceso a la mina, es la Nacional N° 40 que une las localidades de Belén, Los Nacimientos y Santa María.

Aflora en un bajo topográfico, formado por la erosión diferencial de los distintos halos de alteración que componen el depósito. Esta erosión permitió exponer la parte superior del sistema tipo pórfido favorable para su minado. El bajo tiene una superficie de 3.200 m por 2.200 m y una elevación central promedio de 2.550 m.s.n.m. y está enmarcado por rocas de composición Andesítica del Complejo Volcánico Farallón Negro. La intrusión de una serie de pórfidos dacíticos a este complejo, generaron circulación de fluidos hidrotermales a gran escala que alteraron y mineralizaron tanto a las fases intrusivas como a las rocas volcánicas de caja.

Mediante un mapeo detallado (Proffett 1997, 2004), se pudo definir un total de 7 intrusiones separadas, incluyendo fases pre-, sin- y post-mineralización.

Proffett (op. cit.), basándose en relaciones de contactos observadas, define las principales fases intrusivas asociadas con la mineralización:

El Pórfido P2 ó Colorado Norte, es el más antiguo de los pórfidos mineralizados, aflorando del lado este del depósito. Generalmente es el más afectado por la alteración cuarzo-magnetita, quedando escasos relictos de textura primaria.

El Pórfido P3 es la fase intrusiva de mayor representatividad con variaciones texturales, mineralógicas y de alteración. Dentro de esta fase se registra la presencia del Pórfido "ojos de cuarzo", que corta al Pórfido P2 y que es interpretado como parte del stock P3,

debido a la escasez de relaciones de contacto observables entre estos dos pórfidos. El Pórfido "ojos de cuarzo", presenta numerosos fragmentos de vetas de cuarzo rosado, parcialmente reabsorbidas de hasta 15 mm de diámetro.

Diques de pórfidos dacíticos más jóvenes cruzan el bajo, en dirección noroeste y noreste, extendiéndose hacia afuera del pit. Estos diques tardíos, no están mineralizados y presentan una débil alteración sericitica parcial sobre fenocristales de plagioclasas y una cloritización parcial de mafitos.

El yacimiento se encuentra afectado por un importante fallamiento post-mineral, que desplaza litologías, alteraciones y mineralizaciones.

En la parte central y este predominan fallas normales de rumbo norte-noroeste/sur-sureste con fuerte buzamiento hacia el oeste (Falla Ron, Falla de Yeso, Falla 56-50, Falla Colorado norte y sur).

En el sector suroeste se observan fallas normales con dirección noroeste/sureste y moderado buzamiento hacia el noreste (Falla Steve's y SOS).

Se pueden observar 4 tipos de alteración:

Alteración potásica: en los pórfidos se manifiesta generalmente como reemplazo parcial o total de los materiales de la matriz y plagioclasas por feldespatos potásico fino + cuarzo y con biotita secundaria reemplazando principalmente hornblenda. En las andesitas cuando esta alteración es débil a moderada, está caracterizada por desarrollo de biotita secundaria en matriz, y la textura original de la roca aún puede ser observada. Cuando esta alteración es muy intensa se oblitera la fábrica original de la andesita siendo reemplazada masivamente por biotita secundaria.

En general, existe una correlación entre aumento de leyes de cobre-oro con aumento en intensidad de alteración potásica, a excepción en la



parte central donde coincide con el núcleo estéril.

La presencia de este núcleo estéril es común en los sistemas de pórfidos de cobre, debido a la removilización de sulfuros y oro durante sucesivos calentamientos de las partes más profundas del depósito, ocasionados por sucesivos pulsos de magmas. Este núcleo comprende pórfidos P2 y P3 con alteración potásica y cuarzo-magnetita, P3 tardío y diques tardíos.

**Alteración cuarzo-magnetita:** en general está asociada con las fases intrusivas más tempranas. En varios sectores del P2 las leyes de cobre y oro no tienen buena correlación con las concentraciones de magnetita, lo que estaría marcando una etapa inicial de alteración masiva de magnetita que precedió la mineralización. Cuando la mineralización está presente, está siempre asociada a venillas de cuarzo.

**Alteración propilítica:** se encuentra formando un halo alrededor del bajo y está definida principalmente por la presencia de epidoto, clorita, magnetita y carbonatos. Dentro del halo periférico, cuanto más cerca del centro intrusivo, la presencia de epidoto se hace más notoria. La ausencia de venillas de cuarzo asociadas con este tipo de alteración, indica que los fluidos nunca alcanzaron temperaturas significativas o que no intervinieron en cantidades importantes, reflejando un escaso intercambio químico en las andesitas.

**Alteración destructiva de feldespatos:** este término se utiliza para englobar un tipo de alteración que incluye procesos de alteración reconocidos como filicos y/o argílicos. Esta alteración se superpone sobre las asociaciones mineralógicas dadas por la alteración potásica y propilítica, y afecta a todas las fases porfíricas. Generalmente en la parte central del pórfido, la alteración destructiva de feldespatos se superpone débilmente, reemplazando en forma parcial fenocristales de plagioclasas por sericita y los minerales máficos se alteran a clorita. Esta alteración se encuentra acompañada por una venulación de piritita de

potencias diversas con halo filico (sericita y/o clorita, venillas tipo "D"). La mayoría se presenta en un diseño radial alrededor del bajo (según Proffett 2004)

En zonas de fallas, la alteración argílica se hace predominante.

Los sulfuros principales son la calcopirita y piritita, con menor proporción de presencia de calcosina, formando una delgada zona de enriquecimiento que se desarrolló en la parte superior del depósito, reemplazando a calcopirita o recubriendo cristales de piritita en zonas con fuerte lixiviación. La calcopirita es el principal mineral de cobre, y se encuentra diseminada y en venillas de distintos tipos y asociaciones mineralógicas.

El oro principalmente se presenta en granos libres (aproximadamente en un 80%), en inclusiones de granos libres adosados en calcopirita (aproximadamente en un 10%). También se presenta en forma escasa en inclusiones de granos libres en piritita.

La molibdenita es un mineral común pero no económico, presente en la zona externa de mineralización, principalmente en venillas de anhidrita, venillas de cuarzo bandeado, y asociado a fracturas.

La esfalerita y menor galena se encuentran restringidas puntualmente a zonas de fallas (principalmente en falla Steve's y en menor grado en falla Ron). Se presentan en venillas y venas tardías de carbonatos y cuarzo en ocasiones drúsico, con texturas indicativas de relleno de espacios abiertos alojados en fallas.

## **SISTEMA DE CONTROL DE MINERAL**

### **COMO SE DEFINE?**

El Sistema de Control Mineral, se define como los procesos que se realizan en mina, por los cuales se diferencian y caracterizan los materiales volados, en función de variables que puedan incidir directamente en su valor final, desde la óptica del negocio minero (Beneficio Económico, Ley de corte y Dilución).



Esencialmente, el Sistema de Control Mineral establece diferencias entre materiales en la mina, basándose en:

- El contenido metálico de las rocas voladas
- El tipo de roca volada
- El comportamiento de la misma en el triturador y en la planta (Moliendabilidad y recuperación).
- Otras consideraciones geológicas como: alteración, meteorización, estructuras, contenido de yeso, arcillas, etc.

### QUIENES LO HACEN?

Lo realizan geólogos y/o Ingenieros capacitados y entrenados específicamente para ello. Este “entrenamiento específico” consiste en el manejo de un software minero que permita operar con procedimientos pertinentes a la caracterización del material mediante modelos de distintas variables, que ayudan a la toma decisiones a la hora de “rutear”, “asignar” ó “dar” un destino al material volado. De la misma forma, es vital también la conceptualización de los problemas prácticos que surgen en la propia operación minera y, por supuesto, dar respuestas rápidas a los cambios propios de una actividad, por esencia, altamente dinámica y con muchas variables en juego que inciden en el resultado final de la operación y el negocio.

### COMO SE HACE?

A través de una serie de actividades que siguen la siguiente secuencia de trabajo:

1- **DISEÑO:** Ingeniería de Corto Plazo realiza el diseño de malla de perforación, el cual depende del diámetro de perforación y de las características geológicas de la roca (tipo, alteración, dureza, contenido de yeso y estructuras de la misma).

2- **TOPOGRAFIA:** el topógrafo de mina, coloca marcas en el terreno, que se ajustan al plano entregado por el ingeniero, materializando de esta manera, la malla

mediante la utilización de un GPS de alta precisión.

### 3- PERFORACIONES:

Ingeniería de Servicios es la encargada de realizar las perforaciones, ajustándose a las marcas que dejaron los topógrafos, obteniendo pozos de aproximadamente 19 metros.

### 4- MUESTREO:

El personal técnico muestrea los pozos, que luego serán cargados con explosivos para su voladura y posterior minado. La precisión de esta etapa es muy importante, porque hay que “hacerlo bien” la primera vez, ya que no hay una segunda oportunidad. La estandarización de estos procesos permite minimizar los errores que se producen en los procedimientos llevados a cabo en terreno, lográndose de esta manera un mayor margen de confianza en el control de calidad. Deben ser respetados todos los requisitos esenciales que conducen a la obtención de muestras representativas, mediante el empleo de un sistema de muestreo rígido y a la vez sencillo.

El control de calidad forma parte de la rutina diaria de muestreo, y tiene como objetivo principal, respaldar y asegurar la calidad de análisis que realiza el laboratorio de Minera Alumbreira. Para lograr esto, es necesario controlar los trabajos en terreno de recolección y cuarteo, para continuar luego con la preparación y ensayos de muestras tipo “chips” de pozos para voladura. Se recolectan muestras duplicadas que se analizan en el laboratorio de Minera Alumbreira y muestras triplicadas, analizadas por un laboratorio externo con sus correspondientes muestras de control estándares y blancos.

### 5- CUARTEO y ENSAYO:

A partir de la muestra, y su posterior cuarteo, 8-10 Kg de la misma se envían al laboratorio químico de Alumbreira, y unos 300 gr son utilizados por el geólogo de control mineral para su descripción, considerando variables geológicas como tipo de roca, alteración, meteorización, dureza, porcentajes relativos de pirita, magnetita y yeso, codificadas numéricamente,



para su posterior carga en una base de datos por medio del software administrador (acquire). Este proceso se repite para los datos analíticos reportados por laboratorio.

### **QUE ES Y COMO FUNCIONA LA BASE DE DATOS DE GEOLOGIA?**

En la actualidad, existen “software” especializados en Geología e Ingeniería, que permiten que los datos que se generan en el área de campo, se carguen a base de datos administradas por servidores que funcionan como depósitos de información. Estas bases se pueden leer por medio de una computadora y realizar todas las operaciones de interés.

Antiguamente los datos se acumulaban en libros, carpetas, gráficos impresos en papel, en definitiva, una forma de almacenamiento físico y tangible. En la actualidad se dispone, además, de archivos virtuales, permitiendo rapidez y eficacia en la integración y control del manejo del inmenso volumen de datos generados en una empresa.

En Minera Alumbreira la información se guarda en Bases de Datos relacionadas, que específicamente se encuentran en el “Servidor SQL”. Esta información debe ser cargada en forma ordenada, existiendo “software” que permiten este proceso. En lo que respecta al área de Geología de Mina, los datos se procesan por medio de “ACQUIRE DATA MODEL”, programa que permite no solo la carga directa al “Servidor SQL”, sino que controla y administra esta información hacia otros software de interés (MineSight 3D).

Alumbreira desde hace cinco años posee este sistema, en donde el mayor desarrollo de *Acquire* se encuentra en las áreas de Control de Mineral (Geológica y Geoquímica), Exploración (Geológica y Geoquímica), Geotecnia (Geológica), otras todavía requieren de un mayor trabajo para aumentar su potencialidad como lo es el área de Medio Ambiente.

Las bases de datos con las que se trabaja son: Sistema de Control Mineral (MAAOCS), Sistema de Control de Exploración (MAAEXP), Sistema de Control de Agua (MAAMPH2O) y Sistema de Control de Ingeniería Geotécnica (MAACeldasING, MAAPrismasING). Por ejemplo, MAAOCS posee actualmente 202.630 registros, y se generan aproximadamente, entre 50 y 100 datos por día de tipo topográfico, geológico y geoquímico en áreas remotas, pero integrados a la Red de Minera Alumbreira. Es así que la información generada se carga en el servidor (SQL), permitiendo conectarse a otros “software”, para que los datos se procesen según la conveniencia de las diferentes áreas de Mina.

### **QUE INFORMACION SE GENERA Y PROCESA CON LA AYUDA DEL SOFTWARE MINESIGHT-ACQUIRE, Y A QUE AREAS LES SIRVE DE SOPORTE?**

Transformados los datos del servidor para su lectura por el MineSight 3D, por interpolación, se generan modelos de distinto tipo, en función de la variable de interés (cobre total, cobre equivalente, oro, roca, alteración, NAG, ANC, etc.).

En base al contenido metálico (ley de corte) y características geológicas, ambas variables íntimamente ligadas, se asigna la calidad (Estéril, Baja ley, Alta ley, Benigno), determinando cuáles, dónde y cuántos será el destino final del material volado y minado en el *pit* (a planta de concentración ó botaderos). Estos límites de los distintos tipos de material (cortes) son proporcionados a los topógrafos con las coordenadas de cada uno de los vértices, quienes se encargan de materializar la información en el terreno con marcas (banderas y cintas) de distintos colores según la calidad del mismo.

Luego se cargan los límites de voladuras con las calidades de cada polígono al sistema “*Dispatch*”, con los datos de banco, malla, tipo de material y roca, % Cu, gr/tn Au, pH, meteorización,



dureza y valores de NAG. La principal función de este sistema es el de proveer asignaciones óptimas, para los camiones de acarreo en forma automática.

Dentro de los modelos a mencionar se destacan:

- Modelos digitales de terreno.
- Modelo de sólido en 3 D.
- Modelos de distintas variables en 2D y 3D (Cu, Au, Roca, etc.).
- Modelos para geotecnia (estructuras, roca, etc.).
- Modelos para medio ambiente (NAG, ANC y pH).

La información generada les sirve de apoyo a:

Perforaciones: con modelos de litologías, dureza y fallas.

Voladuras: con modelos de alteración, contenido de yeso, rocas y estructuras, para obtener una mejor fragmentación para la excavación y por lo tanto una mayor performance de las palas y una mejor trituración primaria.

Operaciones Mina: indicando el avance de minado, la ubicación de los materiales y sus calidades y la ubicación de metales (tuberías de sondeos con diamantina y de bombeo de agua, triconos, etc), para evitar que los mismos sean enviados al triturador.

Molienda: con modelos de moliendabilidad, RQD y dureza (roca y alteración), para optimizar el proceso de molienda y trituración.

Planta Concentradora: con reportes (previsiones diarias y planes semanales), indicando leyes de Cu y Au, dominios de moliendabilidad, alteraciones, litología y recuperaciones metalúrgicas.

Medio Ambiente: prediciendo e indicando cuando la producción de material estéril, es benigno ó benigno intermedio y planificar de esta manera el destino final para el encapsulamiento y neutralización de botaderos.

## QUE TIPO DE CONTROLES Y REPORTES SE REALIZAN?

Se elaboran curvas de conciliación y control de leyes y

tonelajes de mina y planta concentradora, chequeo en forma conjunta con “*dispatch*” de destinos de materiales, control de campo de asignaciones, control de proporciones de mezclado de materiales (*blending*) para una mejor flotación y recuperación y control de calidad de muestreo, cuarteo y ensayo.

Se preparan planes mensuales y semanales de minado y reportes diarios de mineral enviado y a enviar a planta concentradora, con tonelajes de los dominios de moliendabilidad, leyes de Cobre y Oro, Cobre soluble, pH, dureza, y si el material es fresco, enriquecido ó lixiviado.

El plan semanal se elabora de los polígonos de minado que entrega Ingeniería de Corto Plazo, los cuales se ajustan al presupuesto entregado por Ingeniería de Largo Plazo. En los mismos hay que tener en cuenta la ley de corte, disponibilidad operacional y programas de mantenimiento de planta concentradora y mina. Este plan puede ser cumplido estrictamente o puede sufrir retrasos o modificaciones debido a imprevistos (mecánicos, climáticos, etc.) que alteran la operación de mina y planta concentradora. También este reporte es entregado a planta concentradora con el objeto de informarles la calidad del material que será minado durante la semana, y tomen de esta manera los recaudos necesarios para el tratamiento del mismo.

## IMPORTANCIA EN EL NEGOCIO

Se considera esencial comprender la importancia del proceso, y sus implicancias en los resultados del negocio minero. Todos los procesos, pautas de trabajo, estándares y conciliaciones realizadas por control mineral tienen un fin primordial, que es el de distinguir y separar cuáles rocas tienen o no, beneficio económico y ambiental. Gran parte del proceso se realiza con software mineros (*MineSight 3D* y *Acquire*), los cuáles nos permiten mayor eficiencia y eficacia al momento de establecer la planificación de trabajo en el Corto y Largo Plazo, a su vez la



información que es almacenada en nuestras bases de datos en forma ordenada, nos permite que sean fáciles de auditar a los efectos del negocio geoeconómico.

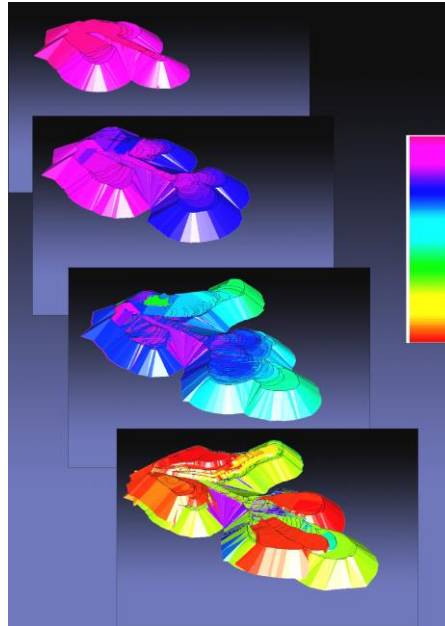
## **BIBLIOGRAFIA**

BROWN, S. (2004): Geología y mineralización del yacimiento de cobre-oro de Bajo de la Alumbreira. Curso Latinoamericano de Metalogenia UNESCO-SEG 2004 - Guía de Campo: 101 - 120.

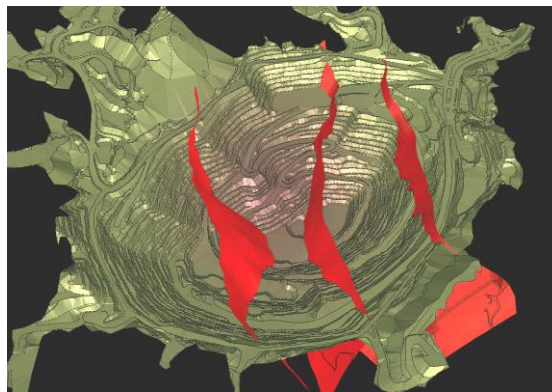
PROFFETT, J. (1997): Geology of the Bajo de la Alumbreira porphyry copper-gold deposit, Catamarca province, Argentina. Unpublished consultand report. Menra Alumbreira Limited, Catamarca, Argentina.

PROFFETT, J. (2004): Geology of the Bajo de la Alumbreira porphyry copper-gold deposit, Argentina. Ec. Geology, 98 (8):1535 - 1574.

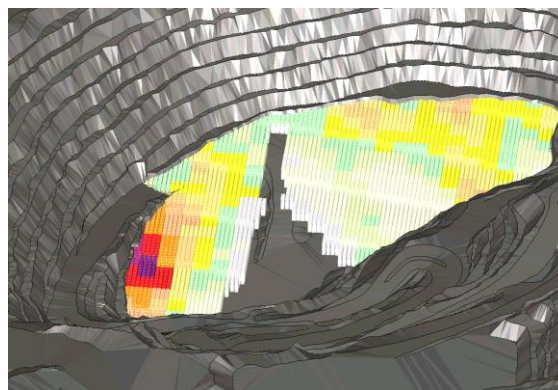
ULLRICH, T.; GUNTER, D. & HEINRICH, C. (2002): The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analisis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbreira, Argentina. Ec. Geology, 97 (8):1889 - 1920



Modelo digital de desarrollo de botaderos



DTM modelo digital del terreno del *open pit* y fallas principales que lo cortan, controlando litología, alteración y mineralización.



Vista tridimensional bloques de 5x5x17 m del modelo de cobre de "blastholes", para un banco determinado dentro del pit.





Secuencia de trabajo detallando el proceso, Control de Mineral.