



Caracterización geometalúrgica en los yacimientos minerales

**Jaime Yagua Padilla, Oscar Molina Galdós, Martin Prado Neira,
Orlando Zevallos Del Carpio, Jesús Cadenas Zarate**

Cía. Minera Antapaccay S.A., Espinar, Cusco, Perú (jaime.yagua@glencore.com.pe, oscar.molina@glencore.com.pe,
Martin.prado@glencore.com.pe, gustavo.zevallos@glencore.com.pe, jesus.cadenas@glencore.com.pe)

1. Introducción

El objetivo es dar a conocer la necesidad de integrar los conocimientos geológicos, metalúrgicos, químicos, y los que sean necesarios, desde las etapas tempranas de la exploración así como durante la explotación de los yacimientos minerales, con el fin de evitar futuros incrementos de gastos ocasionados por correcciones en los procesos de la cadena de valor.

2. Consideraciones geometalúrgicas a tomarse en cuenta

La evolución del conocimiento de un yacimiento mineral va desde la prospección y exploración, evaluación, factibilidad de proyecto; sin embargo, para la etapa de explotación muchas veces nos encontramos con falencia y/o equivocada información para una buena ejecución del proyecto, y se procede a asumirla, inferirla, y hasta a veces inventarla. En el presente artículo, queremos recomendar aspectos a tomarse en cuenta, sobre todo en la etapa de exploración, y trabajar con mayor trazabilidad y predictibilidad en la caracterización geometalúrgica del yacimiento a explotarse.

En las primeras etapas de exploración, el objetivo es dimensionar la magnitud del yacimiento, sus características geológicas, y el modelo geológico conceptual del yacimiento. Aquí muchas veces, sea por razones de presupuesto u otras, se restringe a la zona "a explotarse" y ya se quiere hacer mina sin concluir esta etapa. Esto posteriormente tiene otro costo, en reformular ampliaciones por "haber encontrado nuevos frentes" o

falta de descartes en forma contundente, etc.

Por otro lado, se debe conocer bien la caracterización del mineral desde los inicios, es decir saber qué minerales económicos se tiene, así como qué tipos de gangas, con sus características geometalúrgicas, es decir los factores físico-químicos que intervendrán en la recuperación de los minerales económicos.

La manera de enfocar el tema en la toma de información, y dar solidez a la base de datos, cada vez se centra más en las características de la mena, de la ganga, y de las dos en conjunto, conjugadas con las características geoquímicas de la actual ubicación del yacimiento en el espacio.

Interpretando la manera como se emplazó el yacimiento, se encontrará características que obedecen a fenómenos locales de presión, temperatura, aspectos físico-químicos de roca caja, la intrusión de rocas ígnea, el tiempo geológico durante el cual se produjo el emplazamiento, etc. Son los factores que hicieron que se depositase originariamente el yacimiento y le dieron sus propias características. Todo esto resulta en una parte central rodeada de aureolas de alteración, las que pueden estar bien definidas, sobreimpuestas, o ubicarse según varíen éstas y otras condiciones.

Las propiedades de la mena y ganga se reflejarán entonces en las diferentes etapas de la explotación y tratamiento de minerales: básicamente se trata de procesos de voladura, estabilidad de taludes, y los detalles del tratamiento metalúrgico: chancado, molienda, flotación, y grado de concentrado, hasta llegar a la recuperación del mineral económico.

Es importante investigar la época en que se depositó el yacimiento, para identificar que desde ese entonces hubo otra gama de fenómenos ligados a oxidación-reducción,

hidrataciones, etc., los que a medida en que se acerque el yacimiento a superficie por erosión, se hicieron más conspicuos y, con la presencia de agua y otras soluciones descendentes desde la superficie, hicieron que se tenga

otro tipo de características variantes de las originarias, por lo que se tiene una superposición de alteraciones, lo que se debe interpretar.



Figura 1. Ejemplo de zoneamiento por asociaciones minerales en vista de su tratamiento metalúrgico (mina Tintaya).

Por lo tanto se llama a estas variaciones ubicadas espacialmente “zonas geometalúrgicas” o UGMs. Ellas tendrán diferentes comportamientos en los procesos de explotación y tratamiento de minerales (Fig. 1):

- En forma generalizada, la primera zona es cercana a la superficie. Se la interpreta como el resultado de fenómenos de oxidación-reducción e hidratación, etc. Esta zona supergénica se caracteriza generalmente por una mineralogía propia.
- Una segunda zona se caracteriza a partir de la primera debido a que los factores y procesos que formaron ésta disminuyeron en intensidad hacia abajo. Se denomina esta segunda zona “intermedia” o “mixta”.
- Una tercera zona se caracteriza por la predominancia de aspectos típicos de emplazamiento hipogénico.

Sin embargo, todos los yacimientos no son iguales y para determinar estas UGMs se tiene que tomar en cuenta factores locales, por lo que no se puede generalizar procesos, métodos, etc. A lo mucho se toma en cuenta ciertas generalidades para adecuarlas a cada yacimiento.

Hasta aquí no tendremos problemas mayores, pues todo surge cuando hay que identificar las características de los minerales de mena y ganga, y relacionarlos con los procesos de explotación y geometalurgia.

Para la etapa de explotación, estas características se usan en forma muy generalizada puesto que el objetivo es mayormente de índole geometalúrgica. Sin embargo, es

importante señalar características como la dureza de la roca a la perforación primaria, su resistencia a la rotura en bloques relativamente mayores, su grado de fracturamiento o RQD, su orientación preferencial del fracturamiento, y su relación con fallamientos primario y secundario.

En el presente trabajo se toma como ejemplo el proceso de flotación de sulfuros de Cu, como es lo que se tiene en la mina Antapacay u otras. Para esto se necesita conocer primeramente las características que influirán en la conminución (molienda), es decir todo lo concerniente al estado de cristalización de minerales, los ensambles entre mena y ganga, y la respuesta a la rotura de las partículas, hasta llegar al estado de liberación o separación de la mena de la ganga para que estén en las condiciones de flotación, lo cual se refleja en el *work index* o dureza de mineral. Pero también se debe comprobar el comportamiento de esta ganga que será arrastrada con el mineral económico y que llegará hasta el concentrado, es decir identificar los “insolubles”.

Para la siguiente etapa, la de flotación, se tiene que identificar otro tipo de características y propiedades físico-químicas de la mena y ganga. Unos minerales serán favorables y otros refractarios a la flotación, pero al identificarlos con anticipación se puede optimizar el proceso y/o estudiar el empleo de mejores reactivos y así obtener mejoras en la recuperación de minerales económicos. Para esto tendremos en cuenta el estado de oxidación y/o alteración de la mena y ganga, lo cual

puede resultar de su ocurrencia sea en la zona supergénica, sea en la zona intermedia, sea en la hipogénica.

Uno de los problemas principales que se ven es ¿cómo identificar la mejor manera de cuantificar esta caracterización?, la cual debe ser confiable y sustentable, para ser utilizada en tiempo real. Hay empresas que implementan equipos sofisticados (microscopios electrónicos, DRX, entre otros) cuyos costos de operación y mantenimiento, sumados al tiempo de respuesta, hacen que no siempre se pueden aplicar. Por otro lado, los laboratorios químicos no tienen estandarizadas las marchas analíticas: cada uno tiene sus propios métodos, por lo que al hacer los QA/QC se debe tener mucho

cuidado y trabajar con anticipación a las campañas de análisis químicos y determinar los tipos de análisis para cuantificar estos minerales y sus características. Por ejemplo, la cuantificación y determinación de arcillas, la cuantificación de pirita, pirrotina, sílice libre, fierro, en sus diferentes variaciones, la determinación de minerales de la zona de oxidación y de la zona mixta, como cuprita, cobre nativo, etc., y de la zona hipogénica, diferenciando las sulfosales de los sulfuros, etc. Es aquí donde se toma en cuenta la cristaloquímica y la estereoquímica, es decir las propiedades químicas de la mena-ganga frente a reacciones químicas empleadas para determinar no sólo elementos sino las especies minerales (Fig. 2).



Figura 2. Arriba: Bornita (bn) ocluida en ganga; calcosina (cc) asociado a ganga. Abajo: calcopirita (cpy) asociada en ganga; marcasita (mr) diseminada en ganga.

3. Conclusiones y recomendaciones

Se debe definir bien la zona de alteración supergena, la zona de alteración mixta, y la zona de alteración hipogénica: la mineralogía de mena y ganga resultó de procesos físico-químicos propios de cada una de ellas.

Para la determinación y caracterización de las especies minerales, que sean de alteración u originarias, se debe

definir bien los métodos y tipos de análisis para una buena caracterización, los que deben demostrar su trazabilidad y confiabilidad en una sólida base de datos.

En la etapa de exploración, se tiene que correr pruebas geometalúrgicas, donde se debe interpretar los resultados para identificar las características de la mineralogía que influirán en futuros procesos de explotación y tratamiento geometalúrgico.

Es necesario orientar, desde la etapa de exploración, la toma de datos de las características geometalúrgicas, ya que uno de los objetivos finales del proceso de conocimiento geológico del yacimiento es la recuperación de estos minerales para ponerlos al servicio del ser humano.

Es responsabilidad de la alta dirección el tomar conocimiento de la conceptualización de estos trabajos y no incurrir muchas veces en trabajos incompletos o sesgados generalmente por "falta de presupuestos", que después conllevan a riesgos y gastos innecesarios.

El conocimiento geológico detallado de las especies minerales de ganga y mena, que serán tratadas en procesos de explotación y metalurgia, es la base del comportamiento de las mismas, por lo que los equipos de trabajo entre geología, metalurgia, química, y otras disciplinas siempre deben estar basados sobre una explicación geológica.

En cada etapa del proyecto, es recomendable implementar equipos de trabajo con personal profesional capacitado para el objetivo y con conocimiento del tema, para evitar el famoso "prueba y error".

La caracterización de las UGMs debe ser el resultado de la combinación de propiedades mineralógicas de la ganga y mena, asociada a la interpretación de los resultados de pruebas metalúrgicas de laboratorio.

Debe hacerse el máximo esfuerzo para que las diferentes pruebas metalúrgicas y la definición de UGMs, con todas sus variables y detalles posibles, se realicen antes de la etapa de explotación, puesto que durante la misma se puede dificultar en extremo por cuestiones operativas (por ejemplo, la realización de nuevos sondajes para esclarecer aspectos geometalúrgicos y/u otros).

Referencias

- Maldonado, A.F. 2006. Caracterização das estruturas geológicas e estimativa da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de Tintaya, Peru. Universidade de Brasilia, Instituto de geociencias, Departamento de Geologia, Maestría n° 208.
- Mina Antapacay. 2014. Reportes internos de pruebas geometalúrgicas de plan de minado mensual.
- Yagua, J., Coa, W. 2002. Evaluación geológico-metalúrgica de mineral: sulfuro con alta presencia de cobre nativo. Informe interno, Mina BHP Billiton Tintaya S.A., Tintaya.
- Yagua, J., Coa, W., Gamarra, H. 2002. Estudio de muestras de Chabuca Este-Oeste y Tajo Tintaya para zoneamiento geometalúrgico del yacimiento Tintaya. Informe interno, Mina BHP Billiton Tintaya S.A., Tintaya.