

EL MODELO GEOMETALURGICO

XIV Congreso Peruano de Geología – XIII Congreso Latinoamericano de Geología
29 Setiembre – 3 Octubre 2008

Samuel Canchaya Moya

Compañía de Minas Buenaventura S. A. A. – Lima-Perú

samuel.canchaya@buenaventura.com.pe

INTRODUCCION

Uno de los criterios para hacer bien las cosas es conocer lo que requiere el cliente y para ello el mejor medio es escuchar “la voz del cliente” (“voice of the customer”: VOC). En una operación minera, los principales clientes de los geólogos son los mineros y metalurgistas. Aparte de la ley de cabeza y el tonelaje, sabemos que la preocupación principal de los mineros está en la estabilidad de los taludes, optimizar la voladura, la planificación de minado (de largo y corto plazo) y la selección de mineral (v.gr. primario, secundario, mixto/transicional o desmonte). Por su parte los metalurgistas están preocupados principalmente por el tonelaje procesado (“throughput”), el consumo de ácido, la recuperación, la ley de la solución de cosecha, la ley del concentrado, etc.

Es preferible llamar a la metalurgia extractiva **MINERALURGIA**, ya que eso nos recordará que se trata de procesar **MINERALES** y que los problemas involucrados serán principalmente **MINERALOGICOS** y que por lo tanto se requiere de **ANALISIS MINERALOGICOS** para resolverlos.

No se trata de hacer análisis mineralógicos esporádicos; por el contrario se trata de establecer análisis mineralógicos sistemáticos; de manera similar a como se realizan los análisis químicos: CuT (%), Mo (%), Au (g/t), etc. Pero la caracterización no queda aquí, ya que, como veremos a continuación, es necesario también realizar análisis texturales y físico-mecánicos.

EL CONCEPTO DE ROCA TOTAL

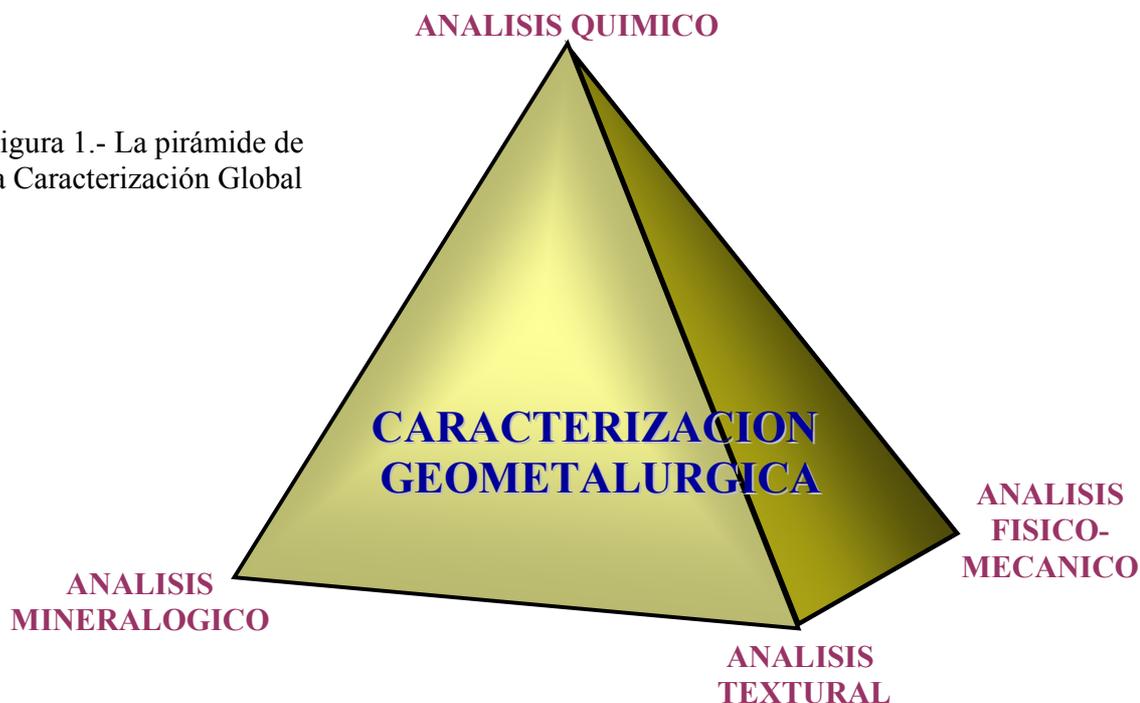
En los yacimientos de baja ley, como los pórfidos de Cu-Mo, las menas sólo llegan a constituir el 1 a 2 % de la roca; el resto son gangas (cuarzo, silicatos, óxidos, oxisales, etc.); la proporción de la mena en un yacimiento de oro diseminado es aún mucho menor. En toda operación minera y de beneficio de mineral (chancado, lixiviación, flotación), las gangas (más del 98% de la roca) son las protagonistas. Problemas como: disminución del “throughput”, resistencia a la conminución (aumento de la carga circulante), consumo de energía, consumo de ácido, disminución de la recuperación, pérdidas metalúrgicas, etc., por lo general tienen que ver mucho más con las gangas que con las menas. Para poner en práctica el entendimiento e importancia de este concepto se requiere implementar sistemas de **caracterización geo-metalúrgica** (químico, mineralógico, textural y físico-mecánico) empleando equipos analíticos modernos, rápidos y de alto rendimiento.

A lo largo de la historia siempre se ha observado un marcado sesgo a estudiar preferentemente las menas, incluso abstrayéndolas de las rocas donde ocurren. Stanton (1972) fue uno de los pocos que estableció claramente que es el hombre y no la naturaleza quien hace diferencias entre las gangas y las menas, lo cual se puede considerar una observación revolucionaria para su época.

La pirámide que se muestra en la figura 1 trata de mostrar gráficamente la importancia de los cuatro tipos principales de análisis; también podríamos imaginarnos que se trata de una mesa donde cada tipo de

análisis es una pata; es obvio que podría faltar un tipo de análisis, pero de ninguna manera dos; aunque lo ideal es una caracterización completa.

Figura 1.- La pirámide de la Caracterización Global

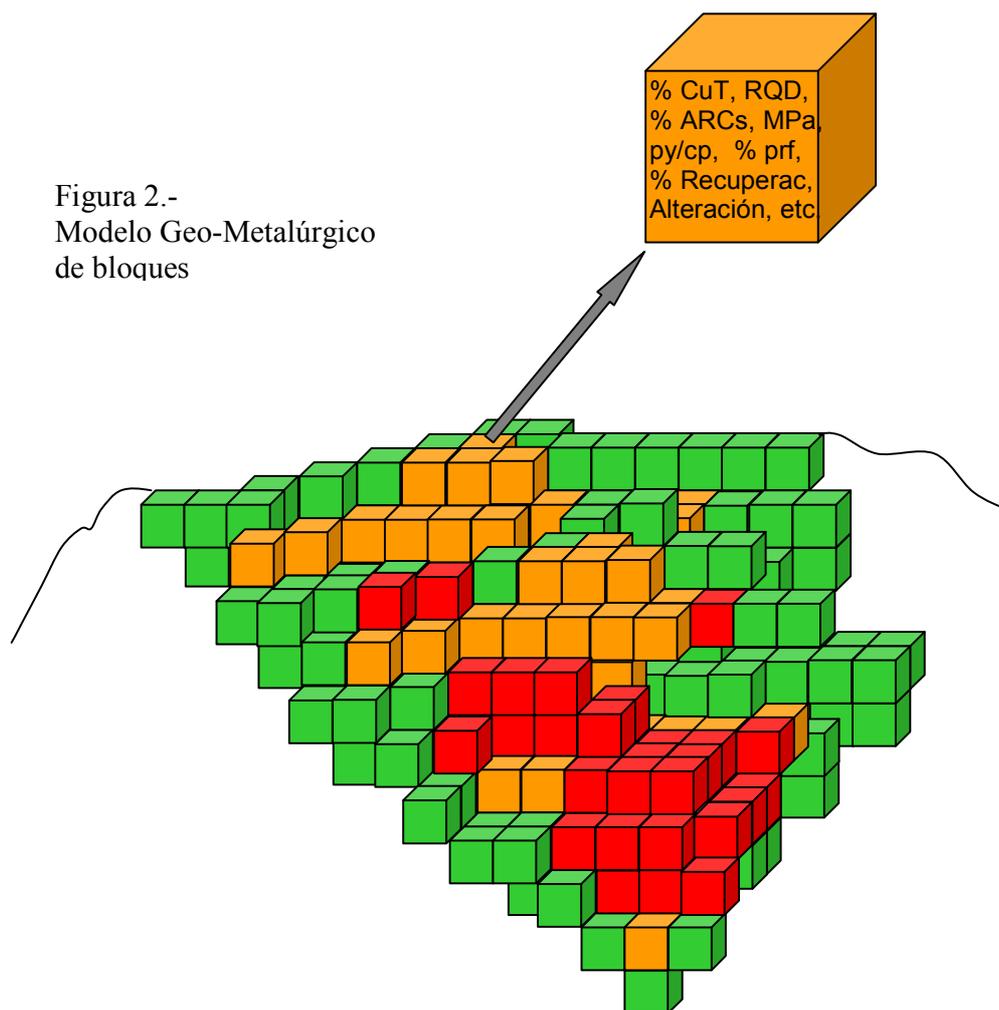


Para explicar este concepto en forma más clara vamos a suponer que tenemos una roca con alta ley de Cu (*análisis químico*). Para poder escoger el método de beneficio (lixiviación, flotación) más adecuado necesitamos saber cuál es el mineral o minerales que aportan este cobre (*análisis mineralógico*). Suponiendo que se tiene casi pura calcosita (el sulfuro secundario de Cu de más alta lixiviabilidad) es obvio que el método ideal sería la lixiviación; sin embargo si la calcocita se encuentra mayormente encapsulada en el cuarzo (*análisis textural*) la recuperación será mínima. Por otro lado suponiendo que la calcosita está libre, pero la proporción de minerales consumidores de ácido: carbonatos, cloritas, biotita, arcillas, etc. (*análisis mineralógico*) es alta, entonces el consumo de ácido será muy alto (y quizás no sea rentable este tipo de ensamble mineral) ya que además la recuperación disminuirá sensiblemente. Otra característica gravitante es la resistencia mecánica de la roca, la cual es bien caracterizada por la carga puntual medida en trozos de testigos de perforación, con el único requisito de estar libre de fracturas (“roca intacta”); los resultados en MPa (megapascales) son de mucha utilidad para la clasificación geomecánica de la roca, pero además para predecir el comportamiento de la roca durante los procesos de conminución (chancado secundario y terciario).

Los minerales que afectan sensiblemente el proceso de beneficio mineralúrgico son las denominadas **variables mineralógicas críticas**, que para el caso de la Lixiviación generalmente son los carbonatos, arcillas, consumidores de ácido, etc.; mientras que para la Flotación son las arcillas, la pirofilita, los minerales de As, etc. La ocurrencia de estos minerales es variable en cada tipo de yacimiento, e incluso dentro de cada yacimiento; por lo que se debe estudiar su impacto en el proceso de beneficio a través de pruebas metalúrgicas específicas.

Una vez que las variables mineralógicas críticas, o alguna combinación de éstas, ya se hayan modelado metalúrgicamente, entonces se deberá realizar el **análisis mineralógico sistemático (AMS)**, banco por banco, preferiblemente siguiendo la secuencia de minado programada por años, con lo cual se estará implementando lo que se denomina: **modelo geo-metalúrgico**. La figura 2 muestra un modelo geo-metalúrgico hipotético, que está constituido por un arreglo de bloques cúbicos que cubren toda la extensión económica del yacimiento, clasificándolo en bloques muy rentables (rojo), moderadamente rentables (naranja) y de baja rentabilidad (verde). La rentabilidad de cada bloque se debe calcular no sólo en base a la ley (como se hace en los modelos geológicos tradicionales) sino ésta se debe reajustar considerando la recuperación y los sucesivos reajustes por costos adicionales como:

- Consumo de energía (por la presencia de ensambles minerales de alta competencia mecánica: cuarzo-turmalina-etc.)
- Consumo de ácido (por la alta concentración de minerales consumidores de ácido: biotita, cloritas, carbonatos, etc.)
- Disminución de la recuperación por la presencia de altos porcentajes de arcillas
- Disminución de la ley del concentrado de molibdeno por su contaminación con pirofilita (filosilicato de flotabilidad natural),
- Etc.



Este tipo de modelos también permite evaluar en forma separada cualquiera de las variables que están registradas en cada bloque. Por ejemplo podemos modelar las arcillas para poder conocer la distribución de éstas, facilitando así la mezcla (“blending”) de las zonas altas en arcillas con las bajas en arcillas; disminuyendo así los temibles efectos y perturbaciones que estos minerales producen en cualquier circuito de beneficio: “caking” (con poca humedad se forman masas de recubrimiento de “chutes”, zarandas, etc.), formación de aniegos o charcos en las pilas de lixiviación (impermeabilización), pérdida de la ley de Cu en la solución de cosecha (absorción y subsiguiente intercambio iónico del Cu con posiciones atómicas de la estructura de las esmectitas), etc.

PROCEDIMIENTO

La implementación del modelo Geometalúrgico se realiza en tres etapas:

1. Caracterización mineralógica piloto.- Los objetivos de esta etapa son:
 - a. Caracterización geo-metalúrgica de zonas representativas del yacimiento.
 - b. Identificación de los minerales críticos e indeseables, principalmente desde el punto de vista del tratamiento metalúrgico.
 - c. Determinar la densidad de muestreo óptima (por geoestadística) de los minerales críticos para la implementación del Análisis Mineralógico Secuencial (AMS).
2. Modelamiento metalúrgico de las variables críticas.- En esta etapa se debe diseñar y realizar pruebas metalúrgicas para definir el comportamiento de las menas y gangas críticas; así como definir los límites de especificación de los minerales críticos y su modelamiento. Esta etapa deberá ser realizada por los metalurgistas con muestras compósito escogidas por los geólogos, en base a los resultados de la caracterización mineralógica piloto. Se trata de encontrar relaciones entre las variables de entrada X_i (mineralógicas) con las de salida Y_i (metalúrgicas): $Y_i = f(X_i)$.
3. Análisis Mineralógico Sistemático (AMS) para la implementación del Modelo Geometalúrgico.- Cuando se tenga plenamente identificados y modelados a los minerales críticos o sus combinaciones (v.gr. ratios), se realizará el análisis sistemático de los mismos (AMS), compósito por compósito, para alimentar estos datos al modelo geológico tradicional (basado en: leyes, alteración y litología) para implementar así el Modelo Geometalúrgico.

Tanto para la caracterización mineralógica piloto, como para el AMS se requiere de equipos analíticos de alta “performance” (rápidos, exactos y precisos). Los análisis mineralógicos (ver ejemplos de la figura 3) se realizan con difractómetros de rayos-X (mineralogía “bulk”) empleando refinamientos de Rietvel; sin embargo las arcillas, especialmente las esmectíticas, se tienen que analizar con espectrómetros de infrarrojo cercano (NIR) calibrados por el método “Cathode Exchange Capacity” (CEC). Los análisis texturales se realizan tradicionalmente con microscopía óptica, provistos de contadores automáticos, o en forma más eficiente, a través de equipos que combinan la microscopía electrónica con detectores EDS (Fennel et al. 2005). En nuestro País ya hay laboratorios implementados con este tipo de equipos modernos.

La importancia del análisis textural está claramente explicada en las figuras 4 y 5. Dos rocas A y B de la misma composición mineralógica tienen diferentes respuestas mecánicas, dependiendo de la forma de ocurrencia de la sericita (un mineral blando o mecánicamente incompetente); la roca A será muy difícil de fragmentar; por el contrario la roca B podría ser disgregada aún con las manos (figura 4).

Figura 3a.- Análisis mineralógico “bulk” de sulfuros

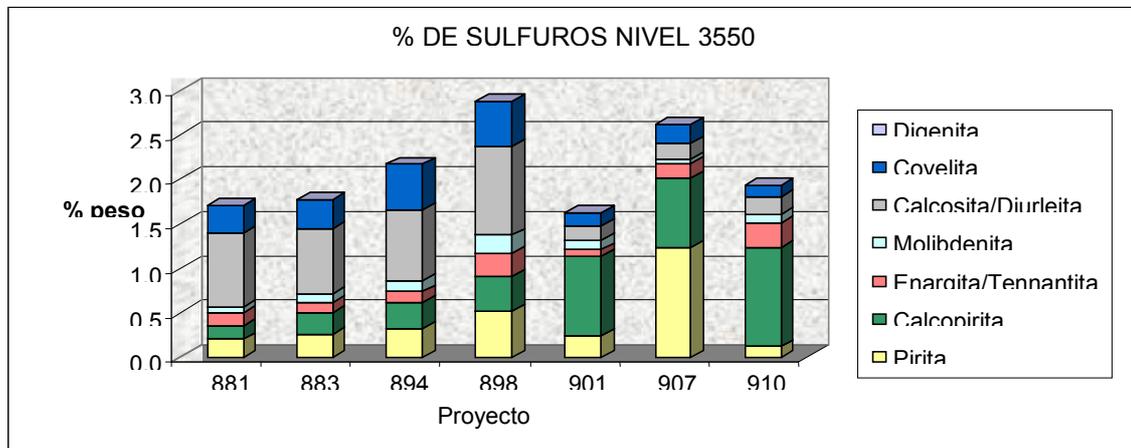
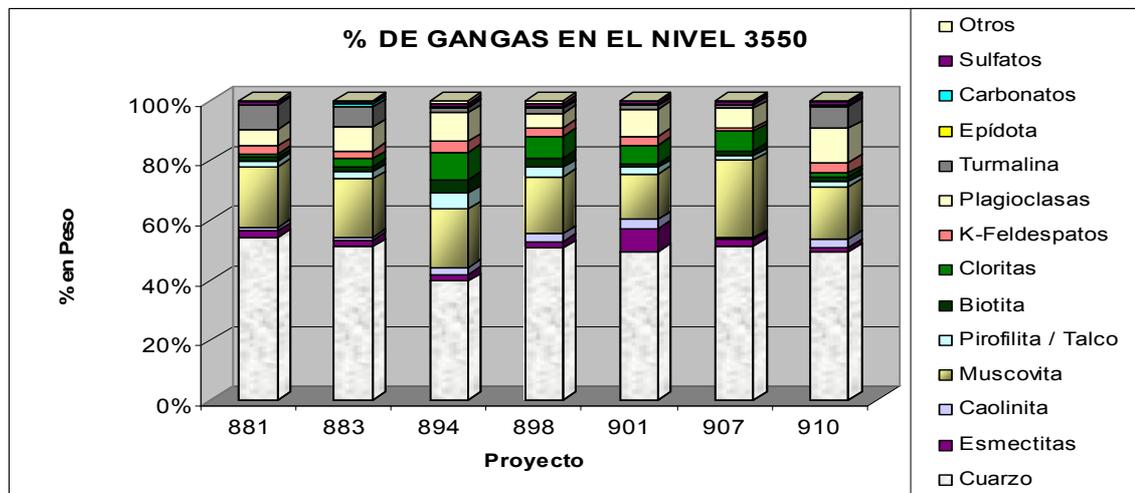


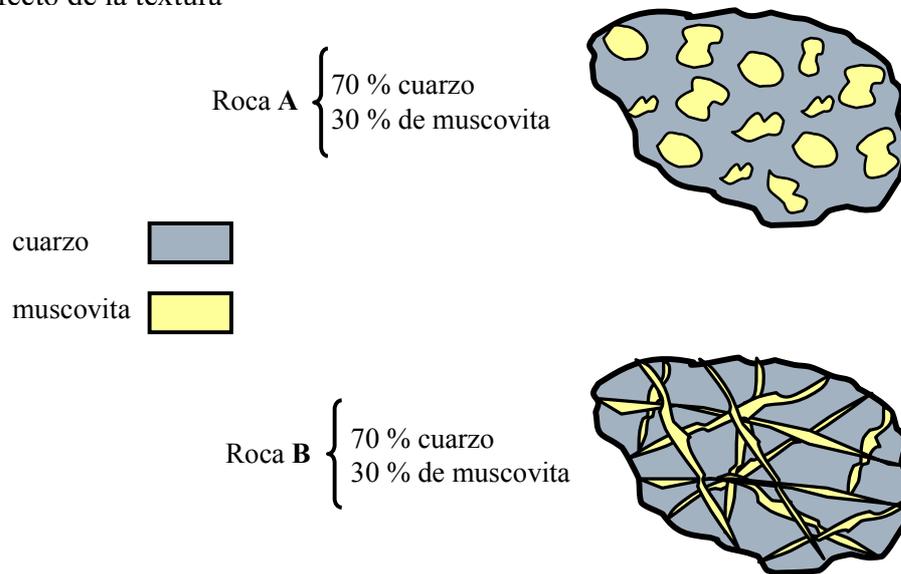
Figura 3b.- Análisis mineralógico “bulk” de gangas



Del mismo modo es muy importante conocer los tipos y abundancia de los intercrecimientos de partículas en materiales pulverizados; para lo cual se cuenta actualmente con equipos modernos que a partir de análisis microquímicos sistemáticos determinan el porcentaje de cada tipo de intercrecimiento, información muy apreciada para optimizar los procesos metalúrgicos de flotación y lixiviación (Fennel et al. 2005).

Los términos y conceptos: Roca total, Caracterización Geometalúrgica y Análisis Mineralógico Secuencial (AMS), en la forma y alcances en que han sido definidos en el presente trabajo, son de autoría y responsabilidad del suscrito; sin embargo su aplicación a casos particulares es de exclusiva responsabilidad de cada quien.

Figura 4.- El efecto de la textura



Libre	Mixto simple	Mixto complejo

Figura 5.- Mapa de partículas Microscópicas mostrando los tipos de intercrecimientos de minerales representados por falso color.

calcosita rojo
pirita amarillo
muscovita gris
turmalina pardo
cloritas verde
feldespatos celeste

REFERENCIAS

Stanton, R. L. 1972. Ore Petrology. McGraw Hill, Inc. 285 p.

Fennel, M., Guevara, J., Canchaya, S., Velarde, G., Baum, W. & Gottlieb, P. 2005. Qemscan Mineral Analysis for Ore Characterization and Plant Support at Cerro Verde.- XXVII Convención Minera; Arequipa-Perú; 11p.