

¿RECURSOS GEOLÓGICOS Ó RESERVAS MINERAS?

Mario E. Rossi
GeoSystems International
479 Cascadita Terrace
Milpitas, California, 95035
USA
mrossi@geosvsint.com

RESUMEN

La evaluación económica de un proyecto minero requiere un cálculo de las toneladas y leyes de los recursos disponibles en la forma de un modelo de bloques. Éste deber ser representativo de la mineralización a ser extraída durante la operación minera para períodos de extracción predefinidos y dentro de un margen de error aceptable.

Existe siempre un grado de incertidumbre en esta estimación de recursos, que a veces es significativo y es causado por diversos factores. Estos incluyen calidad y cantidad de la información de perforaciones disponible; calidad y cantidad de información geológica recopilada; métodos de estimación de leyes utilizados; estimaciones de diluciones y/o factores de recuperación minera; etc.

Uno de los factores decisivos en la minimización de esta incertidumbre es la decisión conceptual (y sus consecuencias prácticas) de:

- a) intentar estimar correctamente la geología in-situ, o bien
- b) intentar estimar las toneladas y leyes a ser alimentadas por la futura mina a la planta de procesamiento.

Esta diferencia conceptual en los objetivos del trabajo define básicamente las tareas de modelamiento geológico y de estimación de leyes que deben ser ejecutadas.

Este trabajo argumenta que, en una evaluación de recursos, se necesita modelar únicamente aquellas variables geológicas que representen los controles *efectivos* de mineralización. También se analiza la necesidad de incorporar distintos tipos de dilución en el modelo, incluyendo la “dilución interna” en el modelo (cambio de soporte en la jerga geoestadística), que es función de las características de la mineralización y su relación con la selectividad de la operación. Para ello se analizan los conceptos de estimación de recursos geológicos (in situ), estimación de “recursos recuperables”, y estimación de las reservas mineras.

Se presentan ejemplos de las consecuencias económicas de estimar recursos in situ en vez de recursos y reservas recuperables.

INTRODUCCIÓN

En todo proyecto minero, la información básica y fundamental necesaria para la planificación minera y el cálculo de flujos de caja correspondientes es la estimación de los recursos. Los informes de reservas, diseños de Rajo o mina, la estructuración del financiamiento de la deuda asumida, y los planes operacionales dependen de la información derivada de la planificación de mina. El no reconocer e intentar mitigar los riesgos asociados con la estimación de recursos y la planificación minera puede llevar a pérdidas importantes del capital de inversión, o a costos de oportunidad significativos. La Figura 1 muestra ejemplos tomados de algunos yacimientos de Au en Australia, y se refiere a las diferencias que se pueden observar entre las leyes predichas por los estudios de Factibilidad respectivos, y la “realidad” encontrada cuando la operación comienza.

En una era de precios de metales deprimidos e incremento generalizado en los montos de capital necesarios para poner en marcha nuevas operaciones mineras, los niveles de riesgos aceptables en la industria han disminuido. Esto es cierto tanto desde la perspectiva de los bancos e instituciones financieras como de las propias compañías mineras, quienes con frecuencia ponen en juego su existencia misma con cada nuevo gran proyecto. Para que la industria minera prospere en esta era, se deben tener un mejor entendimiento y cuantificación de los riesgos involucrados en la estimación de recursos, para así poder tomar decisiones más oportunas e inteligentes con relación a la tolerancia de riesgos apropiada para cada proyecto.

Este trabajo aborda dos aspectos diferentes, pero relacionados, de la estimación de recursos y reservas. El primero se refiere a un aspecto a veces descuidado en los modelos de bloques que representan los recursos de un yacimiento: el modelamiento de la geología del yacimiento, o más precisamente, aquellas variables geológicas que efectivamente controlan la mineralización. El segundo se refiere a la dilución que se debe incorporar al modelo “in situ”, con lo cual deja de ser “in situ”, y se convierte en “recuperable”. El cómo se aborden estos tópicos al momento de estimar recursos define los trabajos a ser ejecutados, pero principalmente otorga la oportunidad de mitigar el riesgo minero desde el inicio de los trabajos de modelamiento.

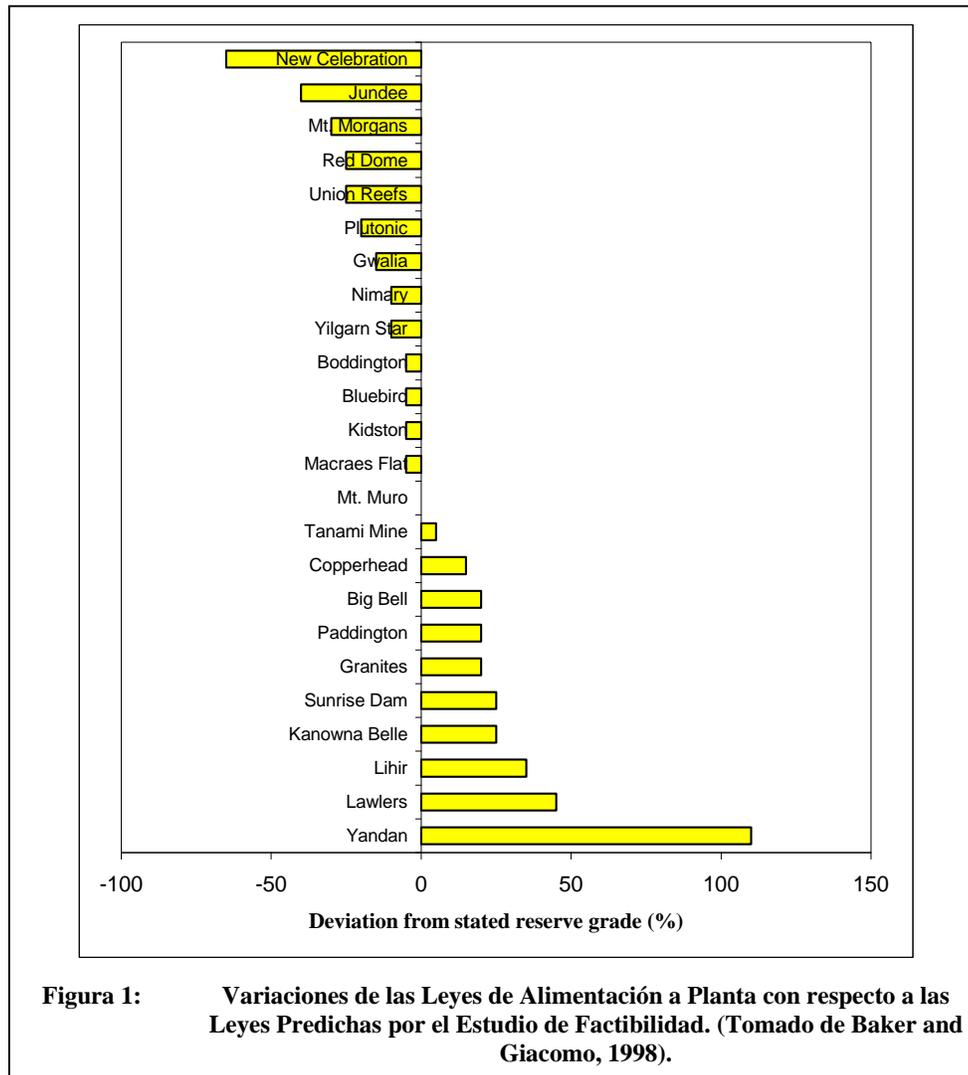
DEFINICIÓN DE LAS POBLACIONES DE ESTIMACIÓN

Por “definición de poblaciones de estimación” se entiende aquí la interpretación y modelamiento de la geología del yacimiento, y como este modelo geológico se traspa al modelo de bloques con el cual se estiman los recursos y reservas del depósito. Estas poblaciones o unidades de estimación son llamadas en adelante “UGs”, por Unidades Geológicas.

Una de las primeras decisiones a tomar en el proceso de un cálculo de recursos es decidir si se modela la geología del yacimiento “in situ”, o sea, tal como es interpretada por los geólogos que conocen el yacimiento, o si se modela una geología “para cálculo de recursos”, esto es, solo aquellos aspectos importantes que permitan obtener un modelo de recursos recuperables.

El propósito de estas UGs es capturar e incorporar en la estimación de recursos los controles geológicos de la mineralización, de manera tal de mejorar la calidad de predicción del modelo de bloques. La definición de las UGs para la estimación de leyes en un modelo de bloques habitualmente sigue dos caminos diferentes:

1. Si la definición es estrictamente geológica, todas las pequeñas diferencias en características de litología, alteración, mineralización, u otra variable geológica mapeada son modeladas, según la disponibilidad de la información disponible. Esto típicamente conduce a un modelamiento geológico de demasiado detalle, generalmente impráctico a la hora de estimar los recursos. Además, se corre el riesgo que, por la poca representación volumétrica en el depósito de algunas de estas poblaciones, la estimación de leyes sea resulte sesgada o poco confiable. Un ejemplo de esto fue el modelo geológico y de leyes utilizado a mediados de los años '90 en Chuquicamata (CODELCO, Chile), uno de los yacimientos más grandes de Cu del mundo, donde se definieron ¡mas de sesenta UGs!
2. La metodología alternativa es definir las UGs exclusivamente aplicando métodos estadísticos. Una de las estadísticas más utilizadas es la llamada “efecto proporcional”, según la cual se calculan las medias y desviaciones estándar de distintas zonas del yacimiento. Estas “zonas” de diferentes medias y desviaciones estándar se espera correspondan a diferentes UGs. Aunque a veces es así, frecuentemente la correlación entre la geología descrita del depósito y las poblaciones definidas por este método es pobre. La Figura 2 muestra un ejemplo de este tipo de gráfico, que sugiere unas 20 UGs diferentes.



Una combinación de ambas metodologías produce los mejores resultados. Específicamente, se sugieren las siguientes etapas conceptuales para determinar las UGs a ser definidas:

1. Definir las variables geológicas que pueden actuar como controles de la mineralización, y dentro de éstas cuáles son los tipos de cada variable que están suficientemente representadas en el yacimiento. Litologías como andesita, pórfidos, y brechas hidrotermales pueden ser posibles controles de mineralización; pero si, por ejemplo, existen pocas brechas en el yacimiento, éstas se deben desechar o agrupar con otras litologías.
2. Por medio de estudios estadísticos, se deben analizar la relación entre cada variable geológica y la mineralización de interés. Como parte de este proceso, se comparan estadísticamente las leyes de interés condicionadas a las distintas variables geológicas. De esta manera, se intenta caracterizar la calidad e intensidad del control de la variables geológica sobre la mineralización.
3. Con la selección de variables geológicas que evidencian un cierto control sobre la mineralización, se definen “UGs iniciales”, posibles poblaciones de estimación. En parte, esta definición inicial se hace en base a criterios geológicos, y en parte a estadísticas comparativas.
4. Finalmente, se definen las “UGs finales” a ser utilizadas, nuevamente en base a una combinación de geología, estadísticas, y criterios prácticos relacionados con el método de estimación escogido.

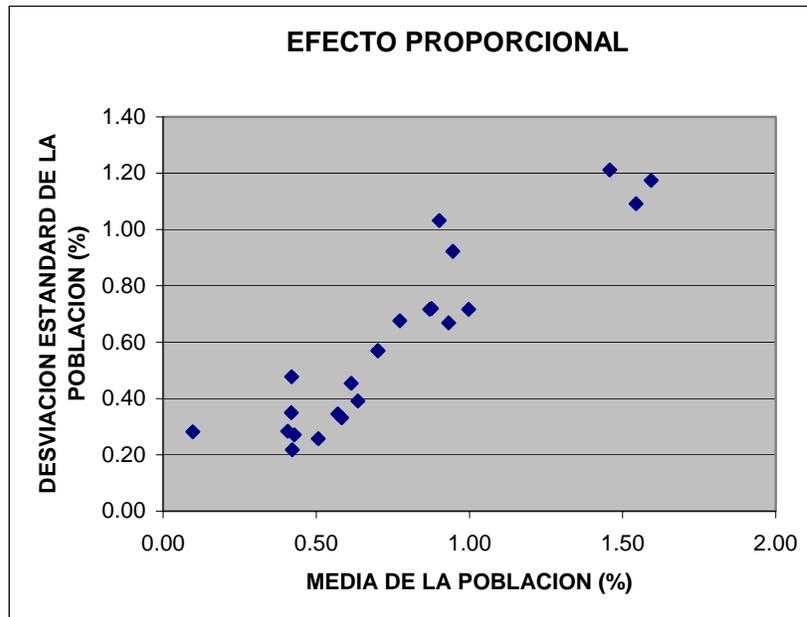


Figura 2: Ejemplo de Estudio de Efecto Proporcional. Cada punto del gráfico representa una posible UG.

El proceso descrito debe resultar en un modelo geológico (de UGs) que permita introducir los principales controles de mineralización en la estimación de recursos. El método con que estas UGs son modeladas e incorporadas al modelo de bloques también es importante porque afecta la dilución geológica incorporada al modelo.

DILUCIÓN Y PÉRDIDA DE MINERAL

Estimar los “recursos recuperables” (de las cuáles se derivan las reservas recuperables) es sinónimo con incorporar en la estimación dilución y pérdida de mineral. Es evidente que el operador minero nunca podrá extraer la mineralización observada en las perforaciones de factibilidad y desarrollo del proyecto.

Los tipos de dilución principales que deben ser considerados son:

- **Dilución Interna** (o cambio de soporte, en la jerga geoestadística): considera la mezcla de mineralización de alta y baja ley que ocurre al utilizar una muestra de perforación (por ejemplo, de 2m de largo y diámetro HQ en diamantina) para estimar un bloque del modelo. A mayor tamaño del bloque utilizado en el modelo, mayor dilución (mezcla) ocurrirá. Por otra parte, el tamaño de bloque que interesa es el que corresponde a la llamada Unidad Mínima de Selección (USM), o sea, el bloque más pequeño que la futura mina podrá extraer durante su operación. Esta USM depende de la selectividad de la operación; para una mina de cielo abierto y gran tonelaje, un tamaño posible de USM es 20x20x15m; por otra parte, una mina subterránea puede extraer bloques de 5x5x5m (corte y relleno), o aún más pequeños.
- **Dilución Geológica** (de contacto, in situ): esta dilución ocurre en la transición (contacto) entre una UG y otra, que puede ser de mejor o peor ley. Dado que es un fenómeno netamente local, con frecuencia su importancia para el cálculo de recursos global es limitada. En ciertos tipos de yacimientos, esta dilución puede afectar la pared final del Rajo (o fases mineras), y en general, localmente, la relación estéril-mineral.

- **Dilución y Pérdida de Mineral Operacional:** esta dilución de contacto es diferente de la dilución de contacto geológica, pues en la operación minera la dilución (o pérdida de mineral) ocurre al cambiar de un destino de material a otro (de planta a estéril, o de stock a planta). Esto es, no necesariamente coincide (ni incluye) todos los contactos geológicos modelados. Además, existen otros factores operacionales que pueden ser importantes, como la dilución por movimiento de material en la voladura, control de movimiento del material (camiones que terminan en el destino equivocado), etc. Una parte de esta dilución y pérdida de material puede ser planificada, y otra será siempre no planeada (inesperada).

Además de estos tres tipos de diluciones, también se debe considerar el llamado “efecto de la información”. Esto es, las decisiones sobre la selección de material a la hora de la extracción se hacen utilizando mucha más información que la utilizada para calcular los recursos del mismo yacimiento y obtener el plan minero correspondiente. Por ejemplo, en una mina a cielo abierto, se selecciona el mineral del estéril en base a la información de pozos de voladura, o en algunos casos perforaciones en mallas cerradas, especialmente diseñadas para la tarea. En el caso de una mina subterránea, la selección se hace en base a perforaciones de producción, y algunas veces por muestreo de las caras de las labores, o del material volado. En todos los casos, la selección de mineral-estéril es hecha con mucha mayor información que la utilizada para construir el modelo de recursos (también llamado Modelo de -predicción- de Largo Plazo).

Estas distintas diluciones que ocurren en la vida real, además del efecto de información, marcan la profunda diferencia entre un modelo de recursos verdaderamente “in situ”, y uno cuyo objetivo es estimar los recursos “recuperables”, esto es, las leyes y toneladas por encima de la(s) ley(es) de corte utilizadas en la operación. Aunque sin duda es difícil estimar estas diluciones con un grado aceptable de precisión, es siempre preferible hacer el intento que ignorar el problema.

Las diferencias de leyes mostradas en la Figura 1 entre la realidad de la mina y la predicción del estudio de factibilidad se debe, en muchos casos, a ignorar o inadecuadamente estimar alguna o todas de las diluciones mencionadas.

Dilución Interna.

La dilución interna (cambio de soporte) esperada en un yacimiento es función de las características de la distribución espacial de la mineralización y de la selectividad de la mina. Existen diversos modelos geoestadísticos que permiten obtener una predicción de las leyes y toneladas por encima de las leyes de corte económicas. Estos modelos tienen algunas limitaciones importantes, porque están basados en suposiciones teóricas que no siempre son aplicables (Rossi y Parker, Rossi et al).

Métodos como la Corrección Afín, Indirecto Log-normal, y Discreto Gausiano¹ para el cambio de soporte desde muestras o compósitos de perforaciones a bloques están basados en:

- La suposición de permanencia de la forma de la distribución estadística (Afín e Indirecto Log-normal).
- En todos los casos, las medias de las distribuciones no cambian (las leyes en general se promedian aritméticamente), pero la varianza de la distribución disminuye, caracterizada por un factor de cambio de varianza.
- El cambio de varianza de una distribución a otra se puede caracterizar por medio del variograma.
- El tamaño de bloque de interés no es el tamaño de bloque del modelo de recursos, sino el tamaño de la USM de la operación. Pero el concepto de la USM es un concepto idealizado, porque es un bloque de tamaño regular, generalmente aplicado por igual a todos los sectores de la mina. En la realidad, la extracción se hace por paneles de selección de mineral-estéril, que no tienen una forma regular, y dependen en parte de la geometría del yacimiento, del avance, y del equipo minero utilizado. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra un banco de una mina de pórfido de Cu, cuyo USM teórica es de 20x20x15m; sin embargo, se puede observar que los paneles de selección son muy irregulares, y de tamaño muy variado.

¹ Para una descripción más completa de estos métodos, ver Journel y Huijbregts, 1978.

- La corrección por cambio de soporte se debe aplicar a la distribución en forma global (sin intentar corregir los valores estimados para los bloques individuales). Sin embargo, frecuentemente se requiere hacer un cambio de soporte “local”, o sea, bloque a bloque, lo que implica en la práctica no cumplir con una suposición básica de estos métodos.

Existen otros métodos alternativos para resolver el problema del cambio de soporte, que en general son más recomendables. Entre otros, los llamados “no-tradicionales” en Rossi y Parker (1993), que implican un cambio de soporte indirecto, a través de un control efectivo de la suavización producida por el método de krigage. Sin embargo, el método reconocido como más efectivo, pero aún relativamente costoso en tiempo y recursos, es el de las simulaciones condicionales geoestadísticas (Rossi, 2000).

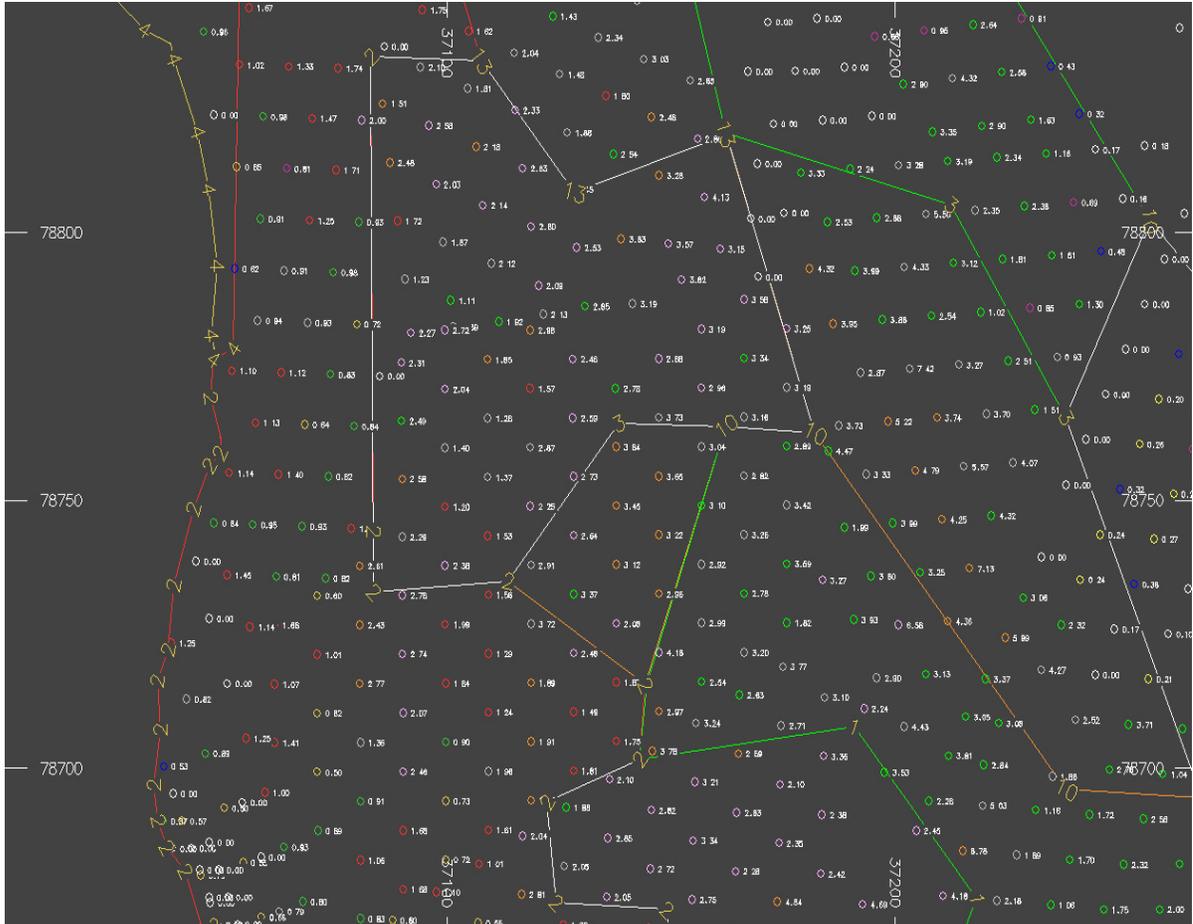


Figura 3: Vista de un Banco en una Mina de Cu, USM teórica 20x20x15m, mostrando los 11 diferentes destinos de material con paneles de colores. Los paneles tienen tamaños y formas muy diferentes a la USM teórica de 20x20m.

Dilución Geológica (o de Contacto).

Se ha hecho relativamente poca investigación en esta área. Se han utilizado diferentes métodos para intentar incorporar empíricamente en el modelo de bloques una dilución de contacto geológica. Por ejemplo, definiendo zonas de transición a las cuales se les aplica un factor de corrección para el tonelaje y otro para la ley, dependiendo de las unidades geológicas en contacto (Minera Escondida Ltda., 2001).

Este autor prefiere incorporar esta dilución directamente en la ley estimada en el modelo de bloques. Esto se puede hacer calculando los porcentajes de cada unidad geológica presente en el bloque, estimando individualmente las leyes

SEXTAS JORNADAS DE INGENIERÍA DE MINAS

de cada UG, y posteriormente obteniendo la ley final estimada del bloque ponderando las leyes de cada UG dentro del bloque por las respectivas proporciones.

Este tipo de dilución tiene un impacto local, y por lo tanto limitado desde el punto de vista del recurso global, ya que generalmente afecta a un bloque a la vez. La excepción son zonas de geología compleja en los yacimientos, en las que toma una importancia superior, pues en un mismo bloque pueden haber varias transiciones de UGs.

Dilución y Pérdida de Mineral Operacional.

La dilución operacional es también una dilución de contacto. Si el modelo geológico fuese perfecto, esta dilución de contacto debiera ser similar o igual a la estimada por el modelo geológico, salvo la inducida por el movimiento de material en la voladura. Como es de esperar que la precisión en la definición de las UGs por medio de perforaciones de exploración sea mucho menor que la precisión a la hora de determinar los contactos en terreno (por medio de pozos de voladuras o perforaciones de producción, o sea, por el efecto de información), entonces siempre se debe considerar una dilución y pérdida de mineral adicional en la predicción.

Es práctica habitual aplicar factores globales (empíricos) de recuperación de mineral, basados en experiencia o como un factor de seguridad adicional cuando se calculan las reservas mineras, o sea, después de haber definido el plan minero.

Sin embargo, es preferible incorporar factores estimados de simples cálculos geométricos (altura de banco, ángulo de reposo (talud) del material quebrado, y dimensiones del equipo de carguío, por ejemplo), por tener una justificación técnica. Además, existen múltiples modelos de fragmentación y movimiento de roca en la voladura, aunque el énfasis ha sido generalmente en fragmentación de la roca, no tanto en su movimiento y en su impacto sobre la selección de material (dilución y pérdida de mineral), ver por ejemplo Yang y Kavetsky (1990).

Todos estos cálculos de dilución y pérdida de mineral operacional teórica se deben incorporar al mismo modelo de bloques, para así obtener un modelo de bloques de recursos recuperables. Este modelo de bloques debe ser utilizado entonces para definir un plan minero adecuado y así establecer las reservas mineras.

CURVAS DE TONELAJE-LEY ESPERADAS

Cada uno de los efectos de dilución mencionados afectan a la curva de tonelaje-ley de los recursos estimados. A una ley de corte de 0 (o sea, considerando la distribución completa de mineral más estéril), el impacto de estas diluciones es menor. Sin embargo, a medida que se aumenta la ley de corte de interés, el impacto relativo de estas formas de dilución es cada vez más significativo.

En general, se puede esperar un impacto mayor si la ley o leyes de corte de interés son más altas que la ley media de la distribución. Por lo contrario, si las leyes de corte de interés son más bajas que la ley media del yacimiento, el impacto es menor. El primer caso es el más común, y los ejemplos se pueden encontrar con frecuencia en los yacimientos de pórfidos cupríferos y algunas minas de metales preciosos de alta selectividad. El segundo caso también puede ocurrir, como por ejemplo en Pierina (Minera Barrick Misquichilca, Perú).

La Figura 4 muestra como ejemplo las curvas de tonelaje-ley del modelo in-situ (representado más fielmente por la distribución de los compósitos originales), la curva de tonelaje-ley teórica después de aplicar el cambio de soporte (dilución interna), la curva de tonelaje-ley de los pozos de voladura (que incluyen la dilución de contacto), y la curva de tonelaje-ley del modelo de recursos. Estas curvas corresponden a un yacimiento cuprífero del norte de Chile. Algunas observaciones interesantes en esta Figura son:

- Las curvas de tonelaje-ley se entrecruzan, dependiendo del rango de leyes de corte considerados. Esto significa que no es posible obtener una única conclusión general para el comportamiento de los distintos modelos.
- El Modelo de Recursos In Situ subestima en un 4% las toneladas a ser recuperadas a una ley de corte de 0.3% CuT, y en un 8% para una ley de corte de 0.7% CuT con respecto al Modelo de Recursos Recuperables.
- El Modelo de Recursos In Situ sobreestima en un 9% la ley promedio recuperada a una ley de corte de 0.3% CuT, y en un 14% para una ley de corte de 0.7% CuT con respecto al Modelo de Recursos Recuperables.

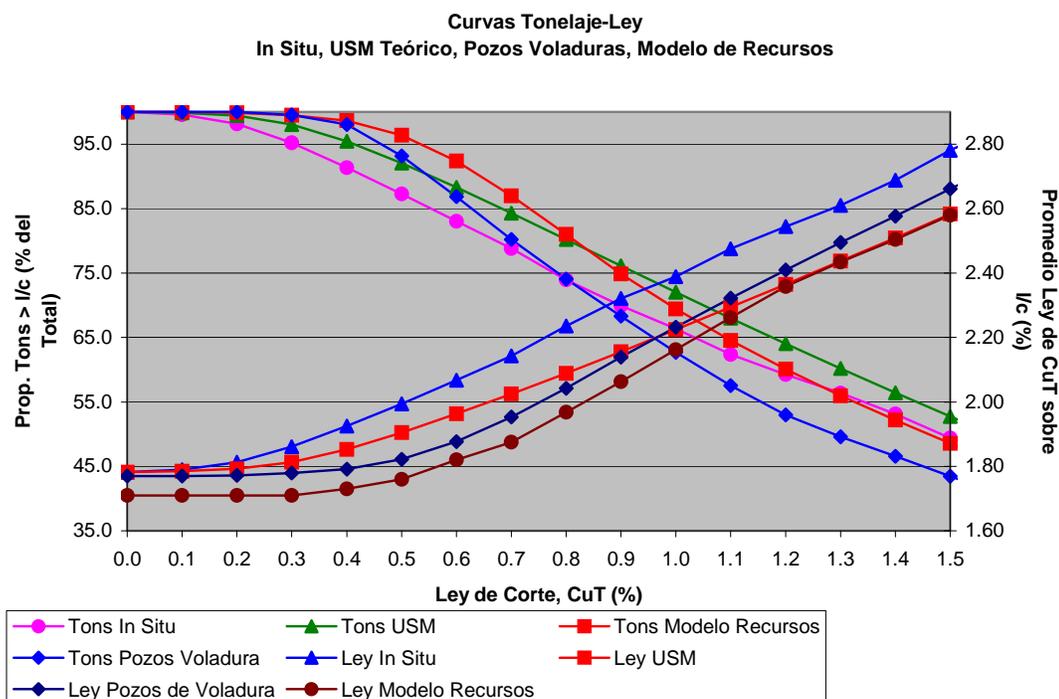


Figura 4: Ejemplo del Impacto de Distintos Tipos de Dilución sobre la Curva de Tonelaje-Ley. Leyes de Corte de interés son 0.3% CuT (Marginal), 0.7% CuT (Alimentación a Planta), y 1% CuT (Máxima ley de corte variable in-pit).

- La ley obtenida de los pozos de voladuras es aproximadamente un 3.5% mayor para todas las leyes de corte que la del Modelo de Recursos. Esta diferencia considera la dilución y pérdida de mineral operacional.
- El Modelo de Cambio de Soporte (USM Teórico) corresponde al Modelo Discreto Gausiano, considerado el más robusto de los métodos tradicionales.

Debiera ser intuitivo a partir de la Figura 4 el posible impacto que los distintos tipos de dilución tienen en el cálculo de recursos y reservas de un yacimiento, y con ello el consecuente impacto económico en la operación. Una aproximación simplista del impacto económico es suponer que las diferencias tanto en ley como en tonelaje por encima de la ley de corte tienen un impacto lineal sobre la función económica de beneficio. En general esta suposición no es válida, pero puede ser utilizada como un ejemplo ilustrativo de las posibles consecuencias económicas de ignorar la dilución.

Para una ley de corte de 0.7% Cu Total (CuT), la diferencia entre el modelo in situ y el de recursos recuperables es de -8% en toneladas, y +14% en ley. Esto implica un sobre-estimación por parte del modelo in-situ de aproximadamente 6% en contenido de metal. Para una mina que alimenta 60,000 toneladas por día de mineral a planta (muchas minas de Cu están muy por encima de este valor), y asumiendo una ganancia operacional neta (en términos de flujo de caja) de US\$ 0.20 por libra de Cu vendida y una ley media de alimentación de 1.0% Cu, la diferencia entre ambos modelos resulta en unos US\$ 0.25 por tonelada alimentada. O sea, US\$ 15.000 por día, o US\$ 5.400.000 anuales *netos*. Esta es la “pérdida” en flujo de caja que se registraría por una sobre-estimación del 6 en contenido de metal, y no considera las diferencias en la forma del Rajo optimizado, el costo por movimiento de mayor cantidad de material (mayor tonelaje), el posible mal dimensionamiento de la planta de tratamiento, costos financieros, etc.

El ejemplo es indudablemente simple, pero debiera ser suficiente para dar una indicación de las posibles consecuencias de no estimar modelos de recursos recuperables.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden extraer de este trabajo son:

1. Las consecuencias económicas negativas son significativas si se ignoran los distintos tipos de dilución que ocurren en una operación minera.
2. Se requiere entonces una estimación de recursos recuperables para poder obtener un plan minero más ajustado a la realidad y con ello una visión más realista de las variables económicas del proyecto minero.
3. Existen diferencias significativas en la metodología y los procedimientos utilizados para estimar un recurso in situ vs. un recurso recuperable.
4. Para estimar la dilución interna (o cambio de soporte) existen varios métodos que pueden ser utilizados. A pesar de sus limitaciones, estos métodos pueden ser utilizados para obtener un modelo de recursos parcialmente diluido.
5. La definición de las variables del modelo geológico a interpretar, la interpretación misma, y su incorporación al modelo de bloques para estimar recursos son todos factores de importancia en el cálculo de recursos. Entre otros aspectos positivos (como una correcta definición de las poblaciones a estimar), un modelo geológico adecuado permite incorporar la dilución de contacto geológico.
6. Si existen pozos de voladuras o información de perforaciones de producción, entonces éstos pueden ser utilizados para incorporar al modelo de recursos una estimación de la dilución y pérdida de mineral operacional.

REFERENCIAS

- **Baker, C.K., y Giacomo, S.M., 1998**, 'Resources and Reserves: Their Uses and Abuses by the Equity Markets', en Ore Reserves and Finance: a joint seminar between AusIMM and ASX", Sydney, Australia. Junio 15, 1998.
- **Goovaerts, P., 1997**, "Geostatistics for Natural Resources Evaluation", Oxford University Press, 483p.
- **Journel, A.G., y Huijbregts, Ch.J., 1978**, "Mining Geostatistics", Academic Press, 600 p.
- **Minera Escondida Ltda., "Cálculo de Recursos, Mina Escondida, Actualización Diciembre 2000"**, Informe Interno, Abril 2001.
- **Rossi, M.E., 2000**, "Improving on the Estimation of Recoverable Reserves", Sociedad de Ingenieros de Minas, EEUU, Mining Engineering, Colorado, USA, Enero.
- **Rossi, M.E., Parker, H.M., and Roditis, Y.S., 1993**, "Evaluation of Existing Geostatistical Models and New Approaches in Estimating Recoverable Reserves", presented at the XXIV APCOM'93, Montreal, Quebec, Canada, October 31 - November 3, 1993.
- **Rossi, M.E. and Parker, H.M., 1993**, "Estimating Recoverable Reserves: Is It Hopeless?", presented at the Forum Geostatistics for the Next Century, Montreal, Quebec, Canada, June 3-5, 1993.
- **Yang, R.L., y Kavetsky, A., 1990**, "A Three Dimensional Model of Muckpile Formation and Grade Boundary Movement in Open Pit Blasting", International Journal of Mining and Geological Engineering, London, Chapman y Hall, Septiembre pp. 13-34.