

## AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS MINERALES. UNA PERSPECTIVA MUNDIAL

---

*Jorge M. Molina E., Rosalba Salinas, Tetsuya Shoji y Rafael Rodríguez A.*  
*Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas*  
*Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín*  
*Universidad de Tokio, Japón*  
*jmmolina@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 09 de Septiembre de 2004 / Aceptación: 09 de Noviembre de 2004 / Recibida versión final: 24 de Noviembre de 2004

### RESUMEN

Los depósitos minerales tienen un enriquecimiento de 10 a 10000 veces más su abundancia geoquímica. Dichos recursos tienen un límite; algunos autores han planteado el agotamiento de algunos depósitos de germanio, estaño, mercurio, bismuto, cadmio, níquel y tungsteno para el comienzo del siglo 21. Incluso un incremento de los precios, como el pronóstico para el cobre que podría alcanzar 3.9 US\$/lb en el 2010.

Un análisis de una base de datos de minas activas, inactivas y futuras, usando modelos matemáticos sobre los diagramas tenor-tonelaje, dan la posibilidad de redefinir y calcular el tenor crítico y el tonelaje total de los minerales en la corteza terrestre. Así, acorde con la disponibilidad de recursos futuros se podrían clasificar como optimistas o pesimistas.

Con base en los diagramas tenor-tonelaje, la relación de los depósitos de óxido de níquel indicaron que todas las minas presentan un tenor mayor que el tenor crítico, por lo que se consideran como optimistas. De otro lado, en el caso de los depósitos de cobre tipo porfidítico, el modelo sugirió que se clasifiquen como recursos pesimistas. Otros minerales como plomo, zinc, molibdeno y plata fueron estudiados. Este método, donde el tenor crítico y el total de los recursos minerales son estimados, permite una aproximación que sirve para pronosticar tendencias de los precios y dar algunas directrices para la exploración y el negocio minero.

**PALABRAS CLAVES:** Minerales, Agotamiento, Escenarios, Precios, Tenor Crítico, Pronóstico.

### ABSTRACT

Mineral Deposits are enriched 10 to 10000 times the geochemical abundance. These resources have a limit; some authors have defined the depletion of some ore deposits for the beginning of century 21 as germanium, tin, mercury, bismuth, cadmium, nickel and tungsten. A forecasting for copper price should reach 3.9 US\$/lb in 2010.

An analysis of active, inactive and future mines data base, using mathematical models of grade-tonnage diagrams, give the possibility to redefine the critical grade and its estimation, and also to calculate the total tonnage on the earth crust. Therefore, resources could be classified as optimistic or pessimistic availability.

Based on grade-tonnage diagrams, the relation of oxide type nickel deposits indicated that all mines have ore grade higher than critical grade, then the resources are categorized as optimistic. On the other hand, in the case of porphyry type copper deposits suggested belong to the pessimistic group. Other minerals as lead, zinc, molybdenum, tungsten, uranium, gold, and silver were also studied. This method, where critical grade and total mineral resources are estimated, let have an approximation to forecasting the prices trend and a global bases for the exploration and mining business.

**KEY WORDS:** Minerals, Depletion, Scenarios, Prices, Critical Grade, Forecasting.

## 1. INTRODUCCIÓN

La economía de la sociedad moderna está basada en su mayoría en la actividad industrial. Esta actividad requiere de grandes cantidades de materias primas minerales de la corteza terrestre. La disponibilidad de estos recursos es limitada por su existencia, tecnologías disponibles y factores ambientales. Cada vez los tenores de los depósitos minerales en extracción son menores y más profundos, lo cual incrementa un poco en el fondo los costos de las materias primas minerales y de la actividad industrial.

El consumo de recursos energéticos y minerales ha presentado en el mundo un incremento exponencial, especialmente en el siglo pasado. No obstante, en las cinco pasadas décadas, la relación  $R/P$  (reservas / producción anual) no ha decrecido sustancialmente y fluctúan entre dos valores: v.g. 30 a 50 años para el petróleo, 30 a 60 años para cobre, y 20 a 30 años para zinc. Esas relaciones  $R/P$  casi constantes se mantienen debido al descubrimiento de nuevos depósitos, al mejoramiento de tecnología, uso de sustitutos y el reciclaje. Un punto de discusión acá es si se tendrá suficientes recursos para este Siglo 21. ¿Será una situación optimista o pesimista que pueda pronosticarse con algún método?.

Los tenores de cobre explotados en las minas han decrecido desde un 3% a un 0.5% durante el siglo pasado (Routhier, 1980). Consecuentemente, los tenores de las menas de los depósitos a descubrir se presume serán menores que los de las minas actuales en explotación. Esto significa que deben extraerse mayores tonelajes para obtener la misma cantidad de metales. Así la tendencia es a descubrir y poner en producción depósitos de más bajo tenor y a usar las presas de relaves antiguas. La pregunta es, ¿se tiene alguna evidencia de que esos depósitos de bajo tenor existan?, ¿Cuáles de ellos presentan una situación favorable o desfavorable considerando una perspectiva mundial?.

Los modelos de tenor-tonelaje podrían ser una aproximación para ayudar a responder estos interrogantes e indicar si existe una situación optimista o pesimista para cada recurso.

## 2. LÍMITE DE LOS RECURSOS

La Figura 1 muestra la relación entre la abundancia geoquímica y los tenores de los depósitos para algunos elementos. El diagrama sugiere que los depósitos minerales son enriquecidos 10 a 10000 veces su abundancia en la corteza terrestre. Algunos autores han definido el límite de los recursos con base en el alto grado de concentración que se requiere para constituirse en mena. En este sentido, el análisis hecho por diferentes autores como Nishiyama y Kusakabe (1988), predice disminuciones de la oferta de algunos depósitos minerales para principios del Siglo 21 como el germanio, estaño, mercurio, bismuto, plata, plomo, antimonio, cobre, cadmio, níquel y tungsteno. De éstos, Hirata (1988) analizó con detalle el caso del cobre y estimó que para mantener la oferta de cobre, el precio debía alcanzar 3.9 US\$/lb en el 2010. Ello viene corroborándose con la tendencia en el alza de los precios, en términos constantes, de los minerales y energéticos, especialmente en los dos últimos años.

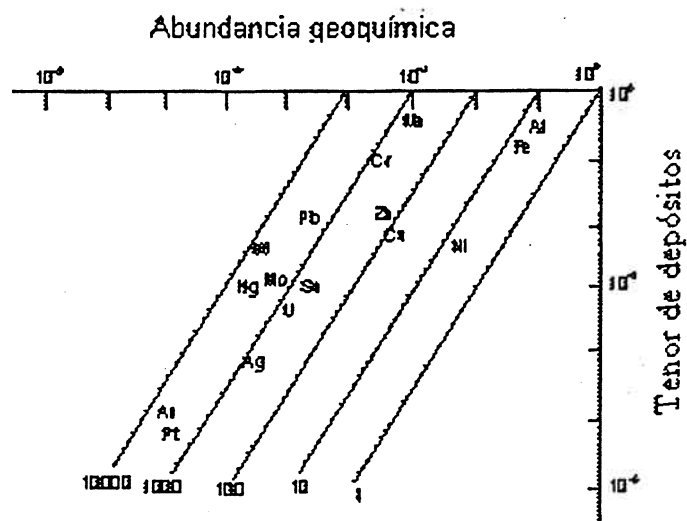


FIGURA 1.

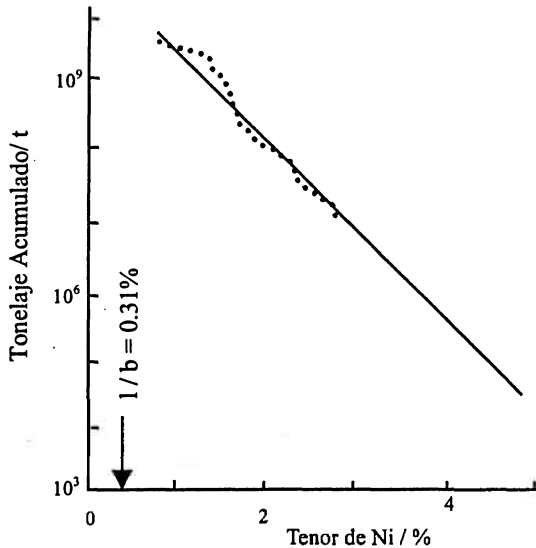
Relación entre la abundancia geoquímica y el tenor de corte de algunos elementos metálicos

### 3. EXISTENCIA OPTIMISTA Y PESIMISTA DE RECURSOS

El tenor crítico de un mineral, tomado de la redefinición de Shoji (1989, 1993), es un parámetro resultante de la correlación matemática de las relaciones de tenor-tonelaje obtenidas para un mineral. La construcción de dicho diagrama tiene en considera centenas de depósitos minerales en el mundo, tanto activos, inactivos, como los próximos a iniciar explotación. La forma de calcularlo se mostrará más adelante.

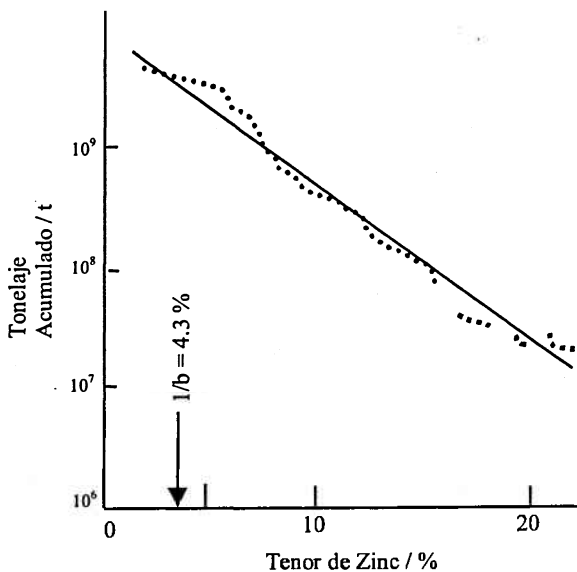
A partir del tenor crítico se propone el concepto de recursos optimistas y pesimistas. Si las minas presentan tenores mayores que el tenor crítico, entonces sus recursos son catalogados como optimistas. Por el contrario, si las minas trabajan con tenores menores que el tenor crítico, entonces sus recursos se les llaman pesimistas.

En las Figura 2 y 3 se muestran para el óxido de níquel y para el zinc, que el logaritmo de los tonelajes acumulados decrece linealmente con el incremento de los tenores.



**FIGURA 2.**

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Níquel Tipo óxido. El número de depósitos es de 100, pero no todos están graficados.



**FIGURA 3.**

Diagrama de Tenor-tonelaje para depósitos de Zinc. El número de depósitos es 242, pero no todos están graficados

La variación del Tonelaje acumulado  $T(x)$  con tenor mayor o igual a  $x$  será:

$$\frac{dT(x)}{d(x)} = b[T(x)]^n \quad (1)$$

Donde  $n$  es un "orden de la relación" matemática,  $x$  es el tenor. Para el caso de relaciones aproximadamente lineal se puede asumir  $n$  igual a 1 y en este caso,  $b$  tendría unidades de

$$(\text{tenor})^{-1}$$

Así, la relación es aproximadamente una función lineal, que al separar variables e integrando, da la expresión como sigue:

$$\begin{aligned} T(x) &= \int_x^{\infty} t(x)d(x) \\ &= T_0 e^{-bx} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $T(x)$  es el tonelaje acumulado con tenor  $x$ ,  $t(x)d(x)$  es el tonelaje entre los tenores  $x$  y  $x+dx$ ,  $T_0$  es el tonelaje total y  $b$  es una constante positiva determinada por la regresión lineal. La constante  $-b$  indica la pendiente de la ecuación (2) en el diagrama  $x\text{-log } T(x)$ . De (1) se derivan las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} m(x) &= xt(x) \\ &= T_0 x e^{-bx} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde  $m(x)$  es el diferencial de la cantidad de metal con tenor  $x$ . La ecuación (3) significa que  $m(x)$  tiene un máximo en  $x = 1/b$  (tenor crítico). Si todas las minas en operación en el mundo tienen un tenor mayor que el tenor crítico, el diferencial de la cantidad de metal se incrementa cuando decrece el tenor. En este caso se espera con seguridad en tener mayor metal de los depósitos, aun si se operan con un tenor mas bajo que los actuales. Estos recursos se pueden clasificar entonces como optimistas. Lo contrario ocurre cuando algunas minas operan con tenores menores a los del tenor crítico; aquí no puede esperarse más metal porque el diferencial de la cantidad de metal decrece cuando decrece el tenor en la región donde los tenores de las menas son más bajos que el valor crítico. En consecuencia esta clase de recursos minerales son clasificados como pesimistas.

Los depósitos de níquel tipo oxido tienen un tenor crítico ( $1/b$ ) de 0.31%. Todas las minas de níquel del mundo tienen tenores mayores que el tenor crítico. Esto implica que los recursos de níquel de tipo oxido son clasificados como optimistas. De otro lado, en el caso del zinc, el tenor crítico de los depósitos es de 4.3%. Actualmente muchas de las minas en el mundo operan con tenores más bajos que el tenor crítico. En consecuencia, los recursos del zinc se clasifican en el grupo pesimista. En el caso del níquel, Figura 2 el  $T_0$  es 200.000 millones de toneladas y en caso del zinc, Figura 3 el  $T_0$  es 5000 millones de toneladas.

La Figura 4 muestra un modelo estadístico para los depósitos de zinc. Allí se ilustra no solamente el tonelaje acumulado sino también el tonelaje diferencial y la cantidad diferencial de metal. Se nota mas claridad el máximo valor que toma la curva, correspondiendo al tenor crítico de 4.3%.

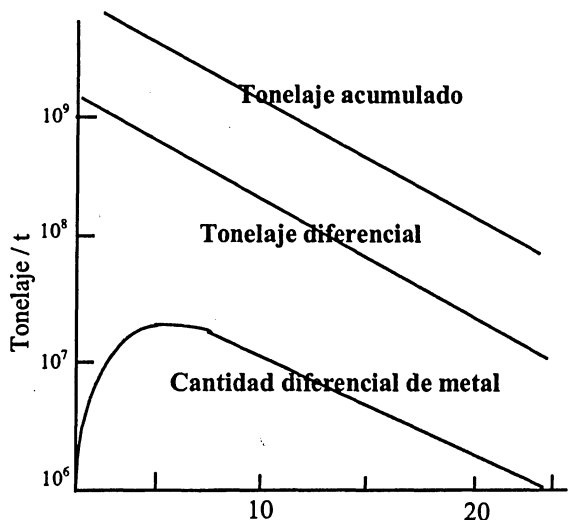


FIGURA 4.  
Modelo Estadístico para los depósitos de Zinc

#### 4. METALES BASE, UN CASO PESIMISTA

Las relaciones de tenor-tonelaje han sido analizadas para otros recursos metálicos como el cobre, plomo, zinc, molibdeno y tungsteno.

La Figura 5 muestra la relación tenor-tonelaje para los depósitos de plomo. Con excepción de dos de ellos muestran tenores extremadamente altos, la relación entre el tenor y el logaritmo acumulado del tonelaje es casi lineal.

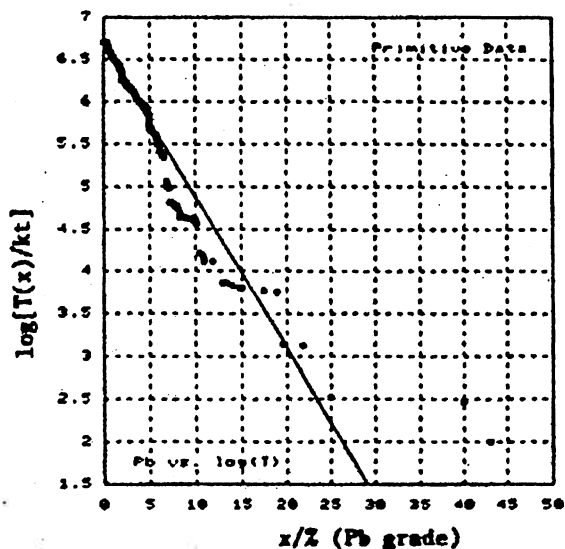


FIGURA 5.  
Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Plomo. El número de depósitos es de 636.

La relación muestra que el tenor crítico es 5.6%. Debido a que la mayoría de las minas operan en el mundo con tenores más bajos que el tenor crítico, entonces de acuerdo con el concepto expresado acá, se considera al plomo como un recurso pesimista.

La Figura 6 muestra la relación tenor-tonelaje para los depósitos de tungsteno. La relación no es lineal para el diagrama. El tenor crítico es de 0.63%, el cual es muy cercano a las minas de mas bajos tenores actualmente en operación. Este hecho sugiere que el tungsteno se considere pesimista en el futuro.

La relación tenor-tonelaje para los depósitos de molibdeno se presenta en la Figura 7, con excepción de algunos de ellos que presentan tenores más altos, la relación es aproximadamente una línea recta.

La pendiente de la línea indica que el tenor crítico es 0.15%. Este tenor crítico y los actuales bajos tenores de operación sugieren también que el molibdeno será clasificado como pesimista.

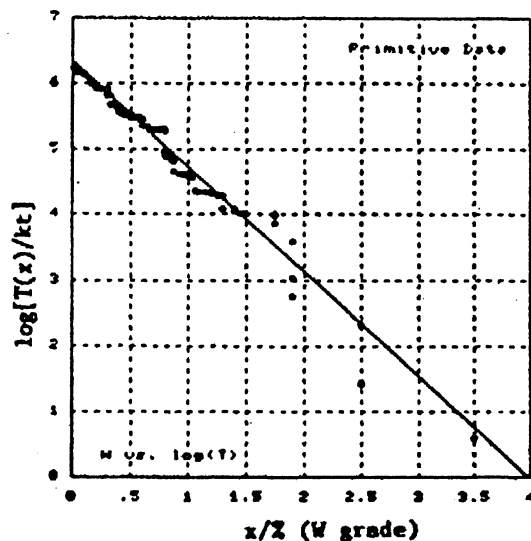


FIGURA 6.

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Tungsteno. El número de depósitos es de 134.

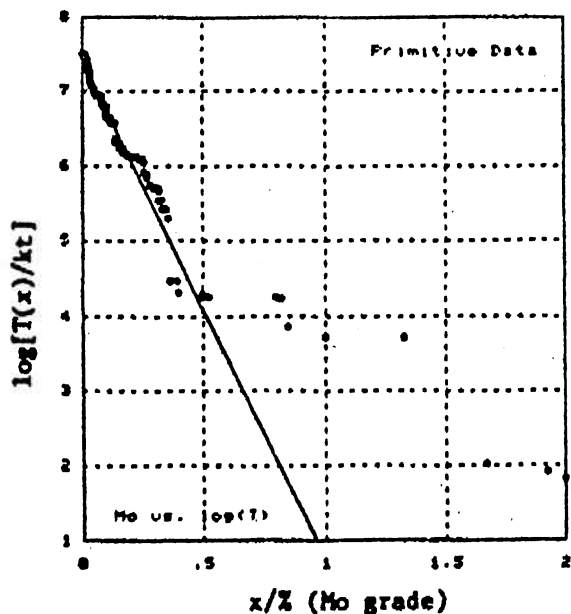


FIGURA 7.

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Molibdeno. El número de depósitos es de 193.

La Figura 8 muestra la relación tenor-tonelaje para los depósitos de cobre. La relación muestra aproximadamente dos líneas rectas, las cuales se interceptan en 2%. La línea ajustada para los depósitos con tenores altos presenta un tenor crítico de 2.9%. En el caso de la línea de tenores bajos, presenta un tenor crítico de 1.4%. El hecho de tener dos correlaciones dadas por dos funciones exponenciales sugiere que los datos pertenecen a dos poblaciones de depósitos.

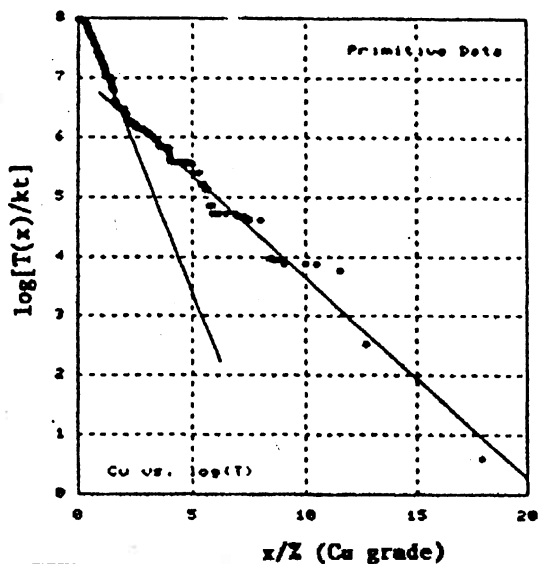


FIGURA 8.

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Cobre. El número de depósitos es 1616.

Al hacer su separación de datos, resulta la Figura 9 que muestra la relación para los depósitos de cobre tipo porfídico, con una pendiente de  $-1.3$ , es decir  $0.77\%$  de tenor crítico. Esta pendiente es menor que  $-0.73$  la pendiente de la línea para los tenores bajos en la Figura 8 para los depósitos de cobre. El ángulo entre las dos líneas ( $17^\circ = 53^\circ - 36^\circ$ ) no es muy agudo. Este hecho sugiere que la población de los depósitos de tenor bajo consiste en su mayoría de tipo porfídico. A pesar de que el tenor crítico de los depósitos de tipo porfídico es relativamente bajo ( $0.77\%$ ), los recursos de cobre pertenecen al grupo de los pesimistas. En el caso de los depósitos con contenidos de cobre alto, se refiere básicamente a sulfuros masivos volcano sedimentarios, que en la escala mundial son ya relativamente escasos y tienen un aporte menor al  $10\%$  de la producción.

Es importante mencionar que el tratamiento de datos de los metales base, no debe hacerse necesariamente en forma independiente, pues la mayoría de ellos son extraídos de menas polimetálicas, donde se aprovechan integralmente los subproductos, metales preciosos y otros.

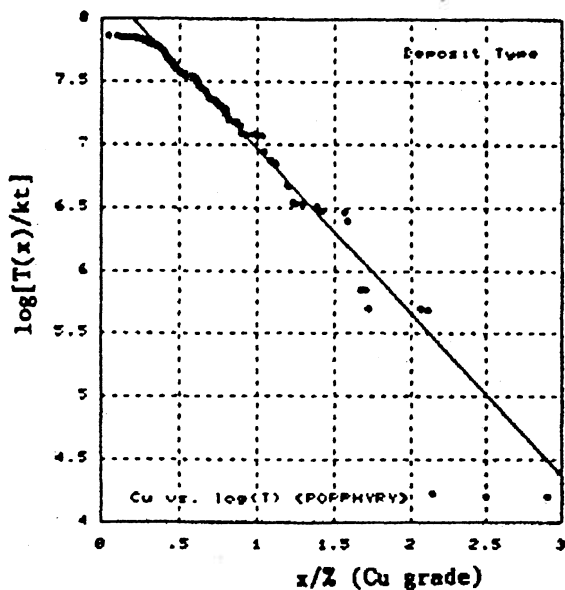


FIGURA 9.

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Cobre tipo porfídico. El número de depósitos es de 299.

## 5. METALES PRECIOSOS Y OTROS, MEDIANAMENTE OPTIMISTAS

En contraste con los metales base, el oro, la plata y el uranio son clasificados como optimistas. La Figura 10 muestra la relación tenor-tonelaje para depósitos de oro. Ésta relación no se ajusta exactamente a la ecuación (2). Sus respectivos tenores y el tonelaje acumulado presentan una curva convexa hacia abajo. Si se omiten los depósitos de mayor tenor se puede dibujar una línea curva ajustada por la fila de puntos en la Figura 10. Así una tangente a la curva en el punto  $x_1$  es expresada por la ecuación (2) y de aquí que pueda obtenerse el tenor crítico calculando su pendiente ( $-b_1$ ). Si se dibuja otra tangente en el tenor  $x_2$ , el cual es menor que  $x_1$  ( $x_2 < x_1$ ), ésta tiene una pendiente mas fuerte que la primera ( $b_2 > b_1$ ), de aquí que el nuevo tenor crítico ( $1/b_2$ ) es menor que el primer tenor crítico ( $1/b_1$ ). Esto sugiere que el tenor crítico no puede ser definido por la tenor-tonelaje la cual se asemeja a una curva convexa hacia abajo en el diagrama  $x - \log T(x)$ , y que valor crítico es menor que el tenor de cualquiera de los depósitos descubiertos. Se concluye así que los recursos de oro pueden clasificarse como optimistas.

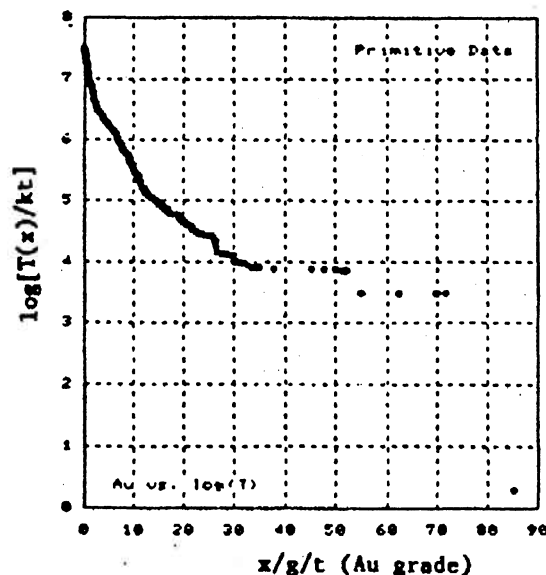


FIGURA 10.

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Oro. El número de depósitos es de 2316.

Los depósitos de Plata (Figura 11) y de uranio (Figura 12) tienen similares relaciones tenor-tonelaje donde los tenores y los tonelajes acumulados presentan curvas convexas hacia abajo, similares a las del oro, ambos recursos son entonces clasificados como optimistas.

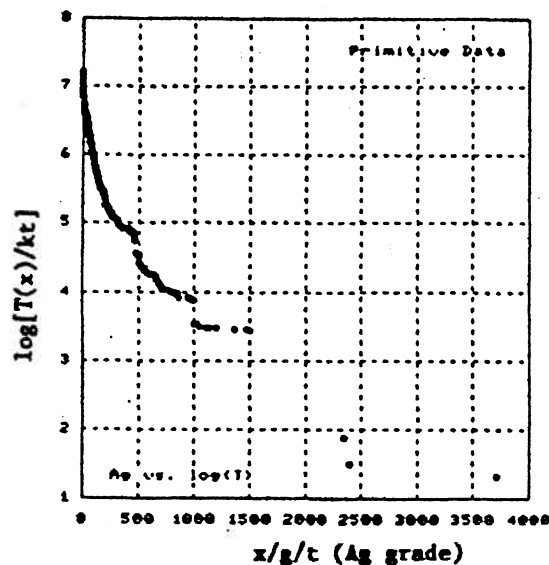


FIGURA 11.

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Plata. El número de depósitos es de 1055



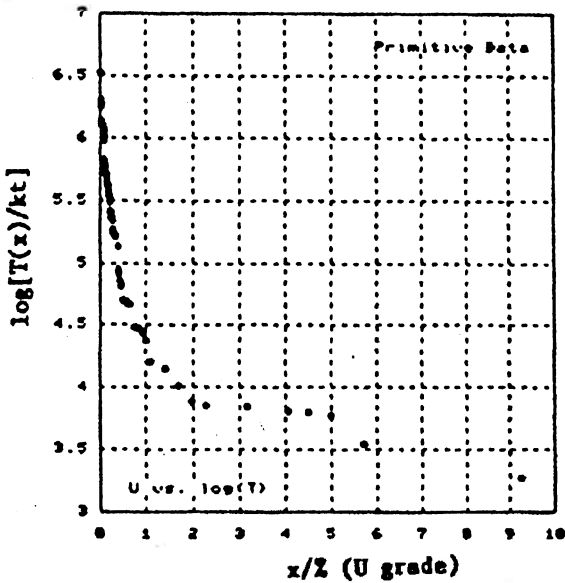


FIGURA 12.

Diagrama de tenor-tonelaje para depósitos de Uranio. El número de depósitos es de 240.

Los modelos para el oro, plata y uranio planteados acorde con la ecuación (1) deben revisarse. Dados los datos existentes, ellos no conforman un modelo lineal. Por tanto el exponente  $n$  de la ecuación (1) asumido con uno, deberá ajustarse y recalcularse los tenores críticos para los tres casos. No obstante el modelo de aproximación lineal planteado muestra una tendencia aproximada.

## 6. CONCLUSIONES

La disminución de los tenores de los depósitos incrementa los precios finales de las materias primas minerales. Dicho incremento no es tan severo, pero implica que se promueva la exploración minera, se aceleren los desarrollos de nueva tecnología, se aumente la productividad y la competencia y se produzcan nuevos materiales sustitutos.

Uno de los hechos más sobresalientes es la necesidad de explorar nuevas áreas en el globo terráqueo, especialmente en los países en desarrollo, ya que presentan un potencial no descubierto para los metales base y preciosos. Los precios actuales de los minerales no deben mirarse en un escenario a corto plazo. Usualmente se presentan ciclos, a veces de décadas, con estancamiento y subida abrupta de los precios.

Un modelo estadístico para níquel indica que una gran cantidad del metal puede ser todavía obtenido de menas con tenores bajos presentándose como optimistas. Un modelo similar para el zinc provee un pronóstico pesimista.

El uso de menas de bajo tenor incrementa el flujo de materiales y un cambio ambiental. Para hacer un desarrollo más sostenible, todos los materiales excavados por la minería deberían ser aprovechados y quizás sea necesario pensar en estímulos para promover esta situación.

El pronóstico de la existencia de algunos metales preciosos y el Uranio tienen un escenario optimista. Varios de los metales base, cobre, plomo, molibdeno y tungsteno, de acuerdo con las relaciones tenor-tonelaje, es pesimista para afrontar la demanda futura, implicando así un reto ingenieril para el desarrollo económico. No obstante este reto implica tener también otros factores, como es el caso de los recursos energéticos y de las condiciones ambientales.

## 7. AGRADECIMIENTOS

A Sumitomo Metal Mining Co., Ltda por proveer su base datos Mining Information System (MIS). Al profesor Oswaldo Bustamante por sus valiosos comentarios. A los Ingenieros Luis Eduardo Gutiérrez y Ana María Pérez por su gran colaboración en la edición de esta publicación.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- De Young, Jr., J.H., 1981. The Lasky cumulative tonnage-grade relation – a reexamination. *Econ. Geology*, vol. 76, 1067-1080.
- Hirata, Y., 1988. Strategy and data base for resources development of the 21st century. *Mining Geology*, vol. 38.
- Metal Mining Agency of Japan, 2002. Mineral Potential of Asia. MMAJ Forum. Tokio, Japón. 42 p.
- Nishiyama, T., y Kusakabe, Y., 1988. Demand and supply of mineral resources until 2000. Preprinting of Annual Meetings of MMIJ.
- Pindyck, R., y Rubinfeld, D., 1991. *Econometric Models and Economic Forecasts*. Third Edition, McGraw Hill, Singapore. 596p .
- Routhier, P., 1980. Ou sont les metaux pour l'avenir? B.G.R.M., Memoir no. 105, 409.
- Shoji, T., 1989. Resources and the environment: which does limit economic growth? Memorias del MMIJ/IMM simposio. Kioto, Japón.
- Shoji, T., y Kaneda, H., 1997. Ore Value-Tonnage Diagrams for Resources Assessment. Memorias del MMIJ/IMM simposio. Tokio, Japón.
- U.S. Geological Survey, 2004. Mineral Commodity Summaries 2004. Washington D.C. 197 p.

