

Beneficio de la mena laterítica: actualidad y perspectivas

Alberto Hernández Flores
Arístides Legrá Lobaina
Rafael A. Trujillo Codorniu
María Magdalena Toirac Suárez

Resumen

En el trabajo se realiza el estudio teórico y práctico de la separación de compuestos químicos y mineralógicos que contiene la mena laterítica. A partir del contraste que se manifiesta en las propiedades físicas, diámetro y susceptibilidad magnética de las partículas minerales se establece el grado de separación teórico que se puede alcanzar a través del empleo de métodos de beneficio, gravitacionales y magnéticos. Se corroboran los resultados en corridas experimentales a escala de banco. Se corrobora la hipótesis de que no existe discrepancia significativa entre los resultados teóricos (frecuencia esperada) y los resultados obtenidos a escala de banco (frecuencia observada) para lo que se utilizó la función χ^2 (Ji-Cuadrado) con Corrección de Yates.

Palabras clave

Beneficio gravimétrico, beneficio magnético, diámetro de partículas, fases minerales, susceptibilidad magnética.

Benefit of the laterite ore: at present and perspectives

Abstract

Theoretical and practical studies were conducted on the separation of chemical and mineralogical compounds contained in the laterite ore bodies. The degree of theoretical separation that can be achieved is established based on the differences between the physical properties of diameter and the magnetic sensitivity of the mineral particles by using the beneficiation, gravitational and magnetic methods. These results were corroborated through bench trials; which proved the hypothesis that there is no significant difference between the theoretical results (expected frequency) and the bench test results obtained (observed frequency); for which the distribution function χ^2 (Ji squared) with correction of Yates was used.

Keywords

Gravimetric benefit, magnetic benefit, mineral phases, diameter of particles, magnetic susceptibility.

INTRODUCCIÓN

Hasta el presente, la preparación de los minerales lateríticos para el proceso extractivo se ha efectuado, para el proceso carbonato amoniacal, mediante el secado y la reducción de tamaño y mediante el lavado y cribado para el proceso ácido a presión. En el primer caso, al reducir el tamaño de las partículas se logra mayor eficiencia en las operaciones de reducción y lixiviación. En el segundo, al separar los trozos gruesos (mayores de 0,833 mm) disminuye el contenido de minerales de magnesio y otros de alta solubilidad en el ácido sulfúrico, al mismo tiempo se incrementa el contenido de níquel en la pulpa (Hernández-Flores & Falcón 1993).

Actualmente, la preparación mecánica a que el mineral es sometido no garantiza la calidad de la mena de alimentación a la metalurgia extractiva, lo que exige durante la explotación minera la extracción de minerales de varios frentes de arranque, mezclándolos para compensar la variabilidad química y mineralógica entre zonas e interzonas y, aunque se logra mantener en los límites requeridos la composición química de los elementos principales (Ni, Co, Fe y Mg), no se regula la composición mineralógica, perdiéndose recursos que pasan a los depósitos de residuales al no disponerse de métodos de preparación ulterior (Hernández-Flores *et al.* 1995).

Las investigaciones geológicas sobre yacimientos lateríticos indican contrastes significativos en la concentración de los diferentes elementos en las zonas y partículas de diferentes granulometrías que constituyen las partes o el yacimiento en su conjunto (Ostroumov 1985, Rojas-Purón 1995). Se observa, por ejemplo, que en la medida que disminuyen los contenidos de sílice y magnesio, aumentan los de hierro y níquel. Estos dos últimos tienden a concentrarse en las partículas más pequeñas (lamas de algunos micrones) mientras que los minerales que contienen cobalto, cromo y manganeso se concentran en partículas intermedias entre 200 y 20 micrones, y por su mayor densidad pueden ser separados de otros silicatos y óxidos acompañantes (Almaguer & Cerpa 1995). En la Figura 1 se expone el resultado del análisis efectuado a una muestra de pulpa, obtenida por Sobol (1968), alimentada a la tecnología ácida a presión.

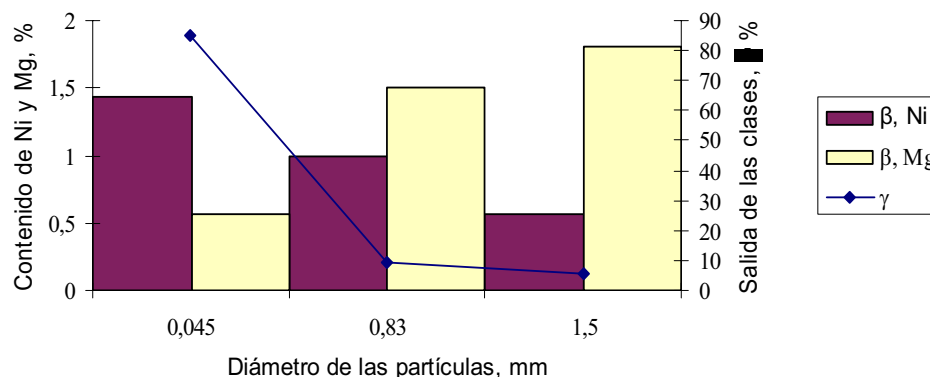


Figura 1. Contenido de Ni y Mg por clases de tamaño, mm.

Las barras representan el contenido de níquel y magnesio en las diferentes clases de tamaño y la curva, la salida o porcentaje de material en los intervalos granulométricos. Se pone de manifiesto un predominio de la clase de tamaño $-0,045$ mm, que representa el 85 % de la muestra; respecto al contenido de Ni y Mg la tendencia es a concentrarse en granulometrías diferentes: el contenido de níquel se enriquece hacia las partículas finas y el magnesio, por el contrario, en las gruesas.

Hasta el presente la utilización de operaciones de beneficio se ha visto limitada fundamentalmente por el grado de entrecrecimiento de los componentes útiles y la presencia de un alto contenido de lamas; hoy, dado que más del 50 % de las partículas se encuentran en el tamaño menor de diez micrómetros y atendiendo a los contrastes observados en las propiedades físicas de las fases minerales que conforman las lateritas, es posible considerar la separación de productos con mayores contenidos de níquel o cobalto y separar concentrados magnéticos con incremento del contenido de hierro y menos contenido de magnesio y aluminio, actividades que pueden favorecer el proceso extractivo (Falcón & Hernández 1993). Es por ello que el objetivo del presente trabajo es establecer, mediante el modelo Teoría de Separación (Tijonov 1990) y la realización de pruebas a escala de banco, la posibilidad del beneficio de la mena laterítica considerando el diámetro y susceptibilidad magnética de las partículas que la componen.

MATERIAL Y MÉTODO

Las pruebas se realizaron con material obtenido de tres muestras obtenidas a partir del flujo de alimentación a la planta Moa Níquel S.A -Pedro Soto Alba que presenta un valor estándar de 60 kg/h. La conformación de cada muestra se efectuó tomando cada una hora y de forma manual, una masa de 0,25 kg del material, para obtener un compósito de 2 kg en un turno de trabajo de ocho horas. Los ensayos a escala de banco se desarrollaron en la planta de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa según el esquema de trabajo que se expone en la Figura 2.

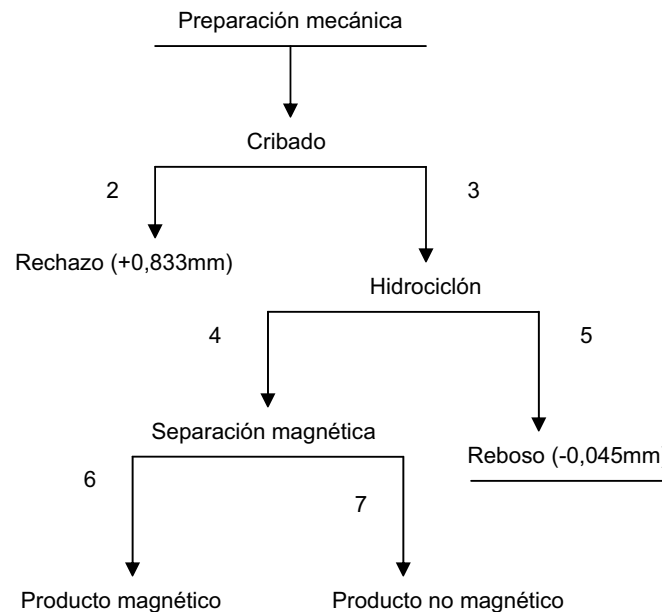


Figura 2. Esquema tecnológico para las pruebas de banco.

En las investigaciones se incluyeron las siguientes operaciones; cribado de los trozos mayores de 100 mm, trituración en un triturador de mandíbula semindustrial, con suspensión superior de las mandíbulas y movimiento simple, lavadora de paletas con eje de 1100 mm de longitud, con paletas rectangulares (50×40 mm) fijadas al eje formando un ángulo de 22°; el 66 % de las paletas están dispuestas para agitar y transportar el mineral que se lava y el resto para agitarlo y retenerlo dentro del equipo el tiempo necesario, la relación líquido - sólido y el tiempo de lavado se tomó según la práctica industrial, criba plana

con área de trabajo de 0,45 m² y orificios rectangulares con diámetro 0,833 mm. Los análisis químicos por espectroscopia de adsorción atómica (Espectrofotómetro CDN - 18) se realizaron en los laboratorios de la Moa Níquel S.A.-Pedro Soto Alba y el Centro de Investigaciones de las Lateritas.

Para el estudio del beneficio por la susceptibilidad magnética de las partículas se utilizaron los resultados del análisis magnético efectuado a la muestra en un Analizador de Tubo de Davi (Tabla 4). Como método de investigación para establecer el nivel de separación que teóricamente puede alcanzarse se utilizó el modelo del profesor Tijonov "Teoría de separación de minerales útiles".

Suponiendo que cada propiedad física se puede expresar a través de una variable real ξ la cual puede ser considerada como una variable aleatoria, entonces $\varepsilon(\xi)$, $\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$ representan respectivamente: la característica de separación del equipo, la función de distribución y el contenido de componente útil en las fracciones. El porcentaje de partículas que pasan al concentrado con respecto a la masa total será:

$$\bar{\gamma}_{Conc} = 100 \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \gamma(\xi) \varepsilon d(\xi) \quad \xi \quad (1)$$

La concentración del componente útil en el concentrado final se podrá obtener según:

$$\bar{\beta}_{Conc} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{Conc}} \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \beta(\xi) \varepsilon(\xi) d\gamma(\xi) \quad \xi \quad (2)$$

La extracción o recuperación $\bar{\varepsilon}_{Conc}$

$$\bar{\varepsilon}_{Conc} = (\bar{\gamma}_{Conc} * \bar{\beta}_{Conc}) / (\bar{\beta}_{Inic}) \quad (3)$$

Beneficio del mineral según el diámetro de las partículas

Para determinar las posibilidades de beneficiar, según el diámetro de las partículas (I), la pulpa de alimentación para la tecnología ácida a presión, los contenidos de componente útil (Ni) y estéril (Mg y Al) en el material inicial (pulpa) son funciones que dependen del diámetro de la partícula; para el estudio se tomó

como base de cálculo los resultados del análisis granulométrico y químico expuesto en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del análisis químico y granulométrico de la pulpa (Sobol 1968)

| Clases de tamaño (mm) | | Salida | Contenidos % | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------|--------------|------|-------|------|------|------|------|
| | | | γ (%) | Ni | Co | Fe | Al | Mn | Mg |
| I=1 | +0,833 | 5,5 | 0,43 | 0,05 | 46,2 | 8,4 | 0,52 | 1,5 | 1,66 |
| I=2 | - 0,833 + 0,045 | 9,5 | 1,00 | 0,31 | 35,32 | 7,97 | 1,79 | 1,81 | 3,85 |
| I=3 | - 0,045 + 0 | 85 | 1,44 | 0,12 | 48,6 | 4,8 | 0,60 | 0,56 | 1,46 |

La separación o beneficio se modela en un hidrociclón, considerando como concentrado el reboso o producto fino, que para la separación de minerales con un contenido inicial del 60 al 85 % de las clases menores de 0,045 mm, diámetro interior del cuerpo de 75 – 300 mm, contenido de sólido alrededor del 20 % y presión en la entrada de 0,02 a 0,025 MPa producen un reboso con un contenido de la clase -0,045 hasta el 98-99 % (Fomenko 1982) y la salida en el concentrado (reboso) de 50 a 55 %.

La característica de separación del hidrociclón para cualquier componente c y cualquier clase de tamaño i , se calcula por la ecuación:

$$e_{conc}(l_{ci}) = \overline{\gamma}_{conc} [(g_{conc}(l_{ci}) / (g_{Inic}(l_{ci}))] \quad (4)$$

Donde:

$\overline{\gamma}_{conc}$ es la salida del concentrado, dado en %.

γ_{conc} es la salida de la fracción en el concentrado, dado en %

γ_{Inic} es la salida de la fracción en la alimentación, dado en %.

l_{ci} es el diámetro para las partículas del componente c y la clase de tamaño i .

Con estos elementos y los índices tecnológicos de la separación (Tabla 2) pueden predecirse los resultados del beneficio por el diámetro de las partículas.

Tabla 2. Cálculo de los índices tecnológicos de la separación

| Argumento y Función | Valores Numéricos | | | Observación |
|---|--|-------------|-----------|-----------------------------|
| | i = 1 | i = 2 | i = n = 3 | |
| i | | | | |
| l i (mm) | 0,022 | 0,439 | 1,16 | |
| Δ l i (mm) | 0-0,045 | 0,045-0,833 | 0,833-1,5 | |
| γ (l i) Δ l i | 0,85 | 0,095 | 0,055 | $\sum = 1$ |
| β (l i) % Ni | 1,44 | 1,0 | 0,43 | $\bar{\beta}_{inic} = 1,34$ |
| β (l i) % Co | 0,12 | 0,31 | 0,05 | 0,13 |
| β (l i) % Fe | 48,6 | 35,32 | 46,2 | 47,2 |
| β (l i) % Al | 4,8 | 7,97 | 8,4 | 5,3 |
| β (l i) % Mn | 0,60 | 1,79 | 0,52 | 0,7 |
| β (l i) % Mg | 0,56 | 1,81 | 1,5 | 0,73 |
| β (l i) % Cr | 1,46 | 3,85 | 1,66 | 1,56 |
| ε_{conc} (l i) | 0,63 | 0,11 | 0 | |
| γ (l i) ε_{conc} (l i) Δ l i | 0,53 | 0,01 | 0 | |
| $\bar{\gamma}_{conc} = 100 \sum_{i=1}^n \frac{\gamma(l i) \varepsilon_{conc}(l i)}{\Delta l i}$ | $\bar{\gamma}_{conc} = (0,53 + 0,01) \cdot 100 = 54\%$ | | | |
| $100 \text{ g } (l i) \varepsilon_{conc}(l i) \Delta l i / \bar{\gamma}_{conc}$ | 0,98 | 0,018 | 0 | |

En la Tabla 3 se exponen los resultados completos de la separación. En el momento se puede diagnosticar, como resultado del beneficio, un incremento de níquel hacía el producto fino de la separación en 0,08 %. En el producto grueso o arenas de la clasificación se incrementan los contenidos de magnesio (0,24 %) y aluminio (1,04 %), además la separación de la pulpa inicial el 57 % del magnesio y el 50,62 % de aluminio constituye un beneficio sustancial del proceso en su conjunto por el alto consumo de H_2SO_4 de estos elementos en la lixiviación.

Tabla 3. Resultados de la separación por el diámetro de las partículas

| Productos Separados | Salida (%) | Contenido (%) | | | | | | Recuperación ξ (%) | | | | | |
|---------------------|------------|---------------|------|-------|------|------|------|------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| | | Ni | Co | Fe | Al | Mg | Cr | Ni | Co | Fe | Al | Mg | Cr |
| Fino (Conc) | 54 | 1,429 | 0,12 | 48,26 | 4,84 | 0,58 | 1,50 | 57,59 | 51,16 | 55,21 | 49,38 | 43,0 | 51,92 |
| Grueso | 46 | 1,21 | 0,16 | 44,49 | 6,34 | 0,97 | 1,66 | 42,41 | 48,84 | 44,79 | 50,62 | 57,0 | 48,08 |
| Pulpa | 100 | 1,34 | 0,13 | 47,2 | 5,3 | 0,73 | 1,56 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Beneficio según la susceptibilidad magnética de las partículas

Para evaluar el posible beneficio de la mena laterítica atendiendo al contraste que manifiestan las partículas que la componen respecto a su susceptibilidad magnética, se toma como base para el estudio el resultado del análisis magnético efectuado a una muestra mineral (-0,833 + 0,045 mm) cuya composición es la siguiente: Ni (0,97 %); Co (0,2 %); Fe (28,82 %); Al (6,7 %) y Mg (0,996 %).

El análisis se efectuó en un Tubo de Davi de acuerdo con la metodología para el trabajo con este equipo (Mitrofanov 1980): muestras diluidas de 5 gramos de mineral, tamaño medio de las partículas de 0,5 mm y limpieza periódica del producto magnético. Los resultados del análisis magnético y las características de separación, calculadas según las fracciones magnéticas en el alimentado y el concentrado se dan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados del análisis magnético

| Intensidad de corriente (A) | Salida de la fracción en la alimentación $100\gamma(I_i) \Delta I_i, \%$ | Contenido (%) | | | | | Salida de la fracción en el concentrado $100\gamma_{conc}(I_i) \Delta I_i, \%$ | $\xi_{conc}(I_i)$ |
|-----------------------------|--|---------------|------|-------|------|-------|--|-------------------|
| | | Ni | Co | Fe | Al | Mg | | |
| 1 | 5,91 | 1,08 | 0,28 | 40,09 | 3,81 | 0,996 | 5,85 | 0,989 |
| 3 | 19,86 | 1,26 | 0,26 | 33,71 | 7,49 | 1,08 | 8,58 | 0,432 |
| 5 | 9,74 | 1,09 | 0,37 | 43,94 | 6,26 | 2,12 | 1,47 | 0,15 |
| 7 | 6,26 | 1,50 | 0,30 | 22,50 | 6,75 | 1,48 | 0,58 | 0,09 |
| > 7 | 58,23 | 0,83 | 0,11 | 18,40 | 6,79 | 0,77 | 0 | 0 |

Estos resultados constituyen la base para el cálculo de los índices cualitativos y cuantitativos de la separación magnética, lo que se realiza de manera similar al efectuado anteriormente según la propiedad física diámetro de las partículas.

Es conocido que la propiedad física que se tiene en cuenta en el proceso de separación magnética es la susceptibilidad magnética, en este caso no fue posible determinar esta propiedad en las distintas fracciones magnéticas; no obstante las experiencias en este campo han reportado que en el analizador magnético tubular para intensidades de corriente de 1, 3 y 5 Amperes, pasan al producto magnético partículas minerales con susceptibilidades magnéticas medias de 240, 55 y 20 $\text{cm}^3 / \text{g} \cdot 10^{-6}$ respectivamente (Hernández-Flores 1998), es decir para pequeñas intensidades de corriente pasan los minerales de mayor susceptibilidad y viceversa; por esta razón en lo adelante se utilizará I_i por χ_i . Los índices resultantes de la separación, de acuerdo con las consideraciones antes expuestas, se muestran en la Tabla 5.

Tabla. 5. Índices de separación para diferentes niveles de corriente

| $\Delta I_i, \text{A}$ | 0 - 1 | 1 - 3 | 3 - 5 | 5 - 7 | 7 - 10 |
|--|-------|-------|-------|-------|--------|
| $\gamma (I_i) \varepsilon_{\text{conc.}}(I_i) \Delta I_i$ | 0,06 | 0,086 | 0,015 | 0,005 | 0 |
| $\bar{\gamma}_{\text{conc.}} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma}{100 (I_i) \varepsilon_{\text{conc.}}(I_i) \Delta I_i} = 16,6 \%$ | | | | | |
| $100 \gamma (I_i) \varepsilon_{\text{conc.}}(I_i) \Delta I_i / \bar{\gamma}_{\text{conc.}}$ | 0,36 | 0,51 | 0,09 | 0,03 | -- |

El contenido de los elementos en el producto magnético por la ecuación:

$$\bar{\beta}_{\text{conc.}} = 100 / \bar{\gamma}_{\text{conc.}} \sum_{i=1}^n \gamma \beta (I_i) \varepsilon_{\text{conc.}}(I_i) \Delta I_i; \text{ será:}$$

$$\bar{\beta}_{\text{Ni}} = 1,17 \% ; \quad \bar{\beta}_{\text{Co}} = 0,26 \% ; \quad \bar{\beta}_{\text{Fe}} = 36,25 \% ;$$

$$\bar{\beta}_{\text{Al}} = 5,95 \% ; \quad \bar{\beta}_{\text{Mg}} = 0,63 \% .$$

y la recuperación calculada por la fórmula convencional (8) queda:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{Ni}} = 7 \% ; \quad \bar{\varepsilon}_{\text{Co}} = 22,29 \% ; \quad \bar{\varepsilon}_{\text{Fe}} = 20,93 \%$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{Al}} = 14,77 \% ; \quad \bar{\varepsilon}_{\text{Mg}} = 10,55 \%$$

En la Tabla 6 se exponen los resultados totales de la separación o beneficio por la susceptibilidad magnética de las partículas. Convencionalmente, a los productos del beneficio magnético se le denominan concentrado y colas, como en todos los procesos de beneficio. Aquí se denominarán producto magnético y no magnético respectivamente, ya que este último puede resultar más conveniente para el proceso extractivo.

Tabla 6. Resultados de la separación magnética

| Productos del Beneficio | Salida | Contenido (%) | | | | | Recuperación ξ (%) | | | | |
|-------------------------|--------|-----------------|------|-------|------|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | (%) | Ni | Co | Fe | Al | Mg | Ni | Co | Fe | Al | Mg |
| Magnético | 16,6 | 1,17 | 0,27 | 36,25 | 5,95 | 0,63 | 20,07 | 22,29 | 20,93 | 14,77 | 10,55 |
| No Magnético | 83,4 | 1,00 | 0,19 | 27,33 | 6,85 | 1,07 | 79,93 | 79,71 | 79,03 | 85,23 | 89,45 |
| Alimentado | 100 | 0,97 | 0,20 | 28,82 | 6,70 | 0,996 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Si solo se toma en cuenta el contenido de los metales parecería que el producto más conveniente es el magnético, pero este solo representa el 16,6 % de la operación y un 3 % de la pulpa inicial. En el producto no magnético se obtiene la mayor extracción o distribución de cada uno de los metales por representar el 83,4 % de la separación. Pero además, en las pruebas efectuadas en los reactores en la planta de lixiviación (Sobol 1968) se observó que la mayor parte de níquel, cobalto y manganeso presentes en la fracción magnética no se lixivian, a causa de las grandes dimensiones de las partículas, su mayor densidad ($4\ 800\ \text{Kg/m}^3$) superior a la densidad media del mineral que es $3\ 550\ \text{Kg/m}^3$ y a la descomposición más lenta de la magnetita por lo que su separación de la mena alimentada al proceso extractivo puede constituir un beneficio a favor de mejorar los indicadores técnico-económicos del proceso. También se puede significar una mejora en la calidad de la mena alimentada al proceso extractivo la separación previa del 14,77 % y 10,55 % de aluminio y magnesio, respectivamente.

Pruebas a escala de banco

La preparación mecánica de la mena se efectuó según el método actual para la tecnología ácida y el beneficio por el esquema que se

muestra en la Figura 2. La prueba consistió en efectuar tres ensayos (corridas) que se desarrollaron de manera continua durante tres horas, tomando muestras en los diferentes puntos del esquema cada diez minutos (Hernández-Flores 1998). Con estas muestras se creó un compósito por ensayo y sobre este material se realizaron las pruebas de laboratorio.

En los productos del esquema de beneficio se observa que en el punto 2 (producto de rechazo) el contenido de níquel disminuye considerablemente, sin embargo el magnesio alcanza alta concentración. El producto magnético se caracteriza por el alto contenido de níquel, hierro y cobalto mientras el aluminio y el magnesio se concentran en menor medida. Por otra parte en el reboso del hidrociclón o producto fino el contenido de níquel es de 1,35 % y el magnesio de 0,92 %, resultando este producto el más conveniente para el proceso extractivo. En la Tabla 7 se exponen los contenidos promedios y las desviaciones estándar de los resultados de las pruebas realizadas a los compósitos de los tres ensayos (en %) para cada uno de los metales estudiados.

Tabla 7. Análisis estadístico (media aritmética y desviación estándar) de los tres ensayos con mineral de alimentación a la tecnología ácida

| Punto del Esquema | Salida (%) | | Ni | | Co | | Fe | | Mg | | Al | |
|-------------------|------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | \bar{X} | σ | \bar{X} | σ | \bar{X} | σ | \bar{X} | σ | \bar{X} | σ | \bar{X} | σ |
| 1 | 100 | 0 | 1,32 | 0,034 | 0,121 | 0,018 | 42,83 | 1,03 | 1,24 | 0,356 | 5,37 | 0,262 |
| 2 | 5,85 | 0,24 | 0,97 | 0,081 | 0,092 | 0,006 | 34,3 | 3,02 | 3,07 | 0,465 | 8,52 | 0,817 |
| 3 | 94,15 | 0,24 | 1,34 | 0,019 | 0,122 | 0,026 | 45,67 | 0,68 | 0,80 | 0,108 | 5,13 | 0,388 |
| 4 | 20,63 | 1,84 | 1,27 | 0,028 | 0,16 | 0,055 | 43,23 | 2,71 | 1,01 | 0,230 | 5,54 | 0,712 |
| 5 | 73,52 | 1,91 | 1,36 | 0,012 | 0,111 | 0,018 | 47,03 | 1,51 | 0,74 | 0,122 | 4,75 | 0,141 |
| 6 | 17,25 | 1,77 | 1,26 | 0,032 | 0,150 | 0,06 | 42,21 | 3,16 | 1,0 | 0,268 | 5,94 | 0,954 |
| 7 | 3,38 | 0,086 | 1,32 | 0,005 | 0,217 | 0,071 | 47,83 | 0,236 | 0,63 | 0,005 | 3,41 | 0,910 |

Análisis mineralógico

Tanto a los productos finales del esquema empleado en las pruebas a escala de banco (Figura 2) como a la muestra inicial se le realizó el estudio mineralógico utilizando técnicas de Difracción de Rayos X con un goniómetro alemán del tipo HZG- 4, para un generador de alto

voltaje TUR- M62 según un régimen de trabajo de 40 Kv y 30 mA, con radiación de Co K α (Hernández-Flores 1998).

La composición mineralógica del material alimentado es fundamentalmente de óxidos e hidróxidos de hierro, representada por las fases goethita, magnetita, (maghemita) y hematita. La goethita es la más abundante, detectable según los reflejos difactométricos: 4,18 - 4,14 A⁰; 2,43-2,44 A⁰ y 2,18-2,19 A⁰; en tanto la magnetita presenta 2,50-2,51 A⁰; 2,95 y 2,08 A⁰; por último la hematita está representada por: 2,68 A⁰; 2,08 y 1,83 A⁰. Es además significativa la presencia de silicatos de magnesio como lizardita, cloritas, cuarzo y, en menor grado, gibbsita.

El producto de rechazo se diferencia del alimentado por el predominio de las fases de silicato de magnesio (lizardita y clorita) que llega a ser mineral principal, además es notable la presencia de la fase de hidróxidos de aluminio (gibbsita), esto explica el incremento de aluminio y magnesio en este producto y por tanto una disminución en níquel y hierro.

En el punto 7 del esquema (producto magnético) de igual manera predominan los óxidos e hidróxidos de hierro y esto se corresponde con la formación de los yacimientos lateríticos a base de estos minerales; las fases principales por los reflejos difactométricos son: goethita (4,17 A⁰; 2,68 A⁰; 2,43 A⁰; 2,12 A⁰), magnetita (2,69 A⁰; 2,52 A⁰; 2,08 A⁰; 1,60 A⁰), hematita (2,68 A⁰; 2,52 A⁰; 2,17 A⁰; 1,82 A⁰) y maghemita (2,69 A⁰; 2,52 A⁰; 1,60 A⁰; 1,47 A⁰).

Por último, el rebose del hidrociclón (punto 5) se caracteriza por el contenido de las fases siguientes:

goethita (4,16 A⁰; 2,67 A⁰; 2,43 A⁰; 2,88 A⁰), hematita (2,75 A⁰; 2,48 A⁰; 2,21 A⁰; 1,82 A⁰; 1,72 A⁰) y magnetita (2,94 A⁰; 2,51 A⁰; 1,60 A⁰); estas aparecen como fases principales junto a otras menos significativas como maghemita, cuarzo, magnesio, cromita y gibbsita.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de la separación teórica y experimental indican que se pueden obtener productos homogéneos por su contenido mineralógico, químico y granulométrico. En el producto fino (-0,083 mm) se enriquece el contenido de níquel en 0,04 % y disminuye el contenido de magnesio y aluminio en 0,5 % y 0,52 % respectivamente, también en este producto predomina la fase mineral goethita, principal portadora de níquel; la concentración y/o separación de los componentes químicos y mineralógicos incrementan la calidad de este producto para el proceso extractivo al incrementarse el contenido del componente valioso y separarse otros altamente consumidores de ácido en la lixiviación.

En el producto magnético lógicamente la fase predominante resulta la magnetita y se experimenta un notable incremento en el contenido de cobalto, este, conjuntamente con el rechazo, pueden ser utilizados con otros fines por su alto contenido de cobalto, aluminio y magnesio. Su separación de la mena de alimentación a la tecnología HPAL constituye un beneficio para este proceso (Sobol 1968).

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos tanto de la separación teórica (frecuencia esperada) como los resultados a escala de banco (frecuencia observada) y no se manifiestan discrepancias significativas.

Tabla 8. Separación teórica y experimental

| Operación | Producto | Separación teórica | | | | | Separación experimental | | | | |
|----------------------|------------|--------------------|------|------|------|------|-------------------------|------|------|------|------|
| | | γ | Ni | Co | Mg | Al | γ | Ni | Co | Mg | Al |
| Alimentación | Alimentado | 100 | 1,34 | 0,13 | 0,73 | 5,3 | 100 | 1,34 | 0,12 | 0,8 | 5,13 |
| Hidrociclón | Arena | 18,4 | 1,02 | 0,20 | 0,99 | 6,70 | 21,9 | 1,27 | 0,16 | 1,01 | 5,52 |
| | Rebozo | 81,6 | 1,41 | 0,11 | 0,67 | 4,98 | 78,1 | 1,36 | 0,11 | 0,74 | 5,05 |
| Separación Magnética | Magnético | 3,05 | 1,17 | 0,27 | 0,63 | 5,95 | 3,59 | 1,32 | 0,22 | 0,63 | 3,41 |
| | Amagnético | 15,3 | 1,00 | 0,19 | 1,07 | 6,85 | 18,3 | 1,26 | 0,15 | 1,08 | 5,94 |

Para establecer la correspondencia entre los resultados teóricos (frecuencia esperada) y los de las pruebas a escala de banco (frecuencia observada) se utiliza una prueba estadística basada en la distribución χ^2 , o sea: Ji - Cuadrado, con Corrección de Yates (Spiegel 1986).

Para esta prueba se calcula el valor $\chi^2_e = \sum_{i=1}^n \frac{(|e_i - o_i| - 0,5)^2}{e_i}$ donde o_i son las frecuencias experimentales (observadas) y e_i son las frecuencias esperadas (teóricas). En el presente caso se obtiene que $\chi^2_e = 10,8399$.

También debe calcularse el valor χ^2_t de la distribución χ^2 para el nivel de confianza seleccionado que en este caso es de 0,95 y para los grados de libertad del problema que se calcula como $G=(F-1)(C-1)=16$ donde $F=5$ es el número de filas y $C=5$ es el número de columnas. De la tabla de Spiegel se obtuvo que $\chi^2_t = 26,3$. Considerando que $\chi^2_t > \chi^2_e$ se puede afirmar que no son significativas para ese nivel de confianza las diferencias entre las frecuencias observadas y esperadas o sea que los resultados experimentales corroboran la teoría (Spiegel 1986).

Para establecer de manera más precisa la correspondencia entre los resultados teóricos (frecuencia esperada **e**) y los resultados de las pruebas a escala de banco (frecuencia observada **o**), ahora serán realizadas pruebas análogas para las separaciones: γ , Ni, Mg y Al individualmente en el hidrociclón (arena y rebozo) y en el separador magnético (magnético y amagnético), donde son consideradas como frecuencias los valores de las separaciones. En este caso el número de eventos es $K=2$ y los grados de libertad $\nu = K-1=1$.

Se exponen la tabla de contingencia (Tabla 9) y los parámetros obtenidos al realizar la prueba de hipótesis para niveles de confianza de 95 % y de 99 %, utilizando la corrección de Yates. En los casos donde $\chi^2_t > \chi^2_e$ (lo que sucede siempre para $\alpha = 0,01$) se puede afirmar que no son significativas para ese nivel de significación las diferencias entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas.

Tabla 9. Tabla de contingencia y los parámetros para la prueba de hipótesis

| Variable | Caso | Frecuencias | | | χ^2_e | χ^2_t | |
|----------|------------------------|-------------|----------|----------|------------|------------|-----------------|
| | | o_{jh} | e_{jh} | o_{jm} | | e_{jm} | $\alpha = 0,05$ |
| | Arena y Rebozo | o_{jh} | 21,91 | 78,09 | 0,603 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jh} | 18,4 | 81,6 | | | |
| γ | Magnético y Amagnético | o_{jm} | 3,59 | 18,32 | 0,396 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jm} | 3,05 | 15,35 | | | |
| | Arena y Rebozo | o_{jh} | 1,27 | 1,36 | 4,50 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jh} | 1,02 | 1,41 | | | |
| Ni | Magnético y Amagnético | o_{jm} | 1,32 | 1,26 | 3,54 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jm} | 1,17 | 1,0 | | | |
| | Arena y Rebozo | o_{jh} | 0,161 | 0,11 | 0,033 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jh} | 0,2 | 0,111 | | | |
| Co | Magnético y Amagnético | o_{jm} | 0,217 | 0,15 | 0,310 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jm} | 0,27 | 0,19 | | | |
| | Arena y Rebozo | o_{jh} | 1,01 | 0,74 | 0,725 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jh} | 0,996 | 0,67 | | | |
| Mg | Magnético y Amagnético | o_{jm} | 0,63 | 1,08 | 0,515 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jm} | 0,63 | 1,07 | | | |
| | Arena y Rebozo | o_{jh} | 5,52 | 5,05 | 0,354 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jh} | 6,7 | 4,98 | | | |
| Al | Magnético y Amagnético | o_{jm} | 3,41 | 5,94 | 1,584 | 3,84 | 6,63 |
| | | e_{jm} | 5,95 | 6,85 | | | |

Donde:

o_{jh} : Frecuencia observada en el hidrociclón.

e_{jh} : Frecuencia esperada en el hidrociclón.

o_{jm} : Frecuencia observada en la separación magnética.

e_{jm} : Frecuencia esperada en la separación magnética.

$$\chi^2_e = \sum_{i=1}^2 \frac{(e_{im} - o_{im} - 0,5)^2}{e_{im}} \quad \text{ó} \quad \chi^2_e = \sum_{i=1}^2 \frac{(e_{ih} - o_{ih} - 0,5)^2}{e_{ih}} \quad \text{según el caso.}$$

α : Nivel de significación.

Nótese que, a pesar de los errores de clasificación que normalmente se manifiestan en las separaciones reales, se observa una discrepancia no significativa entre los índices de la separación a escala de banco y la separación teórica, además de acuerdo a las características de separación $\varepsilon(l)$ del hidrociclón y la función de distribución $\gamma(l)$ en dependencia del diámetro medio de las partículas.

Existe dependencia entre las variables $\varepsilon(l)$ y $\gamma(l)$, con respecto al diámetro de las partículas (l), lo que se describe por los correspondientes modelos exponenciales:

$$\varepsilon(l) = e^{0,456 - 2,27l - 8,65l^2}$$

$$\gamma(l) = e^{10,33 - 38,89l + 23,97l^2}$$

Donde el coeficiente de correlación para ambos casos es de 0,999. La Figura 3 muestra el comportamiento de la variable $\varepsilon(l)$ con respecto al diámetro de las partículas.

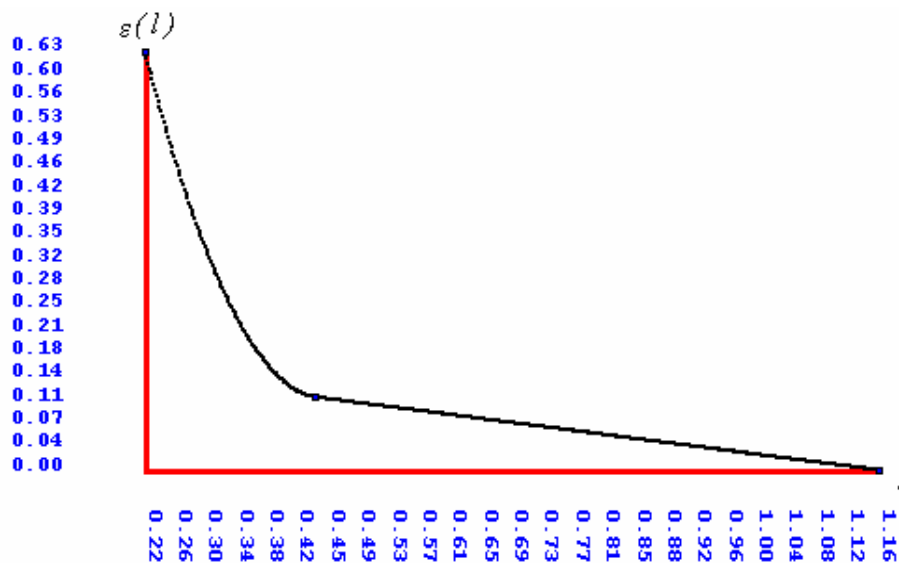


Figura 3. Dependencia entre $\varepsilon(l)$ y l .

De igual manera en la separación por la susceptibilidad magnética de las partículas, las ecuaciones de los modelos polinomiales $\varepsilon(I) = 1,258 - 0,59 I + 0,102 I^2 - 0,00598 I^3$ y $\gamma(I) = -0,011 + 0,176 I - 0,062 I^2 + 0,005 I^3$ expresan dependencia con la intensidad del campo magnético, para este caso los coeficientes de correlación respectivos son 0,999 y 0,996. En la Figura 4 se manifiesta la dependencia de la extracción con respecto a la susceptibilidad de las partículas.

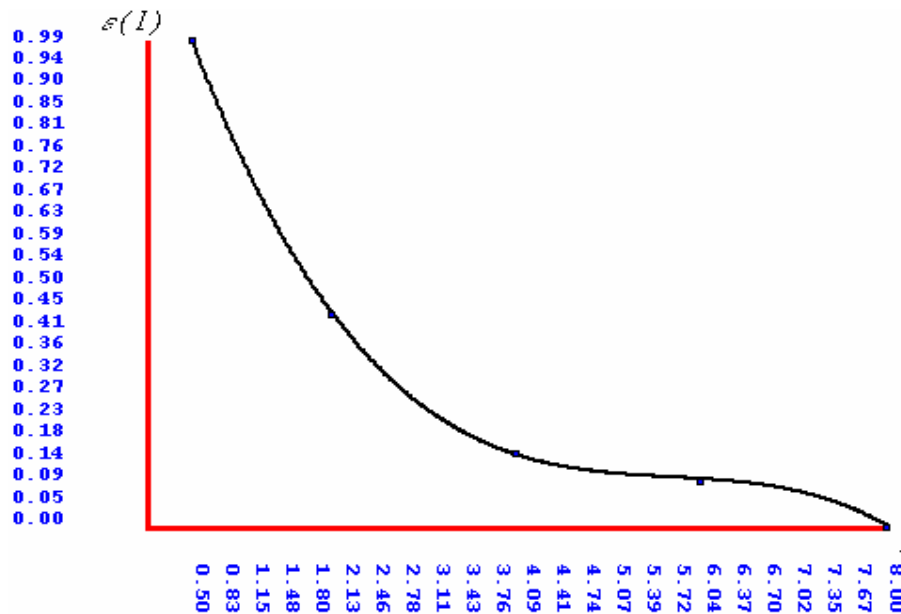


Figura 4. Dependencia entre e (I) y (I).

Como resultado de este análisis se pueden pronosticar los índices de la separación por vía húmeda para la pulpa laterítica (< 0,833 mm) en función del diámetro y la susceptibilidad magnética a través de los siguientes modelos:

$$\bar{\gamma}_{Conc.} = 100 \int_0^{\ell} \int_0^I \left[\left(e^{10,79-41,16\ell+15,27\ell^2} \right) \left(-0,013+0,22I-0,10I^2+0,06I^3-0,004I^4+0,0005I^5-0,00004I^6 \right) \right] dI d\ell$$

$$\bar{\beta}_{Conc.} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{Conc.}} \int_0^{\ell} \int_0^I \left[\beta(\ell, I) \left(e^{10,79-41,16\ell+15,27\ell^2} \right) \left(-0,013+0,22I-0,10I^2+0,06I^3-0,004I^4+0,0005I^5-0,00004I^6 \right) \right] dI d\ell$$

CONCLUSIONES

El contraste en las propiedades físicas que se manifiesta en las menas lateríticas hace posible su beneficio. Con la inclusión de variantes de esquemas tecnológicos en la preparación de la mena, para la tecnología húmeda, que contemplen operaciones de clasificación y separación magnética, se garantiza la calidad de la mena al separar y concentrar componentes y fases minerales.

Se logra establecer la característica de separación y la distribución de probabilidad para el equipamiento dada la correlación entre estas variables con el diámetro de las partículas y la susceptibilidad magnética.

Los resultados de las pruebas a escala de banco corroboran la posibilidad del beneficio de la mena laterítica según el diámetro y la susceptibilidad magnética de las partículas que la componen. Además del mejoramiento en la calidad de la mena alimentada al proceso HPAL que representa la separación de elementos nocivos, como magnesio y aluminio, se logra obtener productos homogéneos en su composición química y mineralógica que pueden ser utilizados con otros fines lo que propiciaría un uso racional y protección del recurso.

REFERENCIAS

- ALMAGUER, F.A. & CERPA, A. 1995: Composición de las pulpas limoníticas de la planta PSA. I parte. *Minería y Geología*, 12 (3):19-21.
- FALCÓN, J.F. & HERNÁNDEZ, A. 1993: Preparación mecánica de los minerales lateríticos. *Tecnología Química*, 3.
- FOMENKO, T.G. 1982: *Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación*. Moscú, Editorial Mir. 421 p.
- HERNÁNDEZ-FLORES, A. 1998. Preparación por vía húmeda de la mena laterítica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis Doctoral] 92 p.
- HERNÁNDEZ FLORES, A. & FALCÓN, J. 1993: Preparación y beneficio de minerales lateríticos en el proceso ácido a presión. *Minería y Geología*, 11 (3):17-21.
- HERNÁNDEZ-FLORES, A.; TOIRAC, M.; COELLO, A. L. 1995: Estudio preliminar para la obtención de concentrados de cromita a partir del yacimiento de corteza de intemperismo "Casimba" Pinares de Mayarí. *Minería y Geología*, 12 (2):23-26.
- MITROFANOV, K.A. 1980: *Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales*. Editorial Nedra, Moscú.
- OSTROUMOV, M. 1985: Estudio de la composición mineralógica de las lateritas de Moa por difracción de Rayos-X. *Minería y Geología*, 5 (1):23-30.

- ROJAS-PURÓN, A. L. 1995: Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis doctoral] 156 p.
- SOBOL, S.Y. 1968. Propiedades reológicas de las pulpas de mineral laterítico. *La minería en Cuba*, 4 (2).
- SPIEGEL, MURRAY R. 1986. *Teoría y Problemas de Estadística*. Edición Revolucionaria, La Habana.
- TIJONOV, O.N. 1990. *Beneficio de minerales útiles en Asia, Africa y América Latina*. Ed. Nedra, San Peterburgo.

Alberto Hernández Flores

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular Adjunto.
Oficina Nacional de Recursos Minerales, Cuba

ahflores@ecg.moa.minbas.cu

Aristides Legrá Lobaina

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Departamento de Matemáticas. Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

alegra@ismm.edu.cu

Rafael A. Trujillo Codorniux

Doctor en Ciencias Matemáticas. Profesor Titular
Departamento de Matemáticas. Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

juanrfag@infomed.sld.cu

María Magdalena Toirac Suárez

Máster en Ciencias Geológicas. Profesora Auxiliar. Departamento de
Matemáticas. Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

juanrfag@infomed.sld.cu