



**DONDE  
EL  
MANTENIMIENTO  
ES  
DIFERENTE,  
DONDE  
LA  
SOLUCIÓN  
ES  
ATÍPICA**

La Subdirección de Mantenimiento del Centro de Investigaciones de la Laterita, con más de 15 años de experiencia en el montaje, puesta en marcha, mantenimiento y servicios técnicos de plantas piloto, miniplantas, bancos de prueba e instalaciones de laboratorio para la investigación de los procesos de la industria minera del níquel, así como otras ramas afines, acomete trabajos de construcción de prototipos de equipos y plantas completas para la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y ofrece servicios de asesoría en:

- Accionamiento eléctrico.
- Mantenimiento y organización.
- Soldadura.
- Mecánica industrial.
- Mecánica automotriz.
- Instrumentación.
- Control automático de plantas y procesos.
- Electrónica.
- Computación.

El personal, ampliamente calificado y de perfil amplio, puede realizar el *procurement* de los materiales y el montaje o reparación en tiempo *record* a pie de obra sólo contando con la tarea técnica y los materiales para su realización.

**¡OFRECEMOS FLEXIBILIDAD Y EXPERIENCIA!**

**bús  
que  
mos**



## *Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombros laterítico*

**Dr. Alfredo L Coello L. Velázquez  
Ing. Pedro E. Beyris Mazar  
Ing. Alberto Hernández Flores  
Ing. Beatriz Ramírez Serrano**

Instituto Superior Minero Metalúrgico. Las Coloradas, Moa, Holguín. Cuba

**RESUMEN:** Con el objetivo de determinar las posibilidades de preconcentración mecánica del escombros laterítico se estudia la distribución fraccional de una muestra de 10 toneladas del Yacimiento Atlántico. Mediante los métodos fraccionales con separadores ideales de laboratorio se establecen las funciones de distribución diferenciales  $\gamma$  ( $\epsilon$ ) y  $\beta$  ( $\epsilon$ ) en dependencia de las propiedades de separación: tamaño de la partícula e intensidad del campo magnético. Los resultados del trabajo demuestran la posibilidad de preconcentración del Co y el Fe por vía mecánica, tomando como propiedad de separación el tamaño de las partículas minerales y la intensidad del campo magnético. El cobalto es posible concentrarlo hasta 0,140 %; el hierro, hasta 61 %.

**ABSTRACT:** With the objective of determining mechanical previous concentration possibilities on the lateritic overburden it is studied the fractional distribution of a 10 tons sample from the Atlantic Deposit. Using fractional methods with suitable laboratory separators, the differential distribution functions are established and  $\gamma$  ( $\epsilon$ ) and  $\beta$  ( $\epsilon$ ) according to separation properties: particle size and the magnetic field intensity. The results of the investigation demonstrate that is possible to make cobalt and the iron previous concentration using mechanical via, taking as separation property the size of the ore particles and the intensity of the magnetic field. It is possible to concentrate cobalt up to 0,140 %, and Fe up to 61 %.

### INTRODUCCIÓN

Cuba posee una de las mayores reservas de mineral laterítico, las cuales han sido exploradas para la recuperación del níquel y el cobalto, sin embargo estos minerales contienen cantidades apreciables de otros componentes valiosos como el aluminio, cromo e hierro.

La extracción minera se realiza garantizando contenidos superiores a 0,9 % de Ni; el material con contenidos menores a este límite, son considerados escombros (residuales). Estos se almacenan o son utilizados en las vías mineras.

Los volúmenes de escombros generados por la industria minera cubana del Ni supera los 3 millones de toneladas anuales. Estas grandes acumulaciones de mineral fuera de balance ocasionan un serio desequilibrio en el ecosistema de la región y fuera de ella.

Los desastres ecológicos ocasionados por el escombros están relacionados con la destrucción de las áreas boscosas y el consecuente deterioro de la fauna; la erosión de los suelos y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, lo cual se recrudece con los altos niveles de precipitación de la región. Las frecuentes lluvias arrastran hacia el mar las partículas finas del escombros, lo que provoca el enturbiamiento de las aguas marinas e impide la penetración de la luz solar hasta las zonas fóticas normales, por lo que se reduce así la vitalidad del ecosistema en una primera etapa.

La ulterior acumulación de los escombros en el lecho marino (J. Miranda, 1996) tiene una fuerte incidencia en el sistema ecológico marino, la cual puede incrementarse por la acción de los vientos alisios a causa del enturbiamiento de las aguas. Por otra parte, los escombros son una fuente enorme de polución.

De acuerdo a los datos geológicos existentes la potencia de los escombros oscila entre 0,5-5 m. Los contenidos de níquel varían ente 0,5-0,9 %, de hierro de 40-52 %, el cromo oscila entre 2-3 % y el aluminio entre 8,5-13,3. El cobalto es de 0,07 %.

E. Fernández (1991) investigando la recuperación del aluminio, propone una tecnología que permite la extracción de más del 75 % de este metal, preconcentrando de esta forma el Ni y el Co en las colas. La principal deficiencia de la mencionada tecnología consiste en el alto costo del reactivo lixivante (NaOH) y las dificultades relacionadas con su recuperación.

Anand Rao *et. al.* (1994) y G.V. Rao *et. al.* (1994) a partir de las ferralitas del yacimiento de Sukinda (India) obtuvieron preconcentrados con valores de

Ni cercanos al 1 % mediante el empleo de esquemas combinados de clasificación y flotación con una recuperación del 30 al 75 % .

P.A. Rojas y M.G. Orozco (1994) durante el estudio mineralógico de los horizontes limoníticos le fue imposible obtener fracciones puras de hematitas y gibbsitas, en su opinión esto obedece a la íntima asociación del último a la goethita en tanto que junto a la hematita aparecen la goethita y magnetita.

A juzgar por los resultados de Lago y Volikov (1991) la gibbsita puede ser separada, se concentra en las fracciones - (0,83 + 0,74 mm).

En los trabajos dedicados a la separación mecánica de las lateritas por P.A. Rojas y P. Beyris (1994), V. Lago y Volikov (1991); H.J. Falcón *et. al.* (1992), S.I. Sovol (1994) está presente el clasismo de los métodos de investigación del beneficio de minerales; como regla, se estudian una o más propiedades de separación bajo los conceptos clásicos de las curvas de beneficiabilidad o el contraste de las propiedades físicas.

El enfoque clásico en la investigación de la beneficiabilidad de los minerales (curva de beneficiabilidad y contraste de propiedades físicas, físico-químicas u otras) no brinda toda la información necesaria para el pronóstico y diseño tecnológicos en el tratamiento de menas complejas por las siguientes razones:

- Las partículas minerales se diferencian no por una propiedad física, sino por varias, lo cual implica el uso de diferentes métodos de beneficio.
- Las partículas minerales son portadoras no sólo de un mineral útil, sino son portadoras de varios componentes útiles.

Las curvas de beneficiabilidad constituyen una vía eficiente para la evaluación de la separación de menas cuyos minerales se diferencian en una sola propiedad física  $\xi$  (densidad  $\rho$ , susceptibilidad magnética  $\chi$  y otras).

Tijonov (1984) demuestra matemáticamente la posibilidad del cálculo de los parámetros de la curva de beneficiabilidad a partir de las funciones de distribución diferencial másica y de contenido.

Por otra parte, el índice de contraste (desviación ponderada relativa del contenido del componente útil, fórmula 1) a pesar de ser posible su utilización como criterio valorativo, brinda una información extremadamente pobre sobre la materia prima mineral.

$$I_{const} = \beta_{inic.}^{-1} \left[ \sum_{i=1}^n |\beta - \beta_{inic.}| * q \right] \quad (1)$$

donde :

- $\beta_{inic.}$  : contenido inicial de la mena;
- $\beta$  : contenido del componente útil en el grano;

$q$  : unidades másica de los granos en la muestra;

$n$  : número de granos en la muestra.

El índice de contraste según Tijonov (1984) se puede expresar como:

$$I_{const} = \beta_{min.}^{-1} \int_{\xi_{min.}}^{\xi_{max.}} |\beta(\xi) - \beta_{inic.}| \gamma(\xi) d\xi \quad (2)$$

donde:

$\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi)$ : distribuciones diferencial másica y de contenido.

De la fórmula (2) se puede apreciar que menas con distintos grados de beneficiabilidad  $\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi)$  pueden tener igual índice de contraste, de manera que no es aconsejable el uso de este criterio para menas complejas (multicomponentes); como medida de beneficiabilidad puede conducir a errores impredecibles.

La desviación media probable ( $E_p$ ,  $E_{cont.}$  probable) comúnmente no es usada para la evaluación de la eficiencia de operaciones unitarias como las mesas de concentración, canales helicoidales, separadores cónicos, etcétera, debido a la gran cantidad de variables operacionales que pueden afectar la eficiencia de la separación (B. Wills, 1992). Además, como en el caso anterior, no ofrece información alguna de las características de la materia prima mineral o producto de la separación.

La función de distribución diferencial  $\gamma(\xi)$  de las partículas de cualquier mezcla de cualquier propiedad física  $\xi$ , es aquella función para la cual el producto  $\gamma(\xi) d\xi$  es igual al fracción másica de cualquier intervalo elemental  $[\xi, \xi + d\xi]$  y su incremento  $d\xi$ ; la función  $\gamma(\xi)$  no es otra cosa que la distribución diferencial de la densidad de distribución del sólido en las fracciones elementales (O.N. Tijonov, 1984).

Por su parte, la función  $\beta(\xi_i)$  es una función continua del conjunto de valores de los contenidos medios del componente útil (o nocivo) en cada fracción  $i$  [ $\xi_i, \xi_{i+1}$ ] cuando  $\Delta\xi \rightarrow 0$  y  $n \rightarrow \infty$  (número de fracciones) en el intervalo  $[\xi_{min.}, \xi_{max.}]$ .

Por tal motivo, las funciones  $\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi_i)$  son un medio sencillo, necesario y suficiente para la caracterización de cualquier materia prima mineral o producto. Otro método utilizado ( $I, E_p$ ) es insuficiente o excesivamente complicado como es el caso de las curvas de beneficiabilidad, cuando los componentes se diferencian por más de dos propiedades físicas. Estas funciones de distribución no sólo permiten el cálculo de los indicadores clásicos del beneficio, sino también se puede realizar el pronóstico de los índices tecnológicos de cualquier esquema de beneficio, independientemente de la propiedad de separación.

El trabajo tiene como objetivo caracterizar el escombro laterítico para su preconcentración mecánica a través de la determinación de las funciones de distribución  $\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi_i)$ .

### MÉTODOS Y MATERIALES

La muestra inicial fue tomada de la zona menífera del yacimiento "Atlantic" con una masa de 10 ton con ayuda de una mototrailla y buldócer, y trasladada al laboratorio de Beneficio del ISMM. De la pila, mediante la combinación del muestreo por redes y puntos se conformaron tres muestras compósitos para la investigación.

Las muestras fueron sometidas a una rigurosa homogenización y cuarteo por el método del anillo y el cono; el cuarteo se realizó con un divisor de Jones.

La composición granulométrica se realizó por vía seco-húmeda y húmeda. El análisis fraccional magnético se realizó en el tubo de Davis y un separador electromagnético del tipo de cinta por vía seca. Tanto las fracciones de tamaño, como las de intensidades del campo magnético, se sometieron al análisis químico por AA y FRX. Los resultados fueron tratados en EXCEL 7.0, a partir de los cuales se determinaron las funciones de distribución y los modelos matemáticos de predicción de los índices teóricos para el análisis de las posibilidades de preconcentración.

### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### Análisis fraccional según el tamaño de las partículas

La función de distribución  $\gamma(l)$  (Tablas 1 y 2) resulta diferente por ambos métodos. Es evidente que las partículas finas se distribuyen en todo el espectro granulométrico [ $l_{min.}, l_{max.}$ ]; por vía húmeda la salida de la clase (0,4 - 0) mm aumenta en más de un 23 % con respecto al análisis seco-húmedo. El contenido real de la clase - 0,045 mm supera el 45 %.

TABLA 1. Resultados experimentales de la función  $\gamma(l)$  (vía seco-húmedo)

Clase de tamaño, mm	Tamaño de partícula, mm	Magnitud del intervalo de clase $\Delta l$ , mm	$\gamma(l)$ , 1/mm	$\gamma(l) \cdot \Delta l$
0 - 0,045	0,023	0,045	0,95	0,042 8
0,045 - 0,074	0,06	0,029	0,448	0,013
0,074 - 0,1	0,087	0,026	0,423	0,011
0,1 - 0,4	0,250	0,3	0,293	0,088 1
0,4 - 1,6	1,00	1,2	0,143	0,172 1
1,6 - 3,15	2,375	1,55	0,141	0,218 3
3,15 - 4,75	3,95	1,6	0,124	0,198 3
4,75 - 8,0	6,375	3,25	0,044	0,142 2
+ 8	8,00	3,25	0,035	0,114 2

TABLA 2. Resultados experimentales de la función  $\gamma(l)$  (vía húmeda)

Clase de tamaño, mm	Tamaño de partícula, mm	Intervalo de clase $\Delta l$ , mm	$\gamma(l)$ , 1/mm	$\gamma(l) \cdot \Delta l$
0 - 0,045	0,023	0,045	7,316	0,332 8
0,045 - 0,4	0,213	0,355	0,376	0,133 7
0,4 - 1,0	0,7	0,6	0,16	0,098 3
1,0 - 2,38	1,69	1,38	0,102 2	0,141 1
2,38 - 4,75	3,57	2,37	0,062	0,147 1
4,75 - 8	6,38	3,25	0,026 1	0,084 8
+ 8	8,00	3,25	0,019 1	0,062 2

La función  $\beta(l)$  para los principales elementos del escombro laterítico se manifiesta de diferentes formas (Tablas 3 y 4), tanto por vía seco-húmeda, como húmeda. El níquel se concentra hacia las fracciones finas independientemente del procedimiento seguido. No obstante, sufre un empobrecimiento en el análisis húmedo, lo cual guarda relación con la íntima asociación de la goethita, la gibbsita y de otras fases minerales en los terrones lateríticos, los cuales al desintegrarse bajo la acción del agua, provoca el aumento del contenido de otros elementos en las clases más finas. Esta regularidad está presente también en los yacimientos lateríticos de la región de Nicaro (F.A. Almaguer y V. Zamarzy, 1993). Por otra parte el níquel está asociado a las goethitas, asbolanas, espinelas (magnetitas-maghemitas-cromoespinelas) y magnetitas (I.I. Ginzgurg *et. al.*, 1951; K. Nikitin, 1952; Ammom Chokroum, 1972; P.A. Rojas y M.G. Orozco, 1994), siendo la goethita el principal portador (S. Sobol, 1968; V. Aleojin *et. al.*, 1968; F.A. Almaguer y V. Zamarzy, 1993; P.A. Rojas, 1996), los cuales no escapan al efecto de la desintegración del agua.

La función de distribución  $\beta(l)$  para el Co no sigue la misma regularidad. Por el método seco-húmedo, no hay una tendencia definida, sin embargo, por vía húmeda existe cierta concentración en las fracciones (0,4+0,045) y (1,0 +0,4) mm. Es justo señalar que precisamente hacia esas clases se enriquece también el Mn. Esta correlación también es reportada en los trabajos de F.C. Almaguer y V. Zamarzy (1993) es importante señalar que el Co está asociado a los óxidos e hidróxidos impuros de Mn. Ammon Chokroum (1972) aunque no deben descartarse las posibles inclusiones del Mn y Co en las ferrihidritas (R. Carnell y R. Giovanoli, 1989), lo cual en nuestra opinión puede ser la causa de la indefinición de la regularidad del Co, sobre todo el estado natural granulométrico del escombro.

El Al tiende a enriquecerse hacia las fracciones (-0,4 + 0,045) mm en la forma granulométrica natural del

escombro. Su concentración máxima se alcanza en la fracción (1,6 +0,1) mm, aunque su dispersión es pequeña debido a que sus principales portadores: gibbsita (P.A. Rojas y M.G. Orozco, 1993) cromita y las asbolanas (Ammon Chokroum, 1972), están distribuidas en mayor o menor medida en todo el espectro granulométrico.

Según la función de distribución  $\beta(\beta)$  del Cr, este se distribuye de una manera bastante heterogénea sin seguir una regularidad definida, aunque sí se observa una concentración en las clases (0,1+0,04) mm. Ammon Chokroum (1972) reporta que el Cr en las ferritas está asociado a las cromitas y limonitas; esto explica su comportamiento.

La sílice tiene una clara tendencia a distribuirse en mayor grado hacia las fracciones gruesas.

La función de distribución de contenido del Fe muestra una concentración de este elemento hacia las fracciones -0,045 mm y +3,15 mm por ambos métodos.

El Fe es portado prácticamente por todas las fases minerales presentes en las lateritas: goethitas, hidrogoethitas, magnetitas, hematitas, cromoespinelas, asbolanas (Ammon Chokroum, 1972).

**TABLA 3. Resultados experimentales de la función  $\beta(I)$  (vía seco-humedo)**

Tamaño de las partículas, I, mm	Contenido de los elementos %					
	x		y		y	
	Ni	Co	Fe	Al	Cr	SiO <sub>2</sub>
0,023	0,68	0,014	44,8	7,02	1,86	0,9
0,06	0,57	0,016	41,8	8,03	2,29	0,87
0,087	0,48	0,017	40,3	8,92	2,62	0,86
0,250	0,41	0,016	39,9	9,48	2,04	0,86
1,00	0,3	0,015	40,1	9,42	2,06	1,03
2,38	0,25	0,014	44,0	7,45	2,27	1,07
3,95	0,22	0,014	47,3	6,58	2,17	1,13
6,38	0,24	0,019	48,3	6,52	2,15	1,18
8,00	0,24	0,015	48,4	6,35	2,13	1,25

**TABLA 4. Resultados experimentales de la función  $\beta(I)$  (vía húmeda)**

Tamaño de las partículas, I, mm	Contenido de las especies metálicas, %			
	Ni	Co	Mn	Fe
0,023	0,40	0		
0,223	0,35	0,053	0,485	39,18
0,700	0,24	0,033	0,319	40,16
1,69	0,20	0,017	0,129	46,24
3,565	0,17	0,016	0,111	52,77
6,375	0,19	0,025	0,136	53,83
8,000	0,19	0,023	0,142	43,55

**Distribución fraccional de acuerdo a la susceptibilidad magnética**

La función de distribución de contenido según la intensidad del campo magnético (susceptibilidades magnéticas) aparece reflejada en la Tabla 5; como se aprecia para todos los elementos analizados (Ni, Co, Fe, Mn y Cr) la regularidad de separación está bien definida, aumentando paulatinamente los contenidos de Ni, Co, Mn y Fe hasta la intensidad del campo magnético igual a 4 A, en este intervalo de intensidad del campo, se recuperan los minerales con susceptibilidades magnéticas de 380 a 44 cm<sup>3</sup>/g • 10<sup>-6</sup>. El incremento paulatino de los elementos se hace más notable para el Fe por las razones antes expuestas (se encuentran asociado a casi todos los minerales presentes) de acuerdo a las susceptibilidades magnéticas los minerales se recuperan en el orden siguiente: magnetita y maghemita, asbolanas, hematitas y las goethitas, hidrogoethitas y cromoespinelas. Aquí se pone de manifiesto la estrecha relación entre el Co y el Mn, y el Ni y el Fe.

**TABLA 5. Resultados experimentales de la función  $\beta(I)$  (vía húmeda)**

Intensidad de la corriente I, A	Contenido de los elementos, %				
	Ni	Co	Fe	Mn	Cr
0,5	0,36	0,017	39,3	0,095	0,006
2	0,38	0,017	39,7	0,10	0,03
4	0,47	0,027	40,9	0,15	0,33
6	0,40	0,018	39,5	0,12	2,45
7	0,24	0,014	39,1	0,21	3,81

En resumen, de acuerdo a las regularidades que siguen las funciones de distribución considerando una sola propiedad: tamaño de partícula (I) o intensidad del campo magnético (I), sólo es posible separar fracciones enriquecidas en Ni, Fe por el tamaño, y Ni, Co, Mn, Fe al tomar como propiedad de separación la susceptibilidad magnética, sin embargo, en ninguno de los casos responde a las exigencias tecnológicas de un preconcentrado. Más abajo se exponen los modelos de distribución según los cuales teóricamente se pueden establecer los principales índices tecnológicos de la separación.

Por vía seca

$$\bar{\gamma}_i(I) = \int_{I_{min}}^{I_{max}} (3,29 + 0,415 I^2)^{-1} dI \quad (3)$$

$$\beta^{Ni}(I) = (\bar{\gamma}_i)^{-1} \int_{I_{min}}^{I_{max}} \xi(I) \left( \frac{0,53 + 0,14 I + 0,014 I^2}{3,29 + 0,415 I^2} \right) dI \quad (4)$$

La función  $\xi(I)$  se puede establecer experimentalmente para cualquier equipo de separación:

$$\beta^{Fe}(I) = (\bar{\gamma}_i)^{-1} \int_{I_{min}}^{I_{max}} \xi(I) \left( \frac{41,41 + 101 I}{3,29 + 0,415 I^2} \right) dI \quad (5)$$

Por vía húmeda

$$\beta^{Ni}(I) = (\bar{\gamma}_i)^{-1} \int_{I_{min}}^{I_{max}} (0,39 - 0,11 I + 0,011 I^2) \xi(I) dI \quad (6)$$

$$\beta^{Fe}(I) = (\bar{\gamma}_i)^{-1} \int_{I_{min}}^{I_{max}} \xi(I) (43,87 - 1,19 I) dI \quad (7)$$

Los cálculos anteriormente expuestos por las ecuaciones, demuestran que es imposible la obtención de preconcentrados con la calidad tecnológica requerida utilizando una sola propiedad de separación.

**Funciones de distribución  $\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi)$  por el tamaño y la susceptibilidad magnética de las partículas**

A diferencia de las funciones de distribución  $\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi)$  por una sola propiedad de separación, la función  $\gamma(I, I)$  (por el diámetro y la susceptibilidad magnética) no sigue una tendencia regular (Tabla 6) lo cual demuestra que la distribución másica de los minerales en intervalos de susceptibilidades magnéticas es heterogénea en el espectro granulométrico del escombro laterítico.

**TABLA 6. Resultados experimentales de la función  $\gamma(I, I)$  (vía húmeda)**

Tamaño de las partículas, I, mm	Contenido de las especies metálicas				
	Intensidad de corriente, A				
	0,5	2	4	6	7
0,223	0,014	0,008 5	0,002 4	0,001 7	1,39
0,700	0,002 3	0,004	0,001 8	0,001 2	0,824
1,69	0,009	0,008 6	0,003 6	0,002 1	0,339
3,565	0,033	0,029 3	0,009 1	0,006 1	0,355
6,375	0,023	0,021	0,008 1	0,003 6	0,251
8,000	0,011	0,012	0,006 8	0,004 9	0,273

La función  $\beta(I, I)$  para Ni preestablece que no es posible lograr contenidos que satisfagan los requerimientos tecnológicos de un mineral de balance (>0,9 %) sin embargo, si se observa un enriquecimiento de las clases finas (<1,0 mm) a intensidades de campo de 4 A, precisamente a esta intensidad de campo le corresponde una susceptibilidad magnética de 44.10<sup>-6</sup> cm<sup>3</sup>/g, a la cual se recupera la mayor cantidad de goethitas e hidrogoethitas cuya susceptibilidades magnéticas es de 42 • 10<sup>-6</sup> cm<sup>3</sup>/g (B. Kulikov et. al., 1985) ver Tabla 7.

**TABLA 7. Resultados experimentales de la función  $\beta(I, I)$  para el níquel**

Tamaño de las partículas, I, mm	Contenido de las especies metálicas				
	Intensidad de corriente, A				
	0,5	2	4	6	7
0,223	0,26	0,47	0,54	0,31	0,36
0,700	0,41	0,51	0,61	0,33	0,17
1,69	0,12	0,11	0,12	0,13	0,25
3,565	0,14	0,12	0,12	0,12	0,20
6,375	0,13	0,13	0,13	0,13	0,22
8,000	0,11	0,13	0,12	0,12	0,21

El Co muestra una distribución homogénea para fracciones de tamaño superior a 1,0 mm independientemente de los intervalos de intensidades de campo, sin embargo, a intensidades de campo de 2 A y fracciones de tamaño de -1,0 mm se enriquece en más de 8 veces con respecto a los casos anteriores (Tabla 8).

**TABLA 8. Resultados experimentales de la función  $\beta(I, I)$  para el cobalto (vía húmeda)**

Tamaño de las partículas, I, mm	Contenido de las especies metálicas				
	Intensidad de corriente, A				
	0,5	2	4	6	7
0,223	0,099	0,139	0,087	0,016	0,052
0,700	0,092	0,130	0,125	0,019	0,032
1,69	0,013	0,015	0,019	0,019	0,017
3,565	0,013	0,013	0,014	0,017	0,017
6,375	0,019	0,020	0,014	0,019	0,026
8,000	0,020	0,018	0,018	0,018	0,024

La función  $\beta(I, I)$  para el Fe se establece la concentración de este elemento fundamentalmente hacia fracciones de tamaño mayores de 6 mm con intensidades de campo menor de 2 A. Para este caso la función  $\beta(I, I)$  sigue una regularidad definida, se enriquece hacia los intervalos de tamaño mayores, y se empobrece con el incremento de los intervalos de intensidades de campo (Tabla 9).

Más abajo aparecen los modelos de pronóstico de la distribución de contenido.

$$\beta_c^{Co} = \frac{0,125}{\bar{\gamma}_i} \int_0^{I_{max}} \int_{I_{min}}^{I_{max}} \xi(I, I) (0,079 - 0,007 I - 0,004 I) dI dI \quad (8)$$

$$\beta_c^{Ni} = \frac{0,125}{\bar{\gamma}_i} \int_0^{I_{max}} \int_{I_{min}}^{I_{max}} \xi(I, I) (0,33 - 0,03 I - 0,001 I) dI dI \quad (9)$$

$$\beta_c^{Fe} = \frac{0,125}{\bar{\gamma}_i} \int_0^{I_{max}} \int_{I_{min}}^{I_{max}} \xi(I, I) (56,09 + 1,06 I - 1,596 I) dI dI \quad (10)$$

Los cálculos por los modelos (8, 9 y 10) para  $\xi(1,1)=1$  (separación ideal) pronostican la posibilidad de obtener productos preconcentrables de Co y Fe con concentraciones de 0,130 - 0,139 % y > 60 % respectivamente.

**TABLA 9. Resultados experimentales de la función  $\beta(l,1)$  para el hierro (vía húmeda)**

Tamaño de las partículas, $l$ , mm	Contenido del elemento, %				
	Intensidad de corriente, A				
	0,5	2	4	6	7
0,223	53,5	56,9	40,18	59,25	39,0
0,700	58,7	54,0	49,32	51,41	40,0
1,69	57,4	56,7	57,4	55,6	45,5
3,565	57,7	58,0	58,3	57,3	51,6
6,375	61,0	59,1	58,1	58,6	52,5
8,000	60,3	58,3	55,4	55,0	48,5

### CONCLUSIONES

Los métodos clásicos para el estudio de la beneficiabilidad del escombro laterítico no permiten obtener la información real de su posible tratamiento mecánico dada la complejidad mineralógica del material. La separación de este material en varios componentes considerando una sola propiedad de separación, es imposible.

La utilización del enfoque fraccional por más de una propiedad de separación, pronostica la posibilidad de su procesamiento mecánico para la obtención del preconcentrado de Co y Fe; las funciones de distribución  $\gamma(1,1)$  y  $\beta(1,1)$  por el tamaño y la susceptibilidad magnética así lo demuestran. El empleo de más de una propiedad de separación permite acotar los límites de separación de las fases mineralógicas presentes en el escombro laterítico.

### Simbología

$\beta_c$ : Contenido del concentrado para el Co, Ni y Fe, %.

$\gamma_i$ : Salida del concentrado, %.

$\xi(1,1)$ : Característica de separación del equipo, unidades.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMMON CHOKROUM, M.: *Contribución a la valoración de los ferralitas de Nueva Caledonia*, vol. 1, p. 170, Universidad de Kancy, 1972.
2. ALEJOIN, V. et. al.: *Informe sobre los trabajos de exploración geológica y orientativa en el yacimiento Punta Gorda*, Moa, 1977.
3. ALMAGUER, F. A. y V. ZAMARZY: «Estudio de la distribución del hierro, níquel y cobalto en los tamaños de los granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía», *Rev. Minería y Geología*, vol. 2, no. 2, 1993.
4. WILLS, B.: *Mineral processing technology*, 5ta Edition, Pergamon Press. Oxford. N.Y. Seonl., Tokyo, 1992.
5. CARNEL, R. y R. GIOVANNOLI: *Effect of cobalt on the formation of crystalline ion oxides from ferrihydrite in alkaline media*. *Clay and Clay minerals*, vol. 37, no. 1, pp. 65-70, 1989.
6. FALCÓN, H.J.; F.A. HERNÁNDEZ y C.G. CARTHU: *Beneficio de minerales Lateríticos. Utilización de perspectivas*, monografía, ISMM, Moa, 1992.
7. FERNÁNDEZ, M.E.: *Sovershenstvovanie pererabotki oksidnogo nikelivirovanogo sukheto kompleksno izpolzovanie rud. Disc. ha isk uch sten. Cand. tejn nauk*, L. G. I., Leningrado, 1991.
8. GINSBURG, I. et. al.: *Minerales de la corteza de intemperismo Antigua de los Urales*, Academia de Ciencias de la URSS, 1951.
9. KULIEKOV, B., et. al.: *Mineralogichesky spravochnik. Tejnologa obogatitelja*, Nedra, Moskva, 1984.
10. LAGO, L. y Y. VOLUIKOV: *Disminución de los principales consumidores de ácido en lixiviación*, Seminario Internacional sobre Tecnología de Lixiviación ácida de los minerales lateríticos, Moa, noviembre, 1991.
11. NIKITIN, K.K.: *Corteza de intemperismo de las rocas ultrabásicas del macizo Burkal*, De. Naura, 1962.
12. ROJAS, P.A. y M.P. BEYRIS: «Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la Industria Pedro Soto Alba», *Rev. Minería y Geología*, vol. 11, no. 1, 1994.
13. ROJAS, P.A. y M.G. OROZCO: «Iniciación al estudio de las fases minerales fortalecedoras de níquel en el horizonte limonítico del yacimiento Moa», *Rev. Minería y Geología*, vol. 11, no. 2, 1994.
14. SOBOL, S.I.: «Composición de las lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de minerales por ácido sulfúrico en autoclaves», *Rev. Tecnológica*, no. 5 y 6.
15. TONOV, O.N.: *Zakonomiarnosti effektivnovo Razzdelenia mineralov v protsessaj obogashenia poliezuj oscopaemij*, Nedra, Moskva, 1984.
16. ANAND RAO, V.K.; T. SKEENIVAS; R. NATARAJAN and N.K. RAO: *Preconcentration of the nickel values from lateritic chomite ore overburden, Sukinda, Orissa, India. International Symposium. The Problems of complex ore utilization (Cu, Ni, Co, Sn, Al, Mg, Ti and Noble Metals)*, p. 112, Saint Petersburg, 1994.
17. RAO, V.; S.R.S. SATRY; F.E. SCHEIDER and H. HOBERG: *Amphoteric collectors to enrich nickel from lean lateritic chomite overburden. International Symposium. The Problems of complex ore utilization (Cu, Ni, Co, Sn, Al, Mg, Ti and Noble Metals)*, p. 111, Saint Petersburg, 1994.

# Aspectos de la termodinámica de la precipitación-oxidación de sulfuros de níquel y cobalto

Neicis Capote Flores\*  
Luis Javier Fiffe Muguercia\*\*  
Raquel María Acosta Chávez\*\*\*

\* Máster en Química Metalúrgica. Investigador agregado, Centro de Investigaciones de la Laterita  
\*\* Doctor en Ciencias Químicas. Profesor titular del departamento de Química de la facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la Universidad de Oriente  
\*\*\* Doctor en Ciencias Químicas. Profesor titular del departamento de Química de la facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la Universidad de Oriente

### INTRODUCCIÓN

En los momentos actuales los aspectos teóricos que tratan de explicar los procesos metalúrgicos y que conforman su teoría, se basan en el estudio relacionado con las reacciones químicas que se llevan a cabo en las mismas y que pueden ser analizadas desde tres criterios diferentes (Habashi, 1980).

1. Análisis de la transferencia de energía y la posibilidad de que las reacciones químicas tengan lugar a una determinada temperatura, lo cual se denomina enfoque termodinámico.
2. Análisis de la velocidad con que transcurren las reacciones químicas, así como el mecanismo que explica las transformaciones, lo cual se denomina enfoque cinético.
3. Análisis de los procesos de transferencia electrónica que se manifiesta en el momento en que se efectúan las reacciones químicas, lo cual se denomina enfoque electroquímico.

Con el fin de lograr la separación de cobalto y elevar la calidad de los productos finales: óxido y sínter, hace aproximadamente una década, se implantó previa a la separación del carbonato de níquel (II), una modificación al proceso carbonato-amoniacoal. Al tratar la solución con hidrogenosulfuro de amonio en determinadas condiciones se logra una precipitación selectiva del cobalto (II) y no significativa de níquel (II) en forma de sulfuros de níquel más cobalto, que en el argot industrial, se conocen como sulfuros mixtos. Se ha detectado que los sulfuros obtenidos por esta vía, experimentan una reacción de oxidación violenta en el momento en que son separados del medio de reacción. Este fenómeno puede provocar inflamación del producto lo que dificulta su almacenamiento y transportación.

Hasta el presente, se han realizado diferentes trabajos de investigación sobre el proceso de precipitación-oxidación de los sulfuros mixtos obtenidos en el proceso carbonato-amoniacoal, enfocados generalmente hacia cómo tratar dicho material para que no ocurra la oxidación violenta con inflamación; no obstante aún persisten incógnitas sobre el fundamento teórico de los procesos de precipitación y oxidación, y las condiciones energéticas bajo las cuales estas transcurren.

Al considerar lo expuesto anteriormente se presentan los resultados de los cálculos realizados para determinar la variación de energía libre y la constante de equilibrio de las posibles reacciones que se llevan a cabo en el proceso de precipitación-oxidación de los sulfuros de níquel y cobalto en medio amoniacoal.

**RESUMEN:** En los momentos actuales, los aspectos teóricos que tratan de explicar los procesos metalúrgicos, y que conforman su teoría, se basan en el estudio relacionado con las reacciones químicas que se llevan a cabo en los mismos y que pueden ser analizados a través de la transferencia de energía y la posibilidad de que las mismas tengan lugar a determinada temperatura.

En el presente trabajo se calculan a diferentes temperaturas las funciones termodinámicas del proceso de precipitación-oxidación de sulfuros mixtos obtenidos al tratar los licores producto de la lixiviación carbonato-amoniacoal con soluciones de hidrogenosulfuro de amonio.

Como las reacciones químicas propuestas se llevan a cabo en disoluciones acuosas, y por la carencia de datos termodinámicos referente a las especies iónicas, los cálculos de funciones como: energía libre y constante de equilibrio, se realizaron a través del Principio de Correspondencia de la Entropía, desarrollado por Criss y Cobble.

**ABSTRACT:** In the current moments, the theoretical aspects that try to explain the metallurgical processes, and that conform their theory, are based on the study related with the chemical reactions that are carried out on its and that could be analyzed through the energy transference and the possibility of take place to determined temperature.

In this work are carried out calculations of thermodynamics functions to several temperatures of the precipitation-oxidation process of mixed sulphides gotten upon trying the liquors product of the ammonium-carbonate leaching with solutions of ammonium hydrogensulphide.

As the proposed chemical reactions are carried out in aqueous solutions and because the absence of thermodynamics data with respect to the ionic species the calculations of thermodynamics functions like: free energy and equilibrium constant, were carried out through the Correspondence Principle of Entropy developed by Criss and Cobble.