

Optimización del flujo de aire específico para la lixiviación estándar QT del mineral reducido en el proceso Caron

Antonio R. Chang-Cardona
Armando Rojas-Vargas

Resumen

El propósito del artículo fue fundamentar experimentalmente la optimización del flujo de aire específico, para las condiciones de la prueba QT, a partir del contenido de Fe^{2+} en el mineral reducido, aportado por la medición de los potenciales redox en la pulpa antes de airearla. Se estableció un procedimiento gráfico rápido, efectivo y económico que permite decidir la región óptima de los flujos de aire específicos para iniciar la lixiviación de la prueba QT y se demuestra la ventaja técnico-económica de utilizar valores del flujo de aire entre 1,3 y 1,8 $\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$, según varíe el contenido de Fe^{2+} en el mineral reducido, con los que se garantizan máximos extractables de cobalto y de níquel. Se obtuvieron, además, los modelos empíricos (regresión polinómica de segundo orden) que permiten predecir los extractables máximos de ambos metales bajo las condiciones experimentales estudiadas.

Palabras clave

Extracciones de Ni y Co; lixiviación carbonato-amoniaca; optimización; flujo específico de aire; prueba QT.

Optimization of specific air flow rate for QT standard leach of the reduced laterite ore in the Caron process

Abstract

The objective of this article is to provide experimentally the foundations for optimizing the air flow rate under the conditions of the QT test based on the Fe^{2+} contained in the reduced ore, obtained by the measurement of redox potential in the slurry before aerating. An effective and cost-economic graphic was quickly established to select the optimal area of specific air flow rates to start leaching of the QT test. From the economic and technical point of view, the results indicated better performance in using air flow rates between 1.3 and 1.8 $\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$ as the Fe^{2+} contained in the reduced ore varies. This leads to the optimization of the values of extractable cobalt and nickel. Empirical models (second-order polynomial regression) were also obtained to forecast the maximum values of extraction for both metals under the studied experimental conditions.

Keywords

Nickel and cobalt extractions; ammoniacal carbonate leach process; optimization; air flow rate.

1. INTRODUCCIÓN

Los índices de eficiencia de recuperación de los metales en la tecnología carbonato amoniacal (TCA) se determinan a partir del valor de la extracción obtenida en el proceso de lixiviación y del extractable logrado en los hornos de reducción.

Se denomina "extractable" a la máxima extracción que es posible obtener durante la lixiviación; al procedimiento para su determinación se le denomina "prueba QT", sobre la cual se basa la contabilidad metalúrgica del níquel y el cobalto en las plantas de Hornos de Reducción y de Lixiviación, y por ende, una parte importante de la economía de la empresa está sujeta a esos resultados.

Entre otras aplicaciones conocidas de la prueba QT se encuentran estudios geológicos de actualización de reservas minerales para su procesamiento industrial; obtención de modelos de pronósticos para recuperar níquel y cobalto en la lixiviación; optimización de los parámetros de operación en hornos de reducción, como son los perfiles de temperatura en hogares, cámaras y por ciento de petróleo aditivo para menas con diferente composición mineralógica.

Estudios publicados previamente (Chang *et al.* 1989; Chang 2000; Rojas-Vargas 2007; Chang y Rojas 2009a) demuestran que la deficiencia fundamental de la metodología de la prueba QT radica en que se aplica un flujo específico de aire grande y constante durante todo el tiempo de retención de la pulpa en el reactor, sin tener en cuenta en el mineral reducido (MR) el contenido de hierro soluble, representado como Fe^{2+} , no obstante a ser mayoritario. La intensidad de aireación provoca elevadas pérdidas de cobalto y alguna pérdida de níquel por segregación en la superficie de los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH) que se forman durante la lixiviación.

La realidad actual es diferente, ya que los yacimientos originales para los cuales se diseñaron las plantas de Nicaro y Punta Gorda se agotaron y hoy se procesan menas de menor calidad. Además, el cobalto se ha convertido en un producto valioso para las plantas metalúrgicas. Las investigaciones desarrolladas en las pasadas décadas en Cuba, así como la experiencia industrial en la planta de Punta Gorda en los últimos años avalan la necesidad de perfeccionar la metodología de la prueba QT por sus resultados contradictorios, sobre todo para los extractables de cobalto.

Avances científicos recientes han permitido complementar el conocimiento sobre la naturaleza electroquímica de las pérdidas de

cobalto y níquel por pasivación de la aleación que forman ambos con el hierro durante la reducción, así como sobre las vías prácticas para atenuarlas (Nikoloski *et al.* 2003; Nicol *et al.* 2004), que justifican la validez del método de control del aire por el potencial redox de la pulpa en la lixiviación carbonato-amoniaco de la mena reducida.

El presente trabajo tiene el objetivo de fundamentar experimentalmente, para las condiciones de la prueba QT, la optimización de los flujos de aire específicos (Q_a), diferenciándolos por tipo de MR según el contenido de Fe^{2+} obtenido de los potenciales redox en la pulpa antes de airearla. Ello permitirá modificar el procedimiento actual de la lixiviación estándar QT.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del reactor y de los materiales empleados

El estudio se realizó en la planta piloto de Nicaro. El turbo-aireador empleado en la prueba QT pertenece al Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) y tiene un volumen útil de ocho litros, que corresponde a un diámetro del tanque de 220 mm y una altura de 270 mm; el tanque posee 4 baffles de 30 mm de ancho; el diámetro del difusor de aire es de 30 mm. El agitador mecánico es un impelente de disco con cuatro paletas rectas con las siguientes dimensiones: diámetro del impelente 80 mm, diámetro del disco 60 mm, ancho de las paletas 15 mm. La velocidad de agitación fue de 700 rpm (min^{-1}), la cual garantizó un régimen turbulento superior a su semejante industrial. El licor empleado para los experimentos se preparó a partir de licores tomados del proceso industrial, a saber:

1. Licor fresco con una concentración de amoníaco entre $120-125 g.dm^{-3}$ y una relación amoníaco-dióxido de carbono entre 1,7-1,8.
2. Licor de recirculación de la planta de Recuperación de Amoníaco con $135-140 g.dm^{-3}$ y una relación amoníaco-dióxido de carbono entre 1,6-1,7.
3. Hidróxido de amonio con $200-220 g.dm^{-3}$ de amoníaco.
4. Agua destilada.

Por balance de masa se determinó el volumen de cada solución para preparar el licor lixivante con las especificaciones requeridas en los experimentos.

El mineral reducido se muestreó puntualmente durante un turno de trabajo en uno de los enfriadores de mineral, tomándose dos kitsatos metálicos con aproximadamente 500 g de mineral cada uno. Este recipiente debe estar provisto de un tapón de goma, lo suficientemente ajustado, y de un pedazo de manguera en el tubo lateral con una presilla ajustada, de forma tal que no haya posibilidad de entrada de aire para evitar la reoxidación del mineral. Antes de llenar los kitsatos, estos se purgan con gas inerte para desplazar todo el aire contenido, luego se cierra la boca con el tapón de goma y se aprieta la presilla.

Las muestras de mineral reducido se ordenaron de forma descendente según el contenido de Fe^{2+} , designándolas por C_i , tal y como se representa en la Tabla 1, donde $i = 1, 2, 3, 4, 5$. El subíndice (T) significa contenido total del elemento en el mineral reducido.

Tabla 1. Composición (en %) del mineral reducido

Elementos	Fe^{2+}	Fe^0	Fe_T	Ni_T	Ni^0	Co_T	S
Muestras MR							
C_1	31,5	3,09	45,1	1,35	1,12	0,111	0,62
C_2	29,8	3,15	46,6	1,37	1,14	0,110	0,62
C_3	28,0	2,46	47,5	1,32	1,12	0,113	0,52
C_4	26,6	2,37	49,0	1,30	1,08	0,101	0,63
C_5	24,9	2,10	46,5	1,21	0,90	0,107	0,53

Se tomó el contenido de Fe^{2+} como indicador de la reducción diferenciada del MR por ser el componente mayoritario de los que se reducen y el que mejor expresa el grado de transformación del resto de los metales durante el proceso de reducción de la mena laterítica. El contenido de Fe^{2+} en condiciones de producción es variable por las diferencias en el estado técnico de los más de 20 hornos de la planta, por problemas subjetivos de los hombres que conforman cada turno de trabajo y por la variación periódica de la calidad de la mena tecnológica que se alimenta.

El aire provino de una línea de suministro desde los compresores del proceso industrial. Para garantizar su estabilidad, la presión de alimentación del aire al laboratorio se controló con una válvula y un manómetro. Antes de alimentar el aire al rotámetro, se pasó por un erlenmeyer con lana de vidrio para recoger la humedad y se midió la presión con un manómetro del tipo reloj para detectar alguna tuplición en la descarga del burbujeador. La temperatura del aire fue la ambiente y se fijó la presión de descarga al turbo-aireador entre 0,4 y 0,7 $kgf.cm^{-2}$ (39,2 y 68,7 kPa).

2.2. Diseño de los experimentos

Para los experimentos de lixiviación se prepararon un licor y una pulpa con propiedades aproximadamente constantes, variando Q_a y el porcentaje de Fe^{2+} en el mineral reducido. Las condiciones de las pruebas se describen a continuación.

Variables fijas:

- Temperatura ambiente: 25-28 °C
- Concentración de amoníaco $C(NH_3)$: 90 g.dm^{-3}
- Relación amoníaco/dióxido de carbono (NH_3/CO_2) = 1,8
- Masa de mineral reducido: 500 g
- Volumen de licor: 7 dm^3
- Relación líquido/sólido: 14/1
- Tiempo de lixiviación total: 180 min

Parámetros variables:

- Contenido de Fe^{2+} en MR, %.
- Flujo específico de aire, en m^3 de aire por cada tonelada métrica (t) de MR y minuto de aireación (min), simplificadaamente [$\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$]. También se le denomina velocidad o intensidad de aireación.

Variables dependientes:

- Extracción del níquel (%)
- Extracción del cobalto (%)
- Potencial redox de la pulpa, E_x (mV)

Los experimentos (R_i) se repitieron tres veces ($i = 1, 2, 3$); la matriz experimental se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz experimental

Tipo de MR	$Q_{ar} \text{ m}^3 / (\text{t}\cdot\text{min})$					
	1,1	1,3	1,5	1,8	2,5	3,5
C1....C5	R1	R1	R1	R1	R1	R1
	R2	R2	R2	R2	R2	R2
	R3	R3	R3	R3	R3	R3

El rango de variación del flujo específico de aire entre 1,1 y 1,8 se tomó de los trabajos publicados (Chang-Cardona *et al.* 1989; Chang-Cardona 2000), sus máximos valores de 2,5 y 3,5 se corresponden con los empleados en la industria y en la prueba QT actual.

Se tomaron muestras de pulpa en intervalos de tiempo de: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 25, 50, 75, 100, 150, 180 minutos. En el caso del sólido final, la extracción se determinó a partir de los 100 min.

El flujo de aire se midió con un rotámetro del tipo C6, de duraluminio, cuyo tubo hueco posee una escala adimensional, calibrándose por la parte superior del flotante por la que se confeccionó una carta equivalente de flujos en $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. En la Tabla 3 se muestran los datos correspondientes al régimen de aireación empleado en cada caso.

Tabla 3. Flujos de aire empleados y recálculo por tonelada de mineral reducido

$Q_a, \text{m}^3 / (\text{t} \cdot \text{min})$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,5	3,5
Flujo de aire (cm^3/min)	550	650	750	900	1 250	1 750
Escala rotámetro C6	3,3	4,1	4,7	5,5	6,9	8,8
Volumen específico de aire, m^3/t	198	234	270	324	450	630

Se aplicaron los métodos de análisis químicos que acepta el sistema de calidad de la industria cubana del níquel (Tabla 4). El método de Espectrofotometría de Absorción Atómica se empleó para determinar Fe, Ni y Co. Por el método volumétrico se determinó Fe^{2+} , NH_3 y CO_2 , y por el gravimétrico, el S. El error absoluto (en %) de los análisis fue el siguiente: $\text{Ni}_T = 0,02$; $\text{Ni}^0 = 0,12$; $\text{Co}_T = 0,009$; $\text{Fe}_T = 0,45$; $\text{Fe}^{2+} = 0,5$; $\text{Fe}^0 = 0,25$; $\text{S} = 0,02$; $\text{NH}_3 = 0,8$; $\text{CO}_2 = 0,7$.

Tabla 4. Composición química cualitativa

Etapas	Composición química				
Mineral reducido	Los que se indican en la Tabla 1				
Licor inicial	NH_3	CO_2	S	-	-
Licor final	Ni	Co	NH_3	CO_2	S
Sólido final	Ni	Co	Fe	-	-

Teniendo en cuenta la existencia en el MR de dos grupos diferenciables de contenido de azufre (Tabla 1), se monitoreó la concentración de este elemento en el licor debido a su posible efecto de pasivación sobre el Fe^0 y sus aleaciones y como reductor de los hidroxocomplejos de Fe^{3+} que desaceleran la oxidación de los iones de hierro en el

licor (Chang & Rojas 2009b) y que provocan que las pérdidas de Co con los OHH por segregación disminuyan, y por tanto se incremente el extractable de Co.

El potencial redox de la pulpa se midió en un pH-mV-metro portátil con electrodo combinado Platino-Calomel, cuyas características del productor español son: CRISON PH25 S/N 425005 L-429 ELECTRODO 5055. En cada uno de los tiempos de toma de muestra se extrajeron 100 cm³ de pulpa, la que se reincorporó al turbo-aireador después de leído el potencial. La precisión de dicha medición fue de ± 1 mV.

Los resultados de los análisis químicos se procesaron por Microsoft Office Excel 2003 y se calcularon los extractables de Ni y Co por las fórmulas empleadas en la empresa niquelífera de Nicaro. También por este software se realizó el análisis de regresión de los extractables en función de la variación de Q_a y el por ciento de Fe^{2+} en MR con el correspondiente análisis estadístico y gráfico. En las figuras, el Fe^{2+} se representa como Fe(II).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las siguientes figuras (de 1 a 5) muestran los resultados del análisis estadístico y gráfico de los datos.

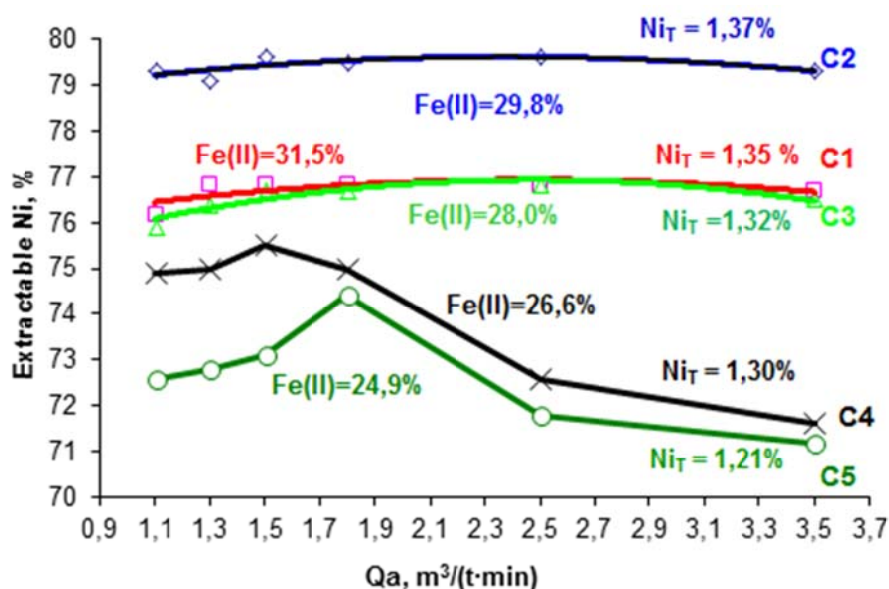


Figura 1. Efecto de la variación de Q_a y el por ciento de Fe(II) en MR sobre el extractable de Ni.

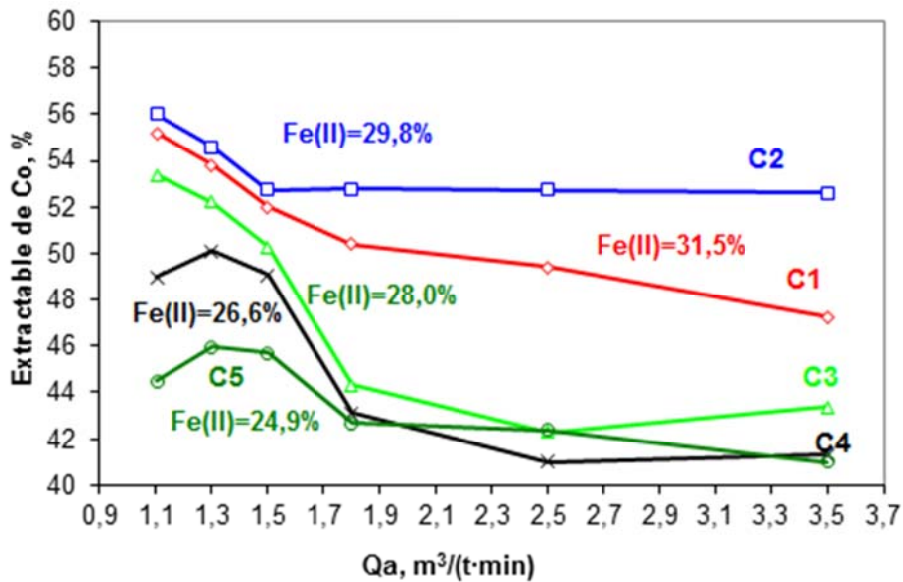


Figura 2. Efecto de la variación de Q_a y el por ciento de Fe(II) en MR sobre el extractable de Co.

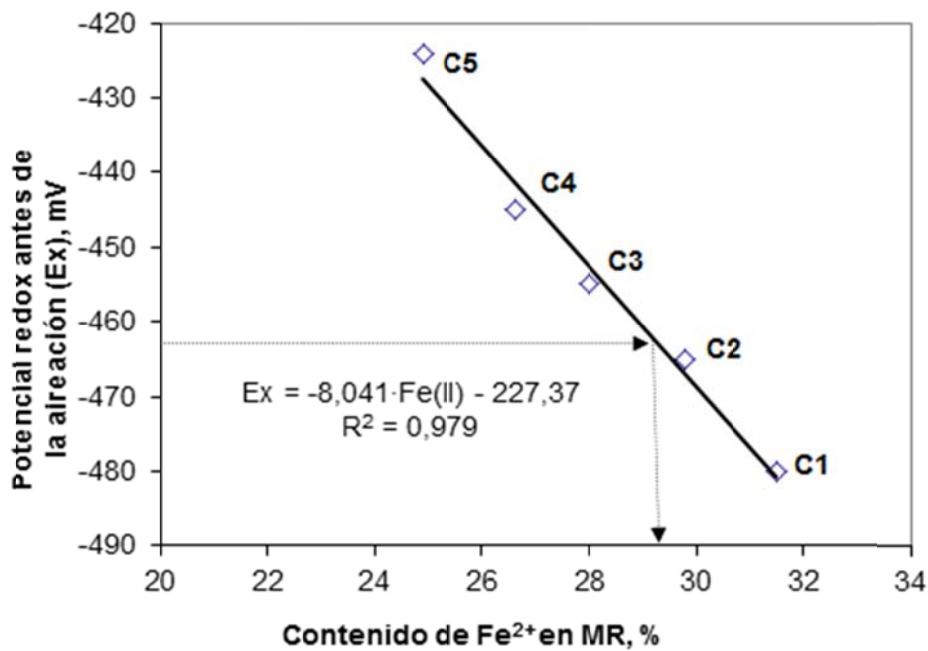


Figura 3. Correlación entre el potencial redox de la pulpa antes de airearla y el contenido de Fe(II) en MR.

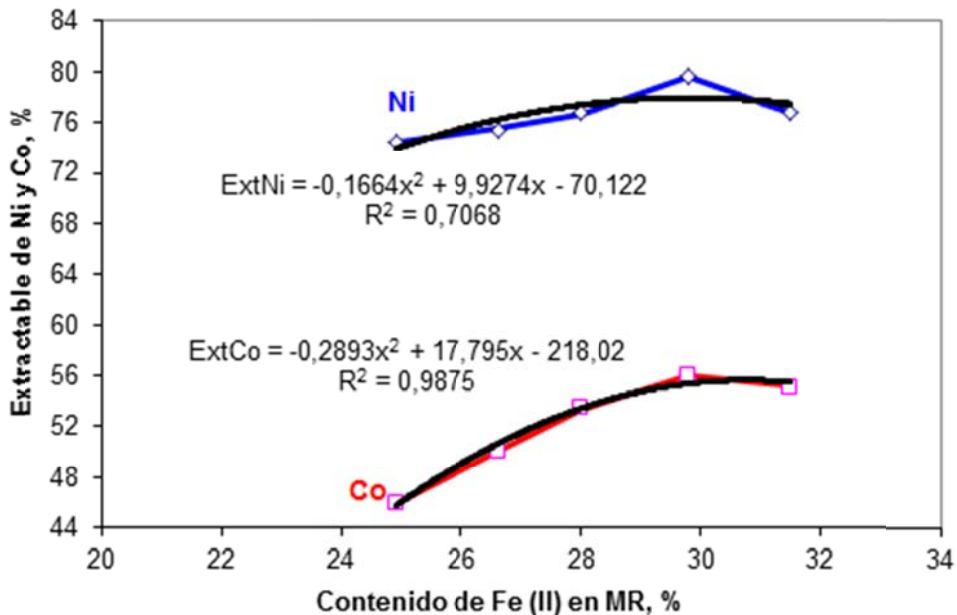


Figura 4. Extractables potenciales de Co y su comparación con los de Ni a Q_a óptimos en dependencia del por ciento de Fe(II) en MR.

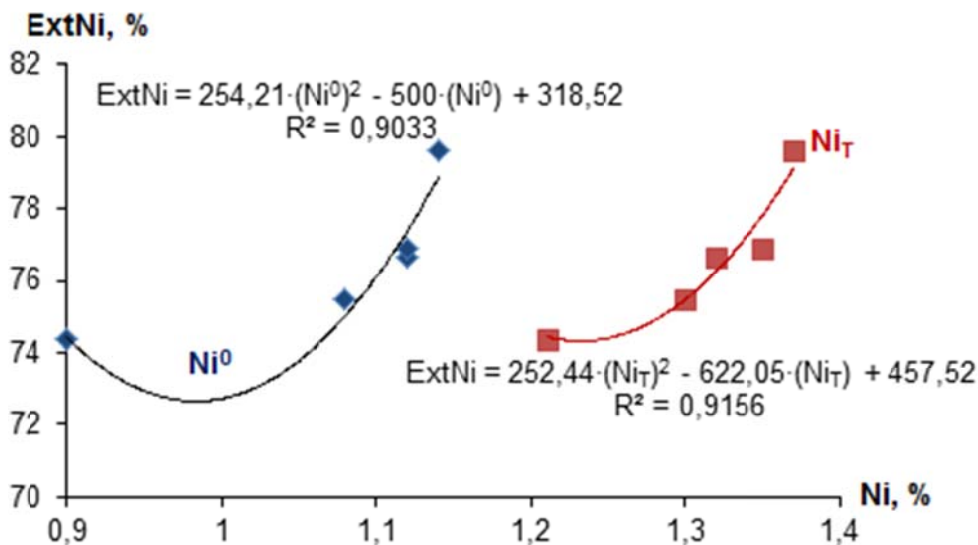


Figura 5. Extractables potenciales de Ni a Q_a óptimos entre (1,5–1,8) $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ en dependencia del contenido de Ni metálico y total en MR.

3.1. Optimización del flujo de aire específico Q_a

En las Figuras 1 y 2 se muestran las extracciones de Ni y Co transcurridos los 180 minutos de lixiviación, en función de la velocidad de aireación Q_a . En estas figuras se aprecia que las extracciones de níquel y cobalto alcanzan un máximo, cuyas posiciones respecto a Q_a ,

se ubican entre 1,3 y 1,8 para el Ni y entre 1,1 y 1,5 para el Co. Al seguir aumentando Q_a , las extracciones disminuyen gradualmente, expresándose con mayor profundidad en los minerales reducidos cuyos contenidos de Fe^{2+} son menores o iguales que 28 %; aunque para el Co las pérdidas son más notables que para el Ni a contenidos de Fe^{2+} mayores o iguales que 28 %.

Una particularidad importante del extractable de Ni es que sus máximos se ordenan por el contenido de Ni_T en MR (Figura 1), aunque puede correlacionarse con el de Ni^0 , como bien se conoce de la práctica industrial. Estas correlaciones se muestran en la Figura 5. Sin embargo, el extractable de Co en la región de sus máximos valores se ordena como el de níquel, pero correlaciona mejor con el Fe^{2+} en MR, y no depende del contenido de Co_T (Tabla 1). Las contradicciones observadas no afectan el objetivo práctico debido a que los máximos valores de extractables de Ni y Co están localizados en una región estrecha en la parte izquierda de las Figuras 1 y 2.

El comportamiento cualitativo del Ni para MR del tipo C1, C2 y C3 explica con claridad las razones empíricas de los ingenieros norteamericanos para implantar el método de la prueba QT como referencia de la extracción de Ni, discriminando al Co como impureza por el propósito tecnológico inicial de la planta de Nicaro. En aquellos años, los yacimientos que procesó la planta eran de mejor calidad que los actuales (contenidos de Fe^{2+} en MR mayores que los experimentados en el presente estudio) y por tanto, a elevados Q_a , los extractables de Ni casi no varían, mientras que los de Co caen bruscamente.

El empleo industrial de estos gráficos como un procedimiento para la operación diaria de la lixiviación estándar QT dependerá de la economía y rapidez del análisis del Fe^{2+} en MR, el cual puede ser sustituido por el método indirecto de medición del potencial redox de la pulpa antes de airearla, que en la Figura 3 muestra una clara dependencia lineal del contenido de Fe^{2+} en MR. Esta figura debe consolidarse experimentalmente, enriqueciéndola hasta abarcar todo el rango de valores posibles del porcentaje de Fe^{2+} en MR para cualquiera de las empresas con tecnología análoga. Sería de este modo innecesario realizar todos los análisis de Fe^{2+} , dejando solamente los requeridos para confirmar la validez del modelo de regresión del potencial redox (E_x), el que se muestra en el interior de la Figura 3.

Mediante gráficos como el que muestra la Figura 3, el contenido de Fe^{2+} puede determinarse según indica la dirección de las flechas, ubicándolo en la Figura 2 para localizar la zona de máximos

extractables de Co, luego proyectando esta al eje Q_a se localizará la región óptima, la cual se colocará en la Figura 1, ubicando los extractables de Ni en la curva que corresponde al por ciento de Fe^{2+} en MR determinado mediante la Figura 3. Finalmente, se tomará un solo valor de Q_a óptimo dentro de la región, el cual compromete los extractables máximos de ambos metales. Al parecer, los bajos contenidos de S en MR no afectaron significativamente las posiciones de los máximos extractables de Co y Ni.

3.2. Modelos estadísticos para predecir los extractables

La Figura 4 se construyó con los máximos valores de extractables de Ni y Co que se obtuvieron para los flujos óptimos de Q_a , respecto a cada tipo de MR, en sus lixiviaciones estándares QT. La importancia para la práctica industrial radica en la posibilidad de predecir el extractable de Co por modelos de regresión del tipo que se muestra en el interior de la Figura 4, debido al elevado valor del coeficiente de distribución (R^2) de la función polinómica de segundo orden. Aquí, la ecuación que modela el extractable de Ni desempeña un papel comparativo, en correspondencia con lo analizado anteriormente. No obstante, las observaciones realizadas hasta ahora indican la necesidad de realizar más experimentos para contenidos de $Fe^{2+} > 30\%$ en MR, extendiendo la base de datos a otros yacimientos y a sus mezclas (incluyendo a la planta de Punta Gorda en Moa), sin dejar de observar los contenidos de níquel.

En la Figura 5 se observa como el extractable de Ni se correlaciona mejor con el Ni_T que con el Ni^0 , obteniéndose valores de R^2 mayores que 0,9 para una ecuación de regresión polinómica de segundo orden. Este procedimiento se recomienda también para las condiciones de la lixiviación continua de la planta, y se haría con una mayor frecuencia en los turnos de trabajo, sin necesidad de realizar los análisis diarios de Fe^{2+} , en caso que se contara con los tres gráficos (Figuras 1, 2 y 3), y con los modelos estadísticos predictivos de los extractables de Co y de Ni (Figuras 4 y 5). Ello justifica la necesidad de financiar investigaciones a escala industrial, ya que existen diferencias sustanciales en la composición (presencia y niveles de concentración) del licor de la pulpa de tanques de contacto en cuanto a: NH_3 , CO_2 , iones de Ni, Co, Fe y S, los cuales modificarán los valores del potencial redox E_x .

3.3. Optimización económica del Q_a

Para ilustrar la importancia económica que significa el presente procedimiento para las empresas con tecnología CARON, se construyó la Figura 5, basada en la ecuación (1) que se emplea en la planta de Nicaro para el cálculo del beneficio económico:

$$BE = 0,815 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot W_{HR} \cdot (MeA \text{ lim}) \cdot (ExtMe) \quad (1)$$

Donde:

BE : Beneficio económico $\left(\frac{USD}{\text{día}}\right)$;

P : Precio del sulfuro de cobalto (16 762) y del óxido de níquel (20 248), asumidos para el cálculo $\left(\frac{USD}{t}\right)$;

W_{HR} : Productividad en hornos de reducción por mena tecnológica alimentada: 1 000 $\left(\frac{t}{\text{día}}\right)$;

$(MeA \text{ lim})$: Contenido del metal (Ni, Co) en la mena alimentada, en (%) para el promedio de tres muestras que corresponden a un mismo tipo de MR (C3): Co (0,098), Ni (1,193);

$(ExtMe)$: Extractable del níquel, cobalto (%), en este caso se refiere a sus incrementos, respecto al flujo de aire específico empleado actualmente de $3,5 \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$;

0,815: Es un factor que incluye la recirculación y pérdidas de mineral, y agua total, entre otros compuestos que se desprenden del mineral producto de la reducción.

Como se puede apreciar, el beneficio económico se refiere al incremento de los extractables de Ni y Co para cada flujo de aire, respecto al que actualmente se emplea en las pruebas QT.

Ejemplificando este cálculo para el Co con el mineral del tipo C3 y un $Q_a = 1,3 \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$, la diferencia de extracción observada en la Fig. 2, con relación a $3,5 \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$, es de 8,8 %, pero asumiendo un valor menor de 6,24 % como reserva productiva, entonces se obtiene:

$$BE = 0,815 \cdot 10^{-4} \cdot 16762 \cdot 1000 \cdot 0,098 \cdot 6,24 = 835,4 \text{ USD/día}$$

Análogamente, para el Ni el incremento promedio de extractable por la Figura 1 es muy pequeño e igual a 0,045 %. Por tanto:

$$BE = 0,815 \cdot 10^{-4} \cdot 20248 \cdot 1000 \cdot 1,193 \cdot 0,045 = 88,6 \text{ USD/día}$$

De esta forma, la suma de dichos beneficios (Ni + Co) es de 924 USD/día. Este mismo procedimiento se utilizó para determinar el beneficio económico de los flujos de aire restantes para los dos grupos de minerales analizados: C1, C2, C3 con un contenido en MR de $\text{Fe}^{2+} \geq 28\%$ y C4, C5 con $\text{Fe}^{2+} < 28\%$. En la Figura 6 no se representa el Ni para el primer grupo, porque como se observa en la Figura 1, prácticamente no existen incrementos de su extractable. En el caso de los minerales con contenidos de Fe^{2+} menores que 28 % se obtuvo una mayor significación económica de la intensidad de aireación Q_a .

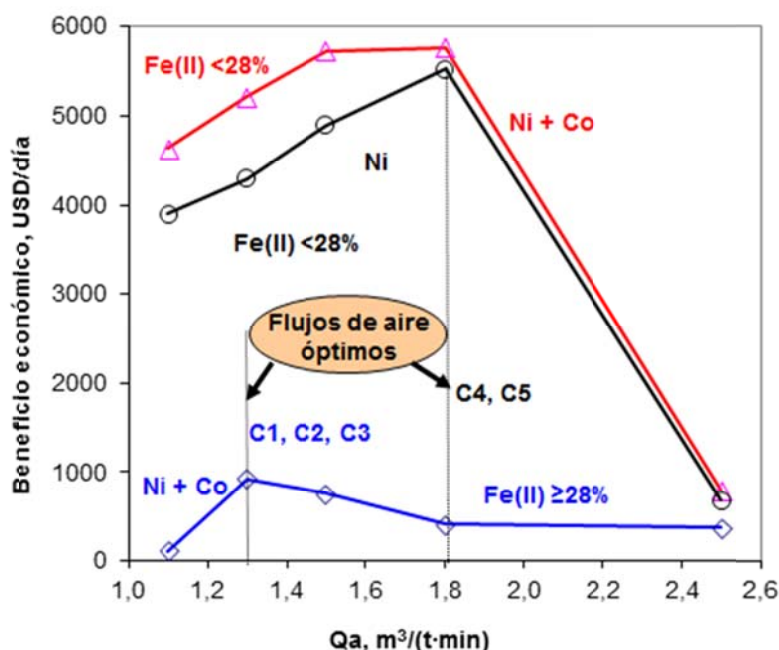


Figura 6. Comportamiento del beneficio económico por el incremento de los extractables de níquel y cobalto.

Esto demuestra la necesidad de diferenciar los flujos específicos de aire con que se iniciará la lixiviación en correspondencia con el tipo de MR identificado. En el presente estudio se establece que para MR con contenidos de $\text{Fe}^{2+} \geq 28\%$ (C1, C2, C3), se debe aplicar un flujo específico de aire de $1,3 \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$, mientras que para contenidos de $\text{Fe}^{2+} < 28\%$ (C4, C5), el óptimo es de $1,8 \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$.

En el beneficio económico no se consideró el ahorro estimado al dejar de realizar la mayor parte de los análisis de Fe^{2+} en MR para que formara parte del margen de seguridad del resultado.

4. CONCLUSIONES

1. Se demostró experimentalmente la ventaja técnico-económica de optimizar el flujo de aire específico Q_a entre 1,3 y 1,8 $m^3/(t \cdot min)$, en correspondencia con la variación del contenido de Fe^{2+} en el mineral reducido (MR) que se lixivia en la prueba QT para garantizar los máximos valores de extractables de Co y Ni.
2. Se estableció un procedimiento gráfico rápido, efectivo y económico, formado por tres gráficos, que permiten decidir la región de Q_a óptima para iniciar la lixiviación de la prueba QT, el cual parte de la medición del potencial redox de la pulpa antes de la aireación y su dependencia gráfica o matemática del contenido de Fe^{2+} en el MR. Este puede ser investigado, también para las condiciones de la lixiviación industrial.
3. Se obtuvieron los modelos empíricos (regresión polinómica de segundo orden) para predecir los extractables máximos de Co para Q_a óptimos al variar el contenido de Fe^{2+} en MR y, en el caso del Ni, por los contenidos de Ni (total y metálico) en MR para las condiciones experimentales estudiadas.

5. REFERENCIAS

- CHANG-CARDONA, A.; RODRÍGUEZ-DOMÍNGUEZ, J. I. & DOBROJOTOV, G. N. 1989. Influencia del régimen de aireación sobre las extracciones de Cobalto en la primera etapa de la lixiviación carbonato-amoniaca de los minerales reducidos de Ni. *Minería y Geología* 1(1): 51-62.
- CHANG-CARDONA, A. 2000: ¿Cómo extraer más cobalto sin afectar níquel en la lixiviación carbonato-amoniaca de menas lateríticas reducidas? *Minería y Geología* XVII(3-4): 47-53.
- CHANG-CARDONA, A. & ROJAS-VARGAS, A. 2009a: La lixiviación del Proceso CARON: Síntesis del conocimiento para su perfeccionamiento industrial. Parte 1. *Tecnología Química* XXIX(1): 98-107.
- CHANG-CARDONA, A. & ROJAS-VARGAS, A. 2009b: La lixiviación del Proceso CARON: Síntesis del conocimiento para su perfeccionamiento industrial. Parte 2. *Tecnología Química* XXIX(2): 96-105.
- NICOL, M. J.; NIKOLOSKI, A. N. & FITTOCK, J. E. 2004: A fundamental study of the leaching reactions involved in the Caron Process. In: International Laterite Nickel Symposium-2004. Proceeding. Charlotte, North Carolina, USA, March 14-18, 369-384.
- NIKOLOSKI, A. N.; NICOL, M. J. & FITTOCK, J. E. 2003: The passivation of iron during the leaching of pre-reduced laterite ores in ammoniacal solutions. In: 203th Meeting of the Electrochemical Society. Proceeding. Paris, France, April 27-May 2, 1-15.

ROJAS-VARGAS, A. 2007: *Metodología perfeccionada para determinar el extractable de Ni y Co en la lixiviación carbonato-amoniaca*. Antonio Chang Cardona (Tutor). Tesis de maestría. Universidad de Oriente. 108 p.

Antonio R. Chang-Cardona

achang@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Metalurgia-Química. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Armando Rojas-Vargas

arojas@eros.moa.minbas.cu

Técnico en Automatización. Ingeniero Químico. Máster en Ciencias. Servicios de Comunicaciones. Grupo empresarial CUBANÍQUEL, Nicaro, Holguín, Cuba.