Consideraciones sobre la dirección de la aireación en la Iixiviación del proceso Caron de la planta de Punta Gorda, Cuba Considerations about the aeration management of the leaching of the Caron process at Punta Gorda plant, Cuba

DrC. Antonio R. Chang Cardona¹* Ing. Pedro L. Merencio Guevara²

Ing. Yosbel Guerra González¹

¹ Departamento de Metalurgia del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

² Centro de investigaciones del níquel. CEDINIQ, Holguín, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo: achang@ismm.edu.cu

RESUMEN

El presente trabajo experimental se realizó a escala de Unidad Demostrativa de Producción (UDP) en la Planta de Lixiviación de Punta Gorda, Cuba con el objetivo de probar la implementación de la velocidad específica de aireación (Qa), en m³/(t·min) a partir del modelo empírico del tiempo de residencia promedio real en función del flujo volumétrico de pulpa alimentado a cada miniserie, basado en el volumen específico de aire- Va- con el propósito de analizar las tendencias de los lixiviados de Ni y Co (Lix Ni y Co). Para las condiciones experimentales estudiadas: se estableció una metodología de implementación operacional del nuevo parámetro Qa; las tendencias gráficas de los Lix Ni y Co obtenidas mostraron: que estos disminuyen al aumentar Qa, mientras que dichos lixiviados aumentan al incrementar Va hasta valores alrededor de 150 m³/t, después del cual, estos tienden a estabilizarse o disminuir; los resultados de los coeficientes de correlación par de los Lix Ni y Co demostraron que ambos lixiviados aumentan, al incrementar los valores de: la proporción de concentraciones- R (NH₃/CO₂)-, el número de mineral (NoMin), la concentración de NH₃ y el Va, aunque este último puede ser controvertido para el LixCo, mientras que los Lixiviados de Ni y Co disminuyen con el aumento de Qa y la razón de flujos de masa-R (L/S) en los

tanques de contacto. Se elaboró una herramienta computacional en EXCEL para dirigir con flexibilidad los flujos volumétricos de aire por turbo-aireador, sobre la base de los valores deseados de Va y Qa, la cual permite cambiarlos en función de las condiciones operacionales de la Planta.

Palabras Clave: Proceso "Caron"; Lixiviación carbonato-amoniacal; régimen de aireación.

ABSTRACT

The present experimental work was carried out at scale of Demonstrative Unit of Production (UDP) in the Leaching Plant in Punta Gorda, Cuba with the objective of proving the implementation of the specific velocity of aeration (Qa), in $m^3/(t \cdot min)$ starting from the statistical mathematical model of the real residence time of the pulp in function of the pulp flow feeded to each miniseries, based on the specific volume of air- V_a- with the purpose of analyzing the tendencies of the Ni and Co leached (Lix Ni and Co). For the studied experimental conditions: a methodology of operational implementation of the new parameter- Qa -was established; the graphic tendencies of Lix Ni and Co obtained showed: that these diminish when increasing Qa; while that these increase when increasing the Va until values around 150 m³/t, after the which, these spread to be stabilized or to diminish; The results of the coefficients of par correlation of the Lix Ni and Co demonstrated that both leached increase, when increasing the values of: the rate of concentrations -R (NH_3/CO_2) -, the mineral's numeral (NoMin), the concentration of NH_3 and the Va, although this last can be controverted for the LixCo, while those Lix Ni and Co diminishes with the increase of Qa and the rate of mass flows- R (L/S) in the in the contacts tanks. A calculation tool was elaborated in EXCEL to manage with flexibility the volumetric flows of air for each turbo aerator, on the base of the wished values of the Va and Qa, that permit to change them in function of the operational conditions of the Plant.

Keywords: Process "Caron "; ammonia - carbonate leaching; aeration regimen.

Recibido: 7/07/2018 Aceptado: 15/10/2018

Introducción

La lixiviación industrial del Proceso CARON que se desarrolla actualmente en la Empresa Comandante "Ernesto Che Guevara" (ECG) en el poblado de Punta Gorda- como se conoce en el mundo-, municipio de Moa, Cuba tiene la particularidad de desarrollarse en cuatro series con dos miniseries de cuatro turbo-aireadores (TA) por Serie. En correspondencia con la última modificación realizada, esta se efectúa en una sola etapa de lixiviación, para así igualarse con las dos restantes Plantas homólogas del mundo: la australiana Yabulu-QNi y la brasileña Tocantins-Niquelandia.

El planteamiento de la lixiviación en miniseries presenta algunos riesgos de tupiciones, distribución desigual de pulpa no controlada con la consecuente errónea aireación por miniserie, las cuales fueron demostradas en los artículos.^(7,8) Por tales razones, los autores propusieron la implementación de nuevas herramientas para monitorear la densidad de la pulpa y su distribución por serie, sobre cuya base se calcula el volumen específico de aire- Va, en m³/t - para cada miniserie. Por otra parte, la Planta no cuenta con el parámetro de aireación velocidad específica de aire - Qa, en m³/(t·min)- que le permita gobernar la velocidad de cristalización de los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH) en los dos primeros TA en dependencia de la calidad del mineral reducido (MR) que se alimenta a TC, en correspondencia con los resultados de los trabajos.^(3,5) En consecuencia, se necesita un estudio posterior a escala industrial para optimizar ambos parámetros de aireación. Mientras tanto, se requiere probar la implementación de Qa, a partir del modelo empírico del tiempo de residencia medio real (TR) en función del Q_{pulpa} alimentado a cada miniserie, ⁽⁷⁾ basado en el Va deseado por la planta con el propósito de analizar las tendencias de los lixiviados de Ni y Co (Lix Ni y Co) con el aumento de Qa, lo cual constituye el objetivo principal del presente artículo. Sus objetivos específicos son:

- Establecer una metodología para implementar el nuevo parámetro de aireación Q_a en la operación de la Planta a partir del modelo de TR y el Va deseado para cada miniserie para crear una base de datos (BD) que posibilite el análisis de tendencia de los Lix Ni y Co al aumentar Qa.
- Crear una herramienta computacional en Excel 2010 para dirigir la aireación con flexibilidad en la serie, sobre la base del objetivo

específico anterior, que permita cambiarlos en función de las condiciones operacionales de la Planta.

Comprobar los coeficientes de correlación par de los lixiviados de Ni y Co respecto a los principales parámetros operacionales de la lixiviación para juzgar si los resultados de las pruebas son compatibles con los fundamentos teóricos, experimentales y de la práctica industrial.

Para cumplir con éste, se necesita monitorear el comportamiento de los Lix Ni y Co en la Serie Ira B que es la unidad demostrativa de producción (UDP) durante varios meses de operación para los días de pruebas seleccionadas en la Planta de Lixiviación.

El presente artículo forma parte de la continuación lógica de los resultados obtenidos por un equipo de trabajo del ISMM-CEDINIQ-ECG dirigido por el autor principal, desde una escala de banco hasta otra industrial a nivel de UDP, los que fueron publicados en los últimos años: 2009; ^(3; 4) 2013; ⁽⁵⁾; 2015.^(7; 8)

Fundamentos teóricos

La teoría y práctica de la oxidación y precipitación de los iones de hierro durante la lixiviación carbonato amoniacal se ha estudiado por numerosos autores, según se demuestra en las referencias 3 y 4. El enfoque teórico-experimental más reciente contenido en dichas publicaciones se basa en el fenómeno de cristalización de los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH) con aire a partir del licor carbonato-amoniacal (LCA) que contiene a los iones de Fe²⁺, el que se expone a continuación.

La gran mayoría del hierro lixiviado desde los tanques de contacto (TC) hasta los primeros dos TA de cada miniserie se encuentra en forma de Fe(NH₃)₄²⁺ que al oxidarse en los TA se precipita por las reacciones siguientes:

$$3 \operatorname{Fe}(\operatorname{NH}_3)_4^{2+} + 0.5 \operatorname{O}_{2(\operatorname{dis}_3)} + 3 \operatorname{H}_2 O \Leftrightarrow \operatorname{Fe}_3 \operatorname{O}_{4(\operatorname{S})} + 6 \operatorname{NH}_3 + 6 \operatorname{NH}_4^+$$
 (1)

$$2 \operatorname{Fe_3O_{4(S)}} + 0,5 \operatorname{O_{2(dis.)}} \rightarrow 3 \gamma \operatorname{-Fe_2O_{3(S)}}$$
 (2)

$$4 \operatorname{Fe}(\operatorname{NH}_3)_4^{2+} + \operatorname{O}_{2(\operatorname{dis.})} + 6 \operatorname{H}_2 O \Leftrightarrow 4 \operatorname{FeOOH}_{(S)} + 8 \operatorname{NH}_3 + 8 \operatorname{NH}_4^+$$
(3)

$$4 \operatorname{Fe}(\operatorname{NH}_3)_4^{2+} + \operatorname{O}_{2(\operatorname{dis})} + 10 \operatorname{H}_2 O \Leftrightarrow 4 \operatorname{Fe}(\operatorname{OH})_{3(\operatorname{S})} + 8 \operatorname{NH}_3 + 8 \operatorname{NH}_4^+$$
(4)

Al aumentar la Q_a se obtienen precipitados de OHH más finos y amorfos que elevarán la capacidad de adsorción de estos, provocando pérdidas por coprecipitación segregante de Co y Ni sobre su superficie, ya que dichas pérdidas son directamente proporcionales a la velocidad de oxidación e hidrólisis de los iones de hierro, y afectan más al Co³⁺ que al Ni²⁺por ser el radio iónico del primero mucho menor que el del segundo. ^(2; 3) Este tipo de pérdida se considera la más peligrosa porque participa toda la masa de OHH formada durante la lixiviación en los dos primeros TA, y su síntoma consiste en la disminución de las extracciones relativas de Co (Δ Eco) que son equivalentes a los (Δ LixCo) de la UDP con el aumento de Q_a como se muestra en la figura1, obtenida a escala de banco para calidades de mineral reducido muy parecidas en todas las pruebas y sin considerar la influencia de la concentración de los iones de azufre en el licor lixiviante.



Fuente (2) **Fig. 1-** Influencia de la velocidad específica de aireación sobre las extracciones relativas de Co.

La influencia de las principales variables de la lixiviación carbonato-amoniacal sobre la velocidad de disolución del Ni se puede apreciar, según Fiffe⁽⁹⁾, por el

orden de la reacción (exponentes sobre las variables) en la ecuación cinética del régimen mixto o de transición por el modelo siguiente:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = 1,25.10^4 \cdot e^{-\left(\frac{2.49}{T}\right)} \cdot [NH_3]^{1.06} \cdot [CO_2]^{-0.38} \cdot K_{O_2}^{1.21} \cdot P_{O_2}^{1.21} \cdot S_0^{1.03} \cdot (1-\alpha)^{1.03}$$
(5)

Donde:

α -grado de disolución del Ni;

 K_{o_2} y P_{o_2} - coeficiente de solubilidad y presión parcial del oxígeno; S₀ -área específica de las partículas de Ni; T -temperatura de lixiviación; τ - tiempo de lixiviación.

Como significativo en la expresión (5), se puede ver que la relación de concentraciones $R(NH_3 / CO_2) = {}^{1,06}/{}^{0,38}$ tiene un gran peso sobre la velocidad de disolución del Ni, considerando, que el exponente del CO₂ es mucho menor que uno, lo que revela un mecanismo de influencia complejo entre el sólido y los compuestos disueltos, además, cuantitativamente, hace crecer el valor absoluto de dicha división, cuando se calcule (α) por su ecuación integrada. El resto de las variables, caracterizan el régimen difusivo, al alcanzar un primer orden de reacción al igual que el NH₃.

La práctica industrial ha validado el incremento de las extracciones de cobalto y níquel con el aumento de la concentración de amoníaco total, lo que debe estar acompañado de una R(NH₃/CO₂) dentro de la región óptima.⁽³⁾ Por eso es importante controlar ambas concentraciones. Sin embargo, la disminución de la concentración de los complejos amoniacales de los iones de Co²⁺ y Ni²⁺, provocada por el aumento de la relación de flujos de masa de LCA y MR - R(L/S)- en TC afecta más al Lix Co que al Lix Ni por ser los iones de Co²⁺más inestables, los que se pierden por hidrólisis ⁽³⁾ en virtud de la reacción:

$$Me(NH_3)_X^{n+} + nH_2O = Me(OH)_{n(s)} + (x-n)NH_3 + nNH_4^+$$

Por otra parte, la difusión del oxígeno hacia las partículas de Me⁰ transcurre con una elevada resistencia, lo que se ha confirmado con MR industrial y diferentes valores de Qa a escala de banco, al procesar los datos experimentales por la

ecuación de Jander⁽⁴⁾ que modela la difusión de la partícula tridimensional (esférica):

1 -
$$[1 - \alpha(\tau)]^{1/3}_{7} = K \cdot \tau^{2}_{7}$$

Estos gráficos revelaron la existencia de dos constantes de velocidad de disolución del Ni en 1/h: la primera (K)- zona I- caracteriza los primeros minutos de la lixiviación por el régimen mixto, donde su valor depende de la potencialidad química del LCA y el incremento de Qa no influye prácticamente sobre K; la segunda (K₁)- zona II- identifica el régimen difusivo, dónde el valor de K₁ crece con el aumento de Qa. Este comportamiento confirma la posibilidad de emplear bajas Qa en los dos primeros TA para disminuir la velocidad de oxidación de los iones de Fe y las pérdidas de Ni y Co con la mayor masa de OHH precipitados, mientras que a partir del tercer TA se puede incrementar Qa sin riesgo de dichas pérdidas. Esto constituye el fundamento teórico del concepto de dirección del aire para la empresa-ECG, manifestado en el título del presente artículo que lo hará diferente al resto de lo practicado en las otras Plantas en funcionamiento. La historia de la práctica industrial y experimental de la lixiviación del Proceso CARON ha manifestado contradicciones en el uso del aire en los TA a escala industrial según la síntesis del conocimiento realizada por Burkin ⁽¹⁾ y Chang. ⁽³⁾

Otro parámetro importante que determina el Lix Ni y Co es el indicador industrial número de mineral (NoMin), el cual representa la relación aparente entre la limonita y la serpentina en el mineral alimentado (MA) a los HR, a través de los contenidos (en %) de:

$$NoMin = \frac{Ni \cdot Fe}{MgO \cdot SiO_2} \tag{6}$$

La efectividad de este indicador para predecir el comportamiento de los Extractables o Lixiviados de Ni y Co ha sido demostrado por la práctica industrial del Proceso CARON en Nicaro y Punta Gorda durante más de 60 años y es evaluado diariamente por los tecnólogos de procesos como uno de los aspectos de calidad de la mena alimentada a los hornos de reducción (HR). En todos los casos, los Extractables o Lixiviados de Ni y Co crecen al aumentar el NoMin . De la misma manera se manifiesta dicha correlación, al aumentar los contenidos de Ni_T y Fe²⁺, pero en MR. ⁽⁵⁾

El modelo de tiempo de residencia medio real (TR) de la pulpa en las miniseries fue determinado experimentalmente ⁽⁷⁾ durante cuatro meses de operación continua de la Serie Ira B, lo que es imprescindible para calcular Qa y crear la BD que permita analizar su influencia sobre los Lix Ni y Co. Esta variante de modelo respondió a la ecuación:

$$TR = 13297 \cdot (Q_{pulpa})^{-0.999}; min$$
(7)

Materiales y Métodos

Se realizaron 6 pruebas industriales a temperaturas de la pulpa en los TC entre (36-39) ⁰C en la Ira etapa- Serie B de la Planta de Lixiviación de la Empresa ECG que consta de dos miniseries (M-1B y M-2B) con cuatro TA cada una como se muestra en la figura 2, lo que suma 12 resultados.

Dichas pruebas fueron seleccionadas en los meses de abril, mayo y julio del año 2014 con el propósito de garantizar un mayor rango de variación y representatividad en las condiciones operacionales de producción en relación con: el tonelaje y la calidad del MA y MR; el flujo de licor lixiviante y su composición de NH₃ y CO₂; TR de la pulpa en las miniseries; los parámetros de aireación; el estado técnico de la Planta en la Ira Etapa de Lixiviación (IraEL).

Los materiales empleados fueron los mismos que se alimentaron a la sección de TC: MR de la planta de hornos de reducción (PHR) y licor carbonato-amoniacal (LCA) de los enfriadores. Sus características, tomadas de la base de datos del grupo técnico de la empresa ECG y su INTRANET, se muestran en la tabla 1.

Se monitoreó la distribución de mineral reducido y pulpa por serie y miniseries por las metodologías tratadas en los trabajos de Chang. ^(7; 8) A continuación se ilustra un ejemplo que complementa el procedimiento de cálculo que se explica entre las tablas 6 y 8.



Fuentes Chang Cardona (7; 8)

Fig. 2- Caracterización de la Unidad Demostrativa de Producción (UDP).

El flujo volumétrico de pulpa que se suministra a la Serie Ira B se calculó por el flujo másico de pulpa que sale de la sección de Tanques de Contacto (TC) que está compuesto por: el de MR de los enfriadores de la PHR descargado a la canal y el licor carbonato-amoniacal enfriado que lo arrastra hacia los TC. Estos datos se toman del sistema de supervisión y control CITECT en la INTRANET de la Empresa ECG, por ejemplo: toneladas métricas de mineral alimentado (MA) a la PHR (190 t/h); flujo volumétrico de licor a la canal (960,4 m³/h).

La densidad del licor de los enfriadores y de la pulpa en TC se determinó por el método de la probeta graduada de 1000 cm³. En caso del licor, se tomaron tres muestras en la salida del enfriador 106 y se promedió las mediciones realizadas en una misma probeta (1039,4 kg/m³). La densidad de la pulpa en los TC (Serie B y C) se determinó como el promedio de las muestras de pulpa tomadas en los toma-muestras situados en la pared de cada tanque y en la succión de la bomba de estos (ver figura 2). Las cuatro densidades promediaron (1133,7 kg/m³).

Para calcular el flujo másico de MR se debe multiplicar el MA por el coeficiente de pérdida de masa que oficialmente da la dirección de contabilidad metalúrgica de

la Empresa, el cual es igual a 0,756. Ambos valores no se pueden considerar reales por los problemas técnicos de las romanas de la PHR durante el pesaje del MA, así como, la subjetividad e imprecisiones en la contabilidad metalúrgica que contiene dicho factor.

Por tanto, los valores de referencia para el cálculo serán los siguientes:

MR = 190.0,756 = 143,7 t/h

El flujo másico de licor lixiviante:

ML = 960,4·1,039 = 998,2 t/h

Flujo másico de pulpa en TC

MP = MR + ML = 1141,9 t/h

Flujo volumétrico de pulpa en TC

$$Q_{pulpa} = \frac{1141,9 \cdot 1000}{1133,7} = 1007,3 \ m^3/h$$

Esta se distribuye para la Serie Ira B en una proporción de 0,334, por lo que su repartición teórica (equitativa) en las miniseries, según criterio de la Planta, será: Serie B: 1007,3·0,334 = 336,4 m³/h

Miniseries (M-1 y 2) B: $336,4.0,5 = 168,2 \text{ m}^3/\text{h}$ para cada una.

Mientras que el MR se distribuyó a la Serie Ira B:

143,7·0,334 = 48,00 t/h

La proporción de MR para cada miniserie dependerá de las densidades de la pulpa que se toman a la entrada de cada miniserie (ver figura 2), la cual se deduce de la tabla 1. Estas fracciones se emplean para redistribuir el flujo de pulpa de la Serie B a las miniseries, según el criterio de los investigadores, como se ilustra en la tabla 6 al determinar los TR.

La relación de flujos másicos de ML y MR en TC será:

$$\frac{ML}{MR} = R \left(\frac{L}{S}\right) = \frac{998.2}{143.7} = 6.9$$

Las pruebas industriales se efectuaron bajo los criterios siguientes:

- La duración de cada prueba fue de seis horas durante el turno de la mañana;
- Se respetaron las condiciones básicas de producción que la dirección técnica de la Planta determinó;
- El jefe de operaciones de la planta calculó los flujos volumétricos de aire- Ga- para cada TA de la miniserie M-2B sobre la base de su criterio del Va deseado y de distribución igualitaria de Q_{pulpa} para todas las series y miniseries, los que se colocaron en el "set point" del sistema de supervisión y control de procesos- CITECT- que está en la INTRANET de la empresa- ECG;

	Mineral Alimentado a los HR.										
FECHA	Composición Química en (%)			TONEL	ONELAJE (t/h) DE MR A:			LCA en serie Ira B, (g/L)			
										R	
										(NH₃/CO	
en 2014	Ni	Co	Fe	NoMin	Serie B	M-1B	M-2B	NH ₃	CO ₂	2)	
30-abr	1,16	0,104	39,20	1,30	43,25	20,33	22,92	80,8	46,5	1,74	
06-may	1,20	0,107	40,35	1,55	53,07	21,76	31,31	78,6	45,6	1,72	
12-may	1,16	0,107	39,50	1,32	58,51	21,65	36,86	77,8	45,6	1,71	
10-jul	1,15	0,100	38,86	0,96	53,03	24,91	28,11	74,2	53,6	1,38	
17-jul	1,12	0,106	39,64	1,25	54,11	25,97	28,15	71,6	50,9	1,41	
30-jul	1,15	0,109	39,9	1,40	54,54	27,82	26,73	73,6	50,0	1,47	

Tabla 1. Condiciones experimentales del Mineral Alimentado a PHR y del LCA

- En la M-1B se varió el Ga estimado para cada TA, calculado por los resultados de la pleca anterior y el criterio del equipo de investigadores, respecto a valores diferentes de Va del jefe de operaciones para lograr mayor variabilidad de sus valores que permita obtener las tendencias de los lixiviados de Ni y Co (Lix Ni y Co), respecto a los parámetros de aireación;
- Se introduce Qa como un nuevo parámetro de operación al emplear el modelo empírico del TR en función del Q_{pulpa} alimentado a cada miniserie por la ecuación (7), previo conocimiento de Va en cada TA de ambas miniseries;

Se tomaron las muestras a la entrada y salida de las dos miniseries para obtener los Lix Ni y Co, y sus correspondientes incrementos (ΔLix) como se explica más abajo, por los cuales se analizarán sus tendencias respecto a Qa, así como serán evaluados los coeficientes de correlación par de los Lix Ni y Co en relación con las principales variables del proceso.

Muestras para determinar los incrementos de los lixiviados en las miniseries.

- Se tomaron 4 muestras al mismo tiempo en las tuberías de: entrada de los TA 101 B y 105 B y salida (TA: 104 B y 108 B) de cada miniserie (ver figura 2) en 2 pomos plásticos (por cada toma-muestra) de 250 mL (cada uno) herméticamente tapados y de boca ancha para que cubra todo el área del chorro de pulpa que sale del toma-muestra. Este procedimiento se realizó cada 2 horas en los horarios (8 am, 10 am, 12 m y 2 pm).
- Por tanto, se obtuvieron 4 compósitos de sólidos de la forma siguiente: después de reposar la pulpa media hora se decantó el líquido, se filtró la pulpa restante y la torta se lavó con agua amoniacal en un filtro con vacío en las instalaciones del laboratorio de la empresa ECG. El sólido lavado se echó en un pomo plástico de 500 mL con cierta cantidad de agua, donde se acumula hasta que la última muestra se procese. Entonces, se filtró todo el compósito para cada toma-muestra.
- Posteriormente se secó en dos platillos metálicos en una estufa a 120 °C durante 2 horas. Cuando se enfrió, se homogenizó y trituró en un mortero, después de lo cual se envió al laboratorio analítico del Centro de investigaciones y desarrollo de la industria del níquel (CEDINIQ) para la determinación del contenido total de Fe, Ni y Co en cada compósito de sólido por el método de espectrometría de absorción atómica (AAS).

El aire a los TA se suministró de los compresores industriales. Sin embargo, el estado técnico del sistema de alimentación de aire hacia los turbo-aireadores, así como, la tupición parcial de algunos de sus bajantes hizo diferente los resultados reales de los parámetros de aireación que se obtuvieron al final de cada prueba, los cuales se muestran en la tabla 2.

	I	MINISERIE- 1 E	3	I			
FECHA	Va	Qa	Ga	Va	Qa	Ga	R (L/S)
en 2014	m³/t	m³/(t·min)	m³/h	m³/t	m³/(t·min)	m³/h	en TC
30-abr	164	1,62	3331	146	1,63	3349	6,7
06-may	145	1,79	3304	108	1,77	3277	7,5
12-may	152	1,59	3299	89	1,59	3298	6,5
10-jul	150	1,92	3739	132	1,90	3706	7,0
17-jul	144	1,99	3740	133	1,99	3741	7,1
30-jul	138	1,92	3842	140	1,93	3740	6,8

Tabla 2. Condiciones experimentales reales de los parámetros de aireación

Estos parámetros de aireación se calcularon a partir de los datos de diferentes variables (tonelaje de MR, flujo volumétrico de aire - Ga por TA, Flujo volumétrico de LCA) que se tomaron del CITECT para las 6 horas experimentadas, en correspondencia con la metodología siguiente:

- Dichas variables se transfirieron por separado hacia un libro de Excel para conformar las BD que permitieron limpiarla de los problemas operacionales;
- Se programó la función promedio y las desviaciones estándares para cada columna de datos, correspondientes a cada parámetro;
- En el caso de los flujos volumétricos de aire, se sumaron todos los valores promedios de cada TA por miniserie para determinar el valor total de Ga, en m³/h de cada miniserie;
- Con los datos de distribución de Q_{pulpa} y MR para cada serie y miniserie, hallado por la metodología antes explicada, se procedió a calcular Va para cada miniserie, dividiendo sus valores correspondientes de Ga por MR, resultando su unidad de medida en m³/t;
- Al mismo tiempo, se determinó el TR en una hoja de cálculo de EXCEL, sustituyendo los Q_{pulpa} de cada miniserie en el modelo (7);
- El nuevo parámetro de aireación Qa, se obtiene dividiendo Va por TR, cuya unidad es m³/(t·min).

Los análisis químicos para determinar el contenido total de Fe, Ni y Co en cada compósito de sólido se realizaron en al laboratorio analítico del Centro de investigaciones y desarrollo de la industria del níquel (CEDINIQ) por el método de espectrometría de absorción atómica. Estos resultados se utilizan para calcular

los lixiviados de Ni y Co por la metodología establecida en la ECG, respecto al MA a los HR, expresada por la fórmula:

$$Lix (Me) = \left[1 - \left(\frac{Fe_{MA}}{Fe_{MLix}} \cdot \frac{Me_{MLix}}{Me_{MA}}\right)\right] \cdot 100, (\%)$$
(8)

Por analogía, se calcularon los incrementos (Δ) de dichos lixiviados en cada miniserie, respecto al MR que forma parte de la pulpa alimentada a la serie y sus miniseries de TA:

$$\Delta Lix (Me) = \left[1 - \left(\frac{Fe_{MEntra}}{Fe_{MSale}} \cdot \frac{Me_{MSale}}{Me_{MEntra}}\right)\right] \cdot 100, (\%)$$
(9)

Donde:

(Me): representa al Ni o al Co;

Lix (Me) ΔLix (Me): lixiviados de Ni y Co o sus incrementos en las miniseries;

 Fe_{MA} y Fe_{MEntra} : contenidos de Fe en el MA a la PHR y en el MR que forma parte de la pulpa alimentada a la serie y sus miniseries de TA, (%);

Fe_{MLix} y Fe_{MSale} : contenidos de Fe en el mineral lixiviado - a la salida del último TA- de la Serie y de cada miniserie o Etapa de la Planta de Lixiviación, (%);

 Me_{MA} y Me_{MEntra} : contenidos de Ni y Co en el MA a la PHR y en el MR que forma parte de la pulpa alimentada a la serie y sus miniseries de TA, (%);

 Me_{MLix} y Me_{MSale} : contenidos de Ni y Co en el mineral lixiviado de la serie y de cada miniserie o Etapa de la Planta de Lixiviación, (%);

Si se demuestra el objetivo principal planteado, la respuesta práctica será la elaboración de una herramienta computacional (por ahora, en hojas para el cálculo dinámico en Microsoft EXCEL-2010) para dirigir con flexibilidad los flujos de aire por TA, sobre la base de los valores deseados (óptimos) de Va y Qa para

diferentes calidades de MR, la cual permita integrar los resultados teóricos y experimentales, obtenidos a escala de banco e industrial.

Para el procesamiento de todos los resultados del presente artículo se empleó el Microsoft EXCEL-2010.

Resultados y Discusión

Los resultados de los Lix y ΔLix de Ni y Co para cada fecha se muestran en la tabla 3. Mientras que en la tabla 4 se organizó la base de datos BD para toda la Serie Ira B al unir los resultados de las dos miniseries, por la cual se construyeron los gráficos que manifiestan la influencia de Qa sobre los Lixiviados de Ni y Co y de sus incrementos.

	MINISERIE-1 B		MINISERIE-	NISERIE-2 B MIN		MINISERIE-1 B		MINISERIE-2 B	
FECHA	Lix, %		Lix,%		∆Lix,%		ΔLix, %		
en 2014	Ni	Со	Ni	Co	Ni	Co	Ni	Co	
30-abr	70,6	27,4	67,7	25,5	67,2	43,5	58,5	33,1	
06-may	74,4	22,6	66,9	16,2	62,8	32,0	53,3	28,5	
12-may	75,8	31,8	67,5	32,5	68,5	44,7	57,5	45,9	
10-jul	54,4	15,4	52,5	9,9	47,1	33,3	32,3	25,9	
17-jul	63,6	17,2	60,3	20,3	48,4	27,8	35,2	21,1	
30-jul	63,7	17,9	67,2	22,9	52,3	35,4	55,3	36,5	

Tabla 3. Resultados de los lixiviados de Ni y Co y sus incrementos por miniserie

Por cuanto en la empresa ECG se evalúa el resultado de la lixiviación por los Lix Ni y Lix Co, entonces, el análisis de la correlación par de cada parámetro se realizó preferentemente por los datos de las columnas 2 y 3 en la tabla 4.

La influencia del nuevo parámetro de aireación Qa sobre los lixiviados de Ni y Co (figura 3a), y sus incrementos (figura 3b), muestran una clara tendencia a su disminución al aumentar Qa. Este comportamiento está en correspondencia con las posiciones teóricas y experimentales publicadas y la expresada en la figura 1, pero sugiere la necesidad de investigar con valores de Qa menores que 1,5 m³/(t·min) con el propósito de encontrar la región de los máximos Lix Ni y Co como se demostró a escala de banco. ⁽⁵⁾

Tabla 4- Base de Datos para el análisis de correlación par de los lixiviados de Ni y Co,así como de sus incrementos para la construcción de gráficos en función de Qa

					Relació					
FECHA	Lix,%	Lix,%		NH3	n	Qa	Va	R (L/S)	∆lix Ni	∆lix Co
						m³/(t·mi				
en 2014	Ni	Co	NoMin	g/L	NH ₃ /CO ₂	n)	m³/t	en TC	%	%
30-abr	70,6	27,4	1,30	80,8	1,74	1,62	164	6,7	67,2	43,5
06-may	74,4	22,6	1,55	78,6	1,72	1,79	145	7,5	62,8	32,0
12-may	75,8	31,8	1,32	77,8	1,71	1,59	152	6,5	68,5	44,7
10-jul	54,4	15,4	0,96	74,2	1,38	1,92	150	7,0	47,1	33,3
17-jul	63,6	17,2	1,25	71,6	1,41	1,99	144	7,1	48,4	27,8
30-jul	63,7	17,9	1,40	73,6	1,47	1,92	138	6,8	52,3	35,4
30-abr	67,7	25,5	1,30	80,8	1,74	1,63	146	6,7	58,5	33,1
06-may	66,9	16,2	1,55	78,6	1,72	1,77	108	7,5	53,3	28,5
12-may	67,5	32,5	1,32	77,8	1,71	1,59	89	6,5	57,5	45,9
10-jul	52,5	9,9	0,96	74,2	1,38	1,90	132	7,0	32,3	25,9
17-jul	60,3	20,3	1,25	71,6	1,41	1,99	133	7,1	35,2	21,1
30-jul	67,2	22,9	1,40	73,6	1,47	1,93	140	6,8	55,3	36,5

Tabla 5- Coeficientes de correlación par de los Lixiviados de Ni y Co, respecto a lasprincipales variables de la Ira etapa de lixiviación

	LIXIVIADOS Ni							
Tipo de BD	NoMin	NH₃	R (NH ₃ /CO ₂)	Qa	Va	R (L/S)		
Todos los datos	0,78	0,61	0,81	-0,64	0,11	-0,14		
Sin 6 y 12 may (M-2B)	0,83	0,61	0,84	-0,66	0,53	-0,18		
	LIXIVIADOS Co							
Todos los datos	0,38	0,54	0,69	-0,77	-0,04	-0,62		
Sin 6 y 12 may (M-2B)	0,60	0,64	0,82	-0,77	0,63	-0,48		



Fig. 3a- Tendencia de los lixiviados de Ni y Co en función de Qa.



Fig. 3b- Tendencia de los incrementos de lixiviados de Ni y Co en función de Qa.

Teniendo en cuenta los objetivos del trabajo y los diversos: errores humanos, problemas técnicos y de otros tipos que son frecuentes e incontrolables por los investigadores en el sistema de producción a escala industrial entre dos grandes plantas- Hornos de Reducción y Lixiviación y Lavado-, la dispersión mostrada en las figuras 3a y 3b se considera típica, aceptable y apropiada para tomar decisiones ⁽⁶⁾ sobre la dirección de la aeración por su línea de tendencia, así como, se pueden considerar pertinentes y buenos los valores y el signo negativo del coeficiente de correlación par de Qa para ambos lixiviados (ver tabla 5) que respaldaron las mencionadas figuras.

Los resultados del análisis de correlación par de los Lixiviados de Ni y Co que se muestran en la tabla 5 se corresponden con las posiciones teóricas, experimentales y de la práctica industrial. En esta se observan las tendencias de los Lix Ni y Lix Co siguientes:

 a) Sobre los lixiviados de Ni influyen positivamente, en el orden de importancia que indican sus valores, el incremento de los parámetros: R (NH₃/CO₂), NoMin y NH₃. En el caso de Va se manifiesta una tendencia a disminuir bruscamente el coeficiente de correlación al considerar los bajos valores de Va, lo que indica la insuficiencia de datos en la región de bajas aireaciones.

- b) Sobre los lixiviados de Ni influyen negativamente, de forma significativa, el incremento de Qa, y en menor medida el aumento de la R (L/S) de la pulpa en TC.
- c) Sobre los lixiviados de Co influyen positivamente el incremento de los parámetros siguientes, según el orden: R (NH₃/CO₂), posteriormente a un mismo nivel, NH₃ y NoMin. El caso de Va, se manifiesta un comportamiento contradictorio por las mismas razones explicadas en el inciso a).
- d) Sobre los lixiviados de Co influyen negativamente, de forma significativa, el incremento de Qa, y en menor medida el aumento de la R (L/S) de la pulpa, aunque al comparar sus valores con los del Lix Ni, se nota que el Lix Co sufre mayores pérdidas.
- e) El parámetro de aireación más estable para ambos lixiviados es Qa, lo que confirma su pertinencia como parámetro de operación para predecir los Lix Ni y Lix Co por sus futuros modelos de regresión.

Es importante remarcar que la aparente contradicción existente entre Va y Qa deben ser resueltos mediante la optimización experimental de sus valores a escala industrial, considerando las indicaciones dadas por Chang Cardona *etal*^(3, 4, 5) con el objetivo de encontrar soluciones de compromiso que permitan obtener los máximos valores del Lix Ni con las menores pérdidas de Lix Co, para lo cual es necesario aumentar la cantidad de datos y ampliar el rango de valores a estudiar en el sentido de menores Qa y Va que los empleados, lo que estará limitado por el flujo volumétrico mínimo de aire que admitan los TA sin tupirse, que a su vez, dependerá de la presión general que exista en el sistema de suministro de aire.

Por consiguiente, al introducir el nuevo parámetro Qa, se deberá elaborar una nueva herramienta para operar el aire en compromiso con Va, los cuales se le denominarán "deseados". Más abajo, se ilustra una propuesta de procedimiento ordenado para calcular los flujos volumétricos de aire que deberán ser introducidos en el "set point" del CITECT para cada TA de una Serie.

Ilustración del procedimiento, cuyos resultados se muestran en la tabla 8

 Después de distribuida la pulpa y el MR para cada serie y miniserie por la metodología mostrada por Chang Cardona *etal* ⁽⁷⁾, se conocerán los datos que se muestran en la tabla 6. Los resultados del MR se introducen en la columna C de la tabla 8.

	Tonelaje	Q _{pulpa} ,	Coeficiente		
	de MR, t/h	en m³/h	de distribución		
Serie Ira B	54,8	345,7	1,00		
M-1B	27,5	173,5	0,502		
M-2B	27,3	172,2	0,498		

Tabla 6. Distribución de pulpa y MR a la serie Ira B y sus miniseries

2) Por los valores conocidos de Q_{pulpa} de las miniseries se calculan los TR, empleando el modelo (7), el cual se programa en Microsoft EXCEL-2010, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 7. Al dividir por cuatro los valores de TR de la miniserie se obtiene el de cada TA: para la M-1B es igual a 19,26 min y el de la M-2B es 19,41 min. Estos valores se colocan en la columna F de la tabla 8.

Tabla 7. Cálculo de	I TR de la pulpa para cada miniserie por el modelo (7)
	programado en EXCEL-2010

SERIE Ira B.	Coeficiente	Q _{pulpa} ,	Exponente de	TR,	
Miniseries	Libre	en m³/h	Q _{pulpa}	min	
M-1B	13297	173,5	-0,999	77,0	
M-2B	13297	172,2	-0,999	77,6	
Columna	[B#]	[C#]	[D#]	[E#]	
[Letra					
#]					
Programación	[E#] =[B#]·POTENCIA([C#];[D#])				
TR					

- 3) De acuerdo a los resultados de optimización antes explicados, se seleccionan los "valores deseados". En este caso se tomaron los valores hipotéticos de: Qa= 1,6 m³/(t·min) para los dos primeros TA de cada miniserie (ver en tabla 8: E4, E5; E9 y E10), mientras que Va= 130 m³/t se corresponde con el valor total supuesto para cada una de las miniseries (ver D3 y D8).
- 4) Los valores de Va en los dos primeros TA de cada miniserie (ver D4, D5 y D9, D10) se obtienen multiplicando Qa=1,6 por el TR de un TA, basado en

el análisis de unidades, como en el resto de los cálculos del presente procedimiento.

- 5) Para obtener Qa y Va en el 3er TA de cada miniserie, primero se incrementa Qa, respecto a su valor deseado, en la magnitud que garantice entre el (25÷26) % de la distribución de Va y Ga en el 3er TA (ver I6, I11 y E6, E11 en tabla 8) para evitar cambios bruscos de aire en TA contiguos, después de lo cual se multiplica Qa por el TR de un TA para obtener el Va del 3er TA (ver D6 y D11).
- 6) Para el 4to. TA de cada miniserie, se calcula primero su Va como la diferencia entre el Va deseado y la suma de los Va de los 3 primeros TA (ver D7 y D12), y por este, se determina el Qa del 4to.TA dividiendo su valor por su TR (ver E7 y E12).
- 7) El flujo volumétrico de aire Ga para cada TA se calcula multiplicando los valores de Va por el flujo másico de MR en t/h, cuyos valores se colocan en el "set point" del CITECT para cada miniserie. La suma de los cuatros Ga constituye el total de m³/h que se suministra a la miniserie. Ver columna B en la tabla 8.

Las consideraciones teóricas y experimentales reflejadas en la tabla 8 constituyen una de las alternativas de dirección de la aireación.

Tabla 8- Ilustración numérica del procedimiento de dirección del aire en los TA,
programado en una hoja de cálculo de EXCEL-2010

	Ga	MR	Va	Qa	TR	Valores deseados de:		Distri- bución	Fila
TA No.	m∛h	ť/h	m∛t	m∜(t·min)	min	Qa	Va	Ga y Va	[#]3;
SERIE Ira B	7123	54,8	130,0	1,68	77,3	1,60	130,0	%	2
M-1B	3575	27,5	130,0	1,69	77,0	M-1B	∑зта	100,0	3
101	847	27,5	30,8	1,60	19,26		94,4	23,7	4
102	847	27,5	30,8	1,60	19,26			23,7	5
103	903	27,5	32,8	1,71	19,26			25,3	6
104	978	27,5	35,6	1,85	19,26			27,3	7
M-2B	3458	27,3	130,0	1,67	77,6	M-2B	∑3TA	100,0	8
105	847	27,3	31,05	1,60	19,41		95,2	23,9	9
106	847	27,3	31,05	1,60	19,41			23,9	10
107	903	27,3	33,1	1,71	19,41			25,4	11
108	950	27,3	34,8	1,81	19,41			26,8	12
Columna [A#]	[B#]	[C#]	[D#]	[E#]	[F#]	[G#]	[H#]	[#]	
Program ación. Ejemplo para M- 1B	[C#]·[D #]		Los tres 1ros TA [E#]·[F#]	El 4to.TA [<i>D7</i>] [<i>F7</i>]	м-1В [<i>F</i> 3] 4		∑3TA Suma (D4:D6)	M-1B [<i>B</i> #] · 10 3575	0

Conclusiones

Para las condiciones experimentales estudiadas a escala industrial en una UDP:

- Se estableció una metodología para implementar el nuevo parámetro de aireación Qa en la operación de la Planta con vista a atenuar las pérdidas de Co y Ni por coprecipitación segregante con los OHH, mediante la disminución de la velocidad de su cristalización con el aire en los dos primeros TA.
- Se demostró que el parámetro de aireación más estable para ambos lixiviados es Qa, lo que confirma su pertinencia como parámetro de operación para predecir los Lix Ni y Lix Co por sus futuros modelos de regresión.
- Se obtuvieron las tendencias gráficas experimentales de los Lixiviados de Ni y Co, las que disminuyen al aumentar Qa. Estas indican la posible existencia de lixiviados máximos en la región de valores Qa<1,5 m³/(t·min).

- 4) Se obtuvieron resultados compatibles con los fundamentos teóricos, experimentales y de la práctica industrial de los coeficientes de correlación par de los lixiviados de Ni y Co; de acuerdo a los cuales, ambos lixiviados aumentan con el incremento de: R (NH₃/CO₂), NoMin y NH₃; mientras que los Lixiviados de Ni y Co disminuyen con el aumento de Qa y la R (L/S). Al comparar los valores de los dos últimos parámetros con los del Lix Ni, se demostró que el Lix Co sufre mayores pérdidas.
- 5) En el caso de Va se manifiesta una tendencia a disminuir bruscamente el coeficiente de correlación al considerar los bajos valores de Va, lo que indica la insuficiencia de datos experimentales en la región de bajas aireaciones.
- 6) Para el 4to. TA de cada miniserie, se calcula primero su Va como la diferencia entre el Va deseado y la suma de los Va de los 3 primeros TA (ver D7 y D12), y por este, se determina el Qa del 4to.TA dividiendo su valor por su TR (ver E7 y E12).
- 7) El flujo volumétrico de aire Ga para cada TA se calcula multiplicando los valores de Va por el flujo másico de MR en t/h, cuyos valores se colocan en el "set point" del CITECT para cada miniserie. La suma de los cuatros Ga constituye el total de m³/h que se suministra a la miniserie. Ver columna B en la tabla 8.

Las consideraciones teóricas y experimentales reflejadas en la tabla 8 constituyen una de las alternativas de dirección de la aireación.

Referencias bibliográficas

1. BURKIN, A. R.; et al. Extractive Metallurgy of Nickel (Critical Reports on Applied Chemistry; Volume 17). London: John Wiley and Son, 1987. 150 p. ISBN: 0 471 91425 8.

2. CHANG-CARDONA, Antonio. "Cómo extraer más cobalto sin afectar níquel en la lixiviación carbonato-amoniacal de menas lateríticas reducidas". *Revista Minería y Geología*. 2000, vol. 17, núm. 3-4, p. 47- 53.

3. CHANG-CARDONA, Antonio; ROJAS-VARGAS, Armando. "La lixiviación del Proceso CARON: Síntesis del conocimiento para su perfeccionamiento industrial. Parte 1". *Revista Tecnología Química*. 2009. vol. 29, núm. 1, p. 98-107.

4. CHANG-CARDONA, Antonio; ROJAS-VARGAS, Armando. "La lixiviación del Proceso CARON: Síntesis del conocimiento para su perfeccionamiento industrial. Parte 2". *Revista Tecnología Química*. 2009. vol. 29, núm. 1, p. 96-105.

5. CHANG-CARDONA, Antonio; ROJAS-VARGAS, Armando. "Optimización del flujo de aire específico para la lixiviación estándar QT del mineral reducido en el Proceso CARON". *Revista Minería y Geología*. 2013, vol. 29, núm.1, p. 1-16.

6. CHANG-CARDONA, Antonio; ROJAS-PURÓN, Arturo; ARCE-MOLINA, Jorge. "Influencia sobre el extractable de níquel de los minerales oxidados del Yacimiento de Punta Gorda". *Revista Minería y Geología*. 2014, vol. 30, núm.4, p. 70-88.

7. CHANG-CARDONA, Antonio; MERENCIO-GUEVARA, Pedro; GUERRA-GONZÁLEZ, Yosbel; ROJAS- VARGAS, Armando. "Consideraciones sobre la determinación del tiempo de residencia de la pulpa en la lixiviación industrial del proceso "CARON" en la planta de Punta Gorda, Cuba". *Revista Tecnología Química*. 2015, vol. 35, núm.1, p. 5-20.

8. CHANG-CARDONA, Antonio; MERENCIO-GUEVARA, Pedro; GUERRA-GONZÁLEZ, Yosbel. "Diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniseries en la lixiviación industrial del proceso "Caron" en la planta de Punta Gorda, Cuba". *Revista Tecnología Química*. 2015, vol. 35, núm. 2, p. 125-138.

 9. FIFFE, Luis; GRANDA, Osvaldo. "Mecanismo de disolución del níquel metálico en soluciones que contienen diferentes relaciones NH₃ / CO₂ ". *Revista Cubana de Química*. 1985, vol. 1, núm.1, p. 31- 36.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Nomenclatura

Q_a, m³/(t·min): velocidad específica de aireación.

NoMin=(Ni·Fe)/(SiO₂·MgO):número de mineral. Relaciona los contenidos totales de los metales y compuestos en la fórmula que se encuentran en la mena alimentada.

Q_{pulpa}, m³/h: flujo volumétrico de pulpa.

TC: tanques de contacto.

MA: mena o mineral alimentado a los hornos de reducción.

MR: mena o mineral reducido.

HR: hornos de reducción.

PHR: planta de hornos de reducción.

Nota: En el texto del artículo se esclarece toda la nomenclatura que falta, incluso se repiten algunas de las que se relacionan.