

## **Influencia sobre el extractable de níquel de los minerales oxidados del yacimiento Punta Gorda**

Antonio R. Chang-Cardona  
Arturo L. Rojas-Purón  
Jorge Arce-Molina

### Resumen

El propósito fue validar, a escala industrial, una metodología para períodos largos en una loza de 8 hornos en la empresa productora de níquel Comandante Ernesto Che Guevara, con el fin de crear una base de datos de producción confiable para su procesamiento estadístico y demostrar la influencia del contenido de los principales minerales oxidados sobre el extractable de níquel y la tendencia en el comportamiento del extractable de cobalto. Se demostró, mediante experimentos, durante tres meses de monitoreo, la efectividad del software COMPRAC para obtener la composición racional de 100 kg de varios tipos de mena laterítica que entran a los hornos de reducción. A partir de la base de datos creada se obtuvo, por primera vez, las gráficas que reflejan la influencia del contenido de los principales minerales sobre los extractables de níquel y de cobalto; en el caso del níquel con suficiente sensibilidad y confiabilidad para la toma de decisiones operacionales eficaces en el circuito tecnológico Mina-Preparación de Mineral-Hornos de Reducción.

Palabras clave: Proceso Caron; reducción de menas lateríticas; extracción de níquel; extracción de cobalto; minerales oxidados.

## **Influence on the nickel extraction of the main oxidized minerals contained in the Punta Gorda ore body**

### Abstract

The objective of this investigation was to validate a methodology of investigation to be implemented at industrial scale in the Comandante Ernesto Che Guevara Nickel Processing Plant for long periods of time in a Demonstrative Unit of Commercial Production (one slab consisting of eight kilns) at the reduction Kilns Plant in order to design a reliable production database for statistical processing and to show the influence of the oxidized mineral content on the extractable nickel and the behavioral tendency of the extractable cobalt. During three months of monitoring, the experiments showed the effectiveness of the COMPRAC software for the industry to obtain the rational composition of 100 kg of various types of lateritic ore feed to the reduction kilns. Graphics representing the influence of the main ore content on the extractable nickel and cobalt were obtained for the first time from the designed database, in a sufficiently reliable and sensitive manner in the case of the nickel, for an effective decision-making associated to operational issues encountered at the Mine-Ore Slurry Preparation-Reduction Kiln circuits.

Keywords: Caron process; lateritic ore reduction; nickel extraction; cobalt extraction; oxidized minerals.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la industria metalúrgica en Cuba, la operación de reducción en el proceso tecnológico Caron se ha evaluado por el número de mineral (No. mineral) en la mena tecnológica que se suministra a los hornos HR1 y que no es más que la relación de los contenidos de Fe y Ni entre los de Mg y Si; este parámetro se correlaciona con el extractable de Ni (Ni Ext).

Tal método tiene inconvenientes que dificultan establecer las causas de disminución o incremento brusco de los extractables de Ni y Co, respecto a la variación de la calidad de la mena tecnológica que ingresa a los hornos de reducción. Los inconvenientes del método descrito se relacionan seguidamente:

- a) No considera las diversas formas mineralógicas de asociación del Fe como componente mayoritario, algunas de las cuales son dañinas al proceso;
- b) No se conoce la cantidad de otros minerales del Al, Cr y Mn que no forman parte de la composición química del No. mineral;
- c) La efectividad de predicción del extractable disminuye con el empeoramiento de la calidad de la mena tecnológica.

Estas razones llevaron a implementar un procedimiento que permita cuantificar, aproximadamente (aun con un elevado error relativo), los principales minerales a partir de la composición química de la mena, sin necesidad de realizar ensayos de difracción de rayos X (DRX) diarios o periódicamente.

Es por eso que el presente trabajo tuvo el objetivo de validar una metodología de investigación a escala industrial que permitiera crear una base de datos de producción para su procesamiento estadístico y demostrar la influencia del contenido de dichos minerales sobre el valor del extractable de níquel en lo esencial, y la tendencia del comportamiento del extractable de cobalto, para compararlos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Particularidades de la metodología de investigación a escala industrial en la planta de Hornos de Reducción

En la planta de Hornos de Reducción de la empresa niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), conocida mundialmente como Punta Gorda existen 24 hornos Herreshoff, divididos en tres grupos (lozas) de 8 hornos. En cada turno de trabajo, en las lozas se controlan aspectos como el consumo de fuel-oil; flujo másico de mineral alimentado y su muestra de entrada (HR1) para el análisis químico de Fe,

Ni, Co, Mg, Si, Al, Mn y Cr, además de otras propiedades; el resultado de la reducción, mediante los extractables de Ni y Co, obtenidos de los análisis químicos de la muestra lixiviada del mineral reducido que se tomó a la salida de los enfriadores (HR4); así como todos los parámetros tecnológicos para la operación normal de los hornos, el estado técnico de estos y las incidencias que ocurrieron. Para esta investigación se tomó como Unidad Demostrativa de Producción (UDP) la loza II que posee las condiciones técnicas promedio para ser semejante al resto de la planta.

Como es conocido, a esta escala no es posible gobernar los valores de todas las variables operacionales como en los experimentos que se diseñan a escalas menores, ya que no se puede interrumpir la producción. Además, los operadores pueden incurrir en errores humanos y el estado técnico de los ocho hornos no es igual, lo que influye sobre la variabilidad de los extractables de un enfriador respecto a otro para una misma mena tecnológica. Por ende, cualquier análisis estadístico que se realice para una determinada base de datos (BD), obtenida en condiciones normales de producción, dará como resultado bajos valores en los indicadores de efectividad para cualquier modelo estadístico. De aquí se deduce la necesidad de diseñar una metodología de investigación que permita mejorar dichos indicadores estadísticos y que cumpla las tareas y requisitos siguientes:

- a) Garantizar en la loza II la semejanza técnico-operativa acordada con la dirección de la planta para que los resultados que se obtengan se puedan extrapolar al resto de las lozas;
- b) Seleccionar adecuadamente el tiempo de duración del proyecto de investigación, de tal forma que se pueda abarcar todo el rango de variación de la composición química y mineralógica con la frecuencia necesaria que caracteriza un año de trabajo de la planta de Hornos de Reducción. En este caso se eligió tres meses;
- c) Mantener una observación diaria especializada (monitoreo tecnológico) sobre el comportamiento operacional de la loza II para eliminar aquellos turnos de trabajo que no se correspondan con el patrón acordado en la semejanza técnico-operativa;
- d) Establecer un sistema de limpieza de los datos tomados de la Intranet de la empresa que considere el error humano y técnico en cualquier eslabón de la cadena: Planta-Muestreo- Tratamiento de muestras-Laboratorio analítico, mediante la indagación in situ y la comprobación de los resultados en otro laboratorio certificado

como el Elio Trincado, de Geominera Oriente, en Santiago de Cuba;

- e) Realizar cuantiosos análisis de Difractometría de Rayos X (DRX) semi-cuantitativo a los productos: mezcla de minerales de las capas de Laterita de Balance (LB) y Serpentina Blanda (SB), resultante de la mina (SM2), de la preparación de mineral (SM4) y a la entrada de los hornos (HR1) para validar la composición mineralógica esencial;
- f) Utilizar el software COMPRAC (Arce & Chang 2004), confeccionado para calcular la composición racional de los minerales en 100 kg de varios tipos de mena tecnológica seca del yacimiento Punta Gorda, por el que se puede distribuir la masa de los ocho metales analizados en sus diferentes formas mineralógicas, aplicando el balance de masa. Ello contribuirá a crear una base de datos confiable con los principales minerales que servirá de pilar para el análisis estadístico de regresión.
- g) Comprobar que las funciones gráficas del extractable de Ni, en función del contenido de los principales minerales en las muestras de HR1, reflejen claras tendencias en su comportamiento visual y una confiabilidad aceptable en correspondencia con la escala para que se puedan utilizar en la práctica industrial.

## 2.2. Diseño del programa de investigación: aclaraciones y su relación con artículos anteriores

En los artículos de Chang-Cardona et al. (2005, 2006) se explica con detalles los aspectos metodológicos de las pruebas que se realizaron en la loza II. Durante los tres meses de pruebas con menas del yacimiento Punta Gorda se formaron las bases de datos publicadas en los mencionados artículos.

Los análisis químicos de Ni, Co, Fe, Mg, Si, Al, Mn, Cr, como contenido total en las muestras HR1, además de Fe (II) en forma de FeO, Fe (III) y Si libre, se realizaron en el laboratorio Elio Trincado de la Empresa Geólogo-Minera de Oriente (GMO), el cual está certificado por las normas de la serie ISO para análisis de minerales industriales. Se emplearon las técnicas de ICP y análisis volumétrico, según el tipo de elemento. Como son las mismas muestras, los resultados de los extractables de níquel y cobalto, así como los contenidos de Fe, Ni, Co y humedad en HR1 se tomaron del Laboratorio Central de la empresa Punta Gorda para los turnos válidos, los cuales se publican en su Intranet.

La base mineralógica del yacimiento de Punta Gorda fue tomada de las investigaciones de los científicos rusos (Laverov 1985) y la composición racional de los minerales en cualquier muestra, desde la mina hasta la entrada a la planta de Hornos de Reducción, se calculó con el software COMPRAC al introducir los contenidos de los ocho metales mencionados. Un ejemplo se muestra en la Tabla 1.

Una de las novedades del procedimiento de limpieza de la BD de producción consiste en que el software COMPRAC sirve para eliminar, en primera instancia, aquellas muestras cuyas composiciones químicas de los ocho metales den como resultado en la Tabla 1 (columna de Otros) valores negativos o superiores a 10 % como techo del error admisible. Las demás etapas de dicho procedimiento se publicaron en los artículos ya mencionados.

Como parámetros fijos se consideraron los acordados con la dirección de la planta como patrón, que garantizan la semejanza técnico-operativa, pero por discreción no se darán a conocer.

Después de tres meses de pruebas, se obtuvo una base de datos de producción, que luego de aplicado el procedimiento de limpieza a la composición química y mineralógica resultó un total de turnos (N=137) de ocho horas cada uno con las características siguientes:

Los parámetros variables son los contenidos de los ocho metales mencionados y los principales minerales de la Tabla 1. El rango de variación de ellos, así como su promedio se muestran en las Tablas 2 y 3.

Los extractables de Ni y Co (variables dependientes) se toman directamente de la red informática interna de la empresa (Intranet). Además, se calculan y muestran en la parte final de la Tabla 2, el No. mineral=Ni·Fe/Mg·Si y en la Tabla 3, la relación de los contenidos de los principales minerales de la capa LB y SB, denominada (R5). Ambos, se correlacionaron con los extractables y publicaron en los dos citados artículos del autor principal.

La difracción de rayos X (DRX) se realizó en el laboratorio del ISMMM, empleando el método policristalino y difractómetro de la PHILIPS, modelo PW 3710, con radiación de CuK $\alpha$ . En el proceso de lectura e interpretación de los difractogramas se emplearon los softwares APD (PHILIPS) y, además, se utilizó el Xpert HighScore 1b, 2002, con la base de datos de la ICDD (Internacional Center for Diffraction Data) de 1998.

Se trabajó complementariamente para el registro y tratamiento de los datos roentgenométricos con el software ANALIZE y para las

determinaciones cuantitativas de minerales el AUTOQUAN de la SEIFERT X-Ray Technology (Versión 2.26). Se valoraron 100 muestras pertenecientes al tipo tecnológico: SM2, SM4 y HR1 para confirmar la presencia de los minerales principales. Se identificaron los minerales siguientes: goethita, magnetita-maghemita, gibbsita, minerales del grupo de serpentina y sílice libre (cuarzo). Hasta aquí sería suficiente para la pretendida demostración, sin embargo, se quiere compartir con la comunidad científica un procedimiento sencillo, cuando se investiga con muestras de producciones industriales durante largos períodos de tiempo, que permite darle una mayor confiabilidad a los análisis semi-cuantitativos de DRX en todo el intervalo de variación del contenido del metal en las muestras tomadas, basado en el balance de masa, mencionado en el epígrafe 2.1, numeración (f) de la metodología de investigación. A continuación, se ilustra el ejemplo de purificación de la BD para la gibbsita y su correspondiente función (Figura 1):

	CONTENIDO, en (%)
%Al <sub>T</sub> (por el Laboratorio de GMO)	5,17
mGibs por DRX, (%)	16,20
%Al Gibs = 0,346·mGibs	5,61
(%Al Gibs / %Al <sub>T</sub> )·100	108,41

Donde: 0,346 es la relación estequiométrica de la masa del Al en la gibbsita (2·26,98/155,956).

Por cuanto 108,41 % es mayor que 100 %, entonces, se desecha la muestra por no cumplir con la ley de conservación de la masa por Al en dicho mineral (debió de ser menor que 100 %). Como resultado, se obtiene una BD purificada para establecer la correlación de confiabilidad que se representa en la Figura 1 para las muestras HR1.

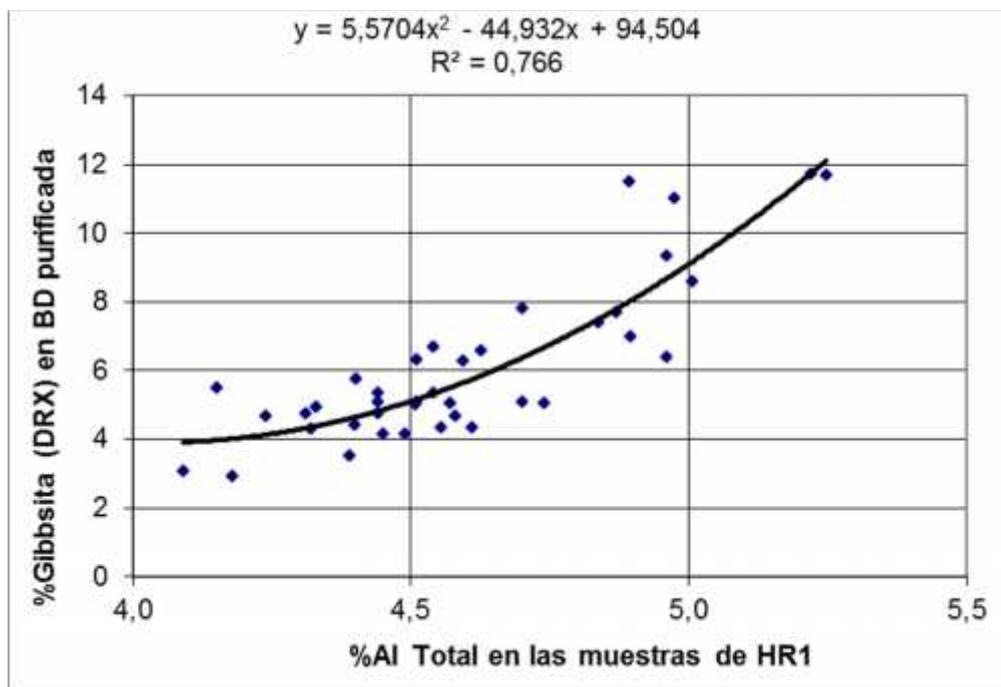


Figura 1. Dependencia del contenido de gibbsita por DRX del porcentaje de Al total en las muestras HR1. BD purificada.

La Figura 1 expresa un buen coeficiente de distribución ( $R^2$ ), considerando su origen de producción, y una adecuada tendencia al aumento del contenido de gibbsita con el incremento del  $Al_T$ , y por consiguiente, esto permite confiar en los resultados de la DRX y en la composición mineralógica de la Tabla 1 para el resto de las muestras HR1. Tal procedimiento se puede aplicar a los metales que poseen más de una asociación mineralógica.

En este punto, las BD de producción, obtenidas mediante el COMPRAC y los datos correspondientes de los extractables de Ni y Co que se tomaron de la Intranet, pueden ser sometidas a las etapas de limpieza estadística y empleadas para construir los gráficos que se corresponden con el objetivo propuesto. Las bases de datos creadas durante los tres meses de pruebas, con ayuda de dicho software, así como sus modelos estadísticos de regresión, se publicaron por Chang-Cardona et al. (2005, 2006)

Tabla 1. Ejemplo de los resultados exportados desde la tabla en Delphi hacia el EXCEL. Para 100 Kg de mena tecnológica absolutamente seca en la muestra HR1, en %

COMPOSICIÓN RACIONAL MINERAL SECO HORNOS					Procesamiento con COMPRAC ver 2.0: 23/01/2005 9:21:59							
Identificación de Muestra: 11 DE NOV.T3				J' de Turno:				Turno:				
Mineral	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Mn	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O	Cr	Otros	Total
2FeOOH	32,659							5,258	14,043			51,96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O				2,985				2,987	2,656			8,628
(Mg,Fe)(Cr,Al) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,918			0,888	0,4				1,052	1,71		4,968
Mg <sub>6</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>					2,54		4,164	1,247	1,664			9,615
MnO <sub>2</sub>						0,8			0,466			1,266
Fe <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	0,775						1,67	0,25	0,334			3,029
Al <sub>4</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub> ·4H <sub>2</sub> O				0,437			0,973	0,582	0,171			2,163
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	6,148								2,344			8,492
SiO <sub>2</sub>							1,985					1,985
NiO		1,28							0,35			1,63
CoO			0,125						0,034			0,159
Otros											6,105	6,105
Total	40,5	1,28	0,125	4,31	2,94	0,8	8,792	10,324	23,114	1,71	6,105	100

Tabla 2. Variación del contenido de metales y extractables en la loza II

PARA LA BD LIMPIA (N= 137)			
VARIABLES	Mínimo	Máximo	Prom
Fe	35,110	42,992	39,843
Ni	1,154	1,402	1,293
Al	3,920	5,390	4,548
Mg	1,719	4,970	3,082
Cr	1,443	1,765	1,603
Mn	0,530	0,906	0,745
Si	2,816	6,000	4,280
Co	0,093	0,173	0,119
No. mineral	1,686	11,282	4,381
Extractable de Ni	76,560	88,057	82,719
Extractable de Co	38,986	75,114	55,980

Tabla 3. Variación del contenido de minerales y extractables en la loza II

PARA LA BD LIMPIA (N= 137)			
VARIABLES	Mínimo	Máximo	Prom
goethita	45,575	55,734	51,380
gibbsita	7,848	10,788	9,049
serpentina	4,989	17,466	10,249
asbolana	0,838	1,440	1,179
nontronita	0,758	5,436	2,620
halloysita	1,989	4,326	2,804
magnetita + maghemita	7,023	9,171	8,313
cromita	4,182	5,113	4,655
cuarzo	1,627	2,338	2,011
$R5 = \frac{(goet + gibs + crom + magn)}{(serp + nont + alloy + cuarzo)}$	2,762	6,929	4,309
Extractable de Ni	76,560	88,057	82,719
Extractable de Co	38,986	75,114	55,980

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

Las figuras de la 2 a la 8 muestran los resultados del análisis estadístico y gráfico de la BD limpia de los principales minerales como una función de los extractables de Ni y Co dependiente del contenido de los principales minerales en las muestras HR1, para una BD limpia, correspondiente a 137 turnos de producción en la loza II.

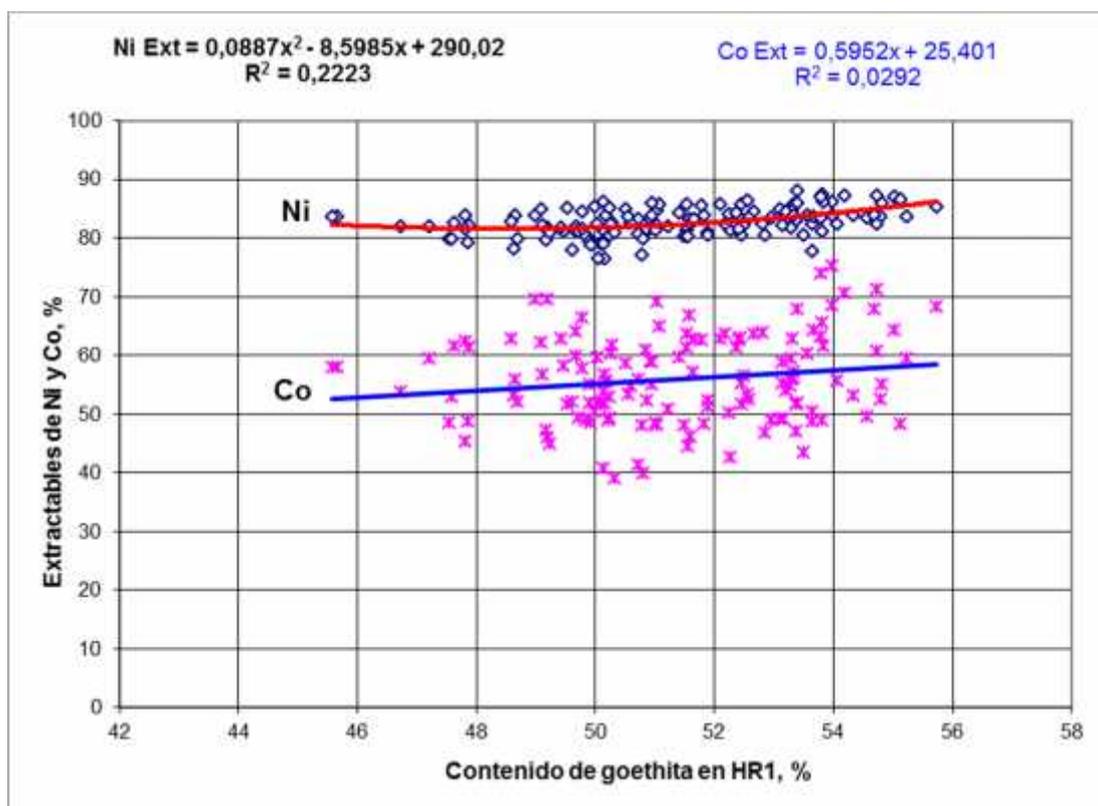


Figura 2. Influencia del contenido de la goethita en HR1 sobre los extractables de Ni y Co. BD limpia

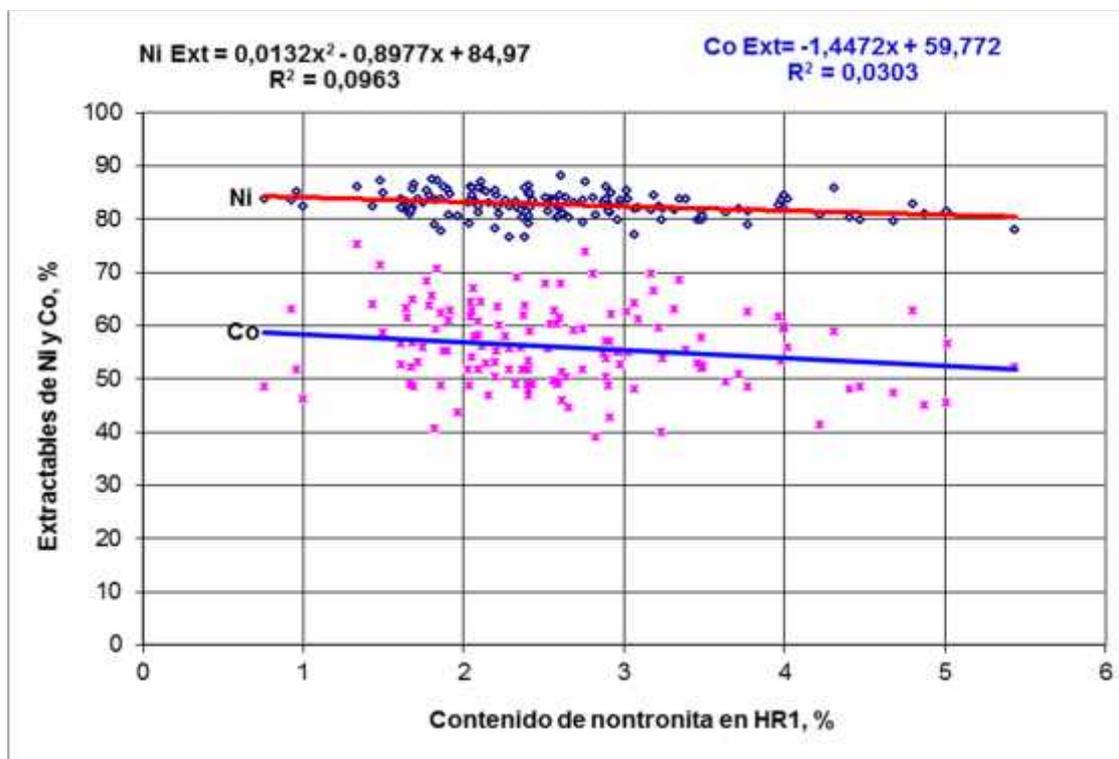


Figura 3. Influencia del contenido de la nontronita en HR1 sobre los extractables de Ni y Co. BD limpia.

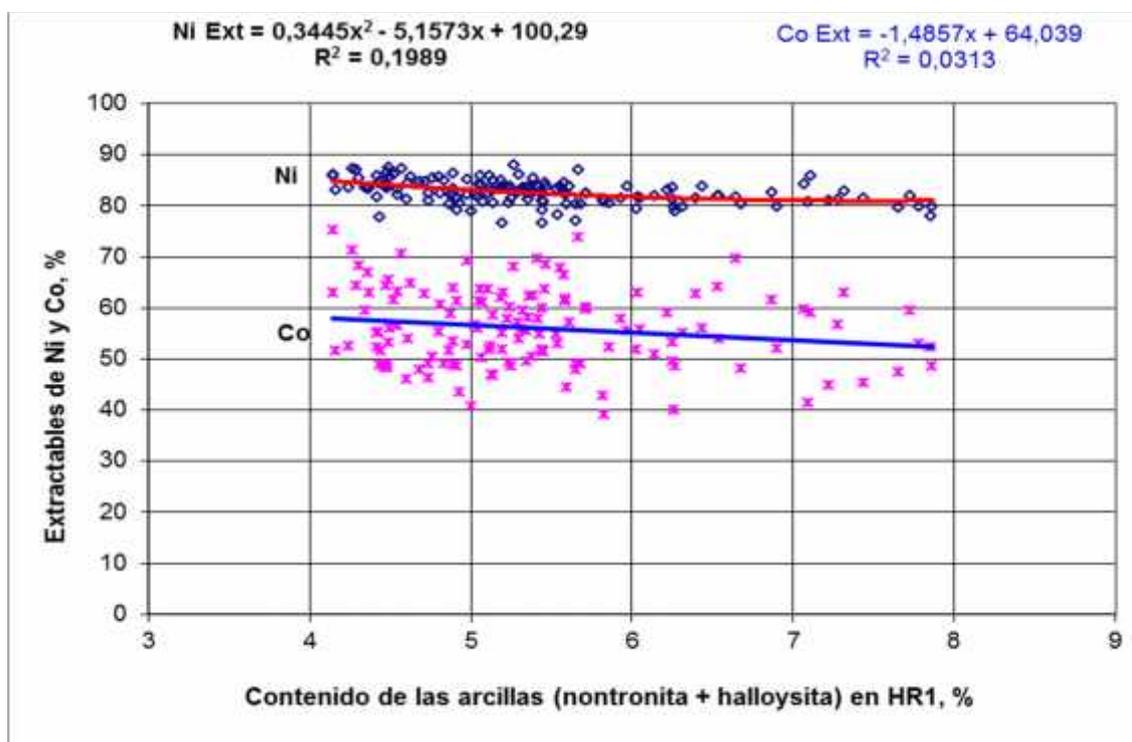


Figura 4. Influencia de las arcillas sobre los extractables de Ni y Co. BD limpia.

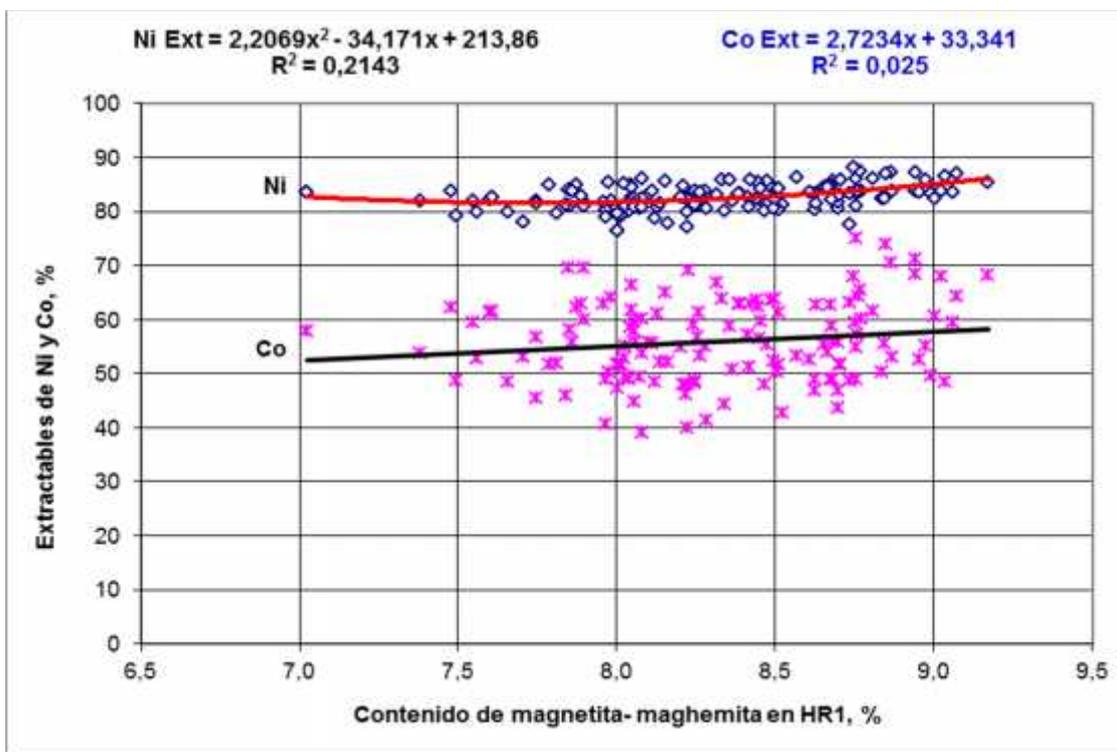


Figura 5. Influencia del contenido de la magnetita-maghemita sobre los extractables de Ni y Co. BD limpia.

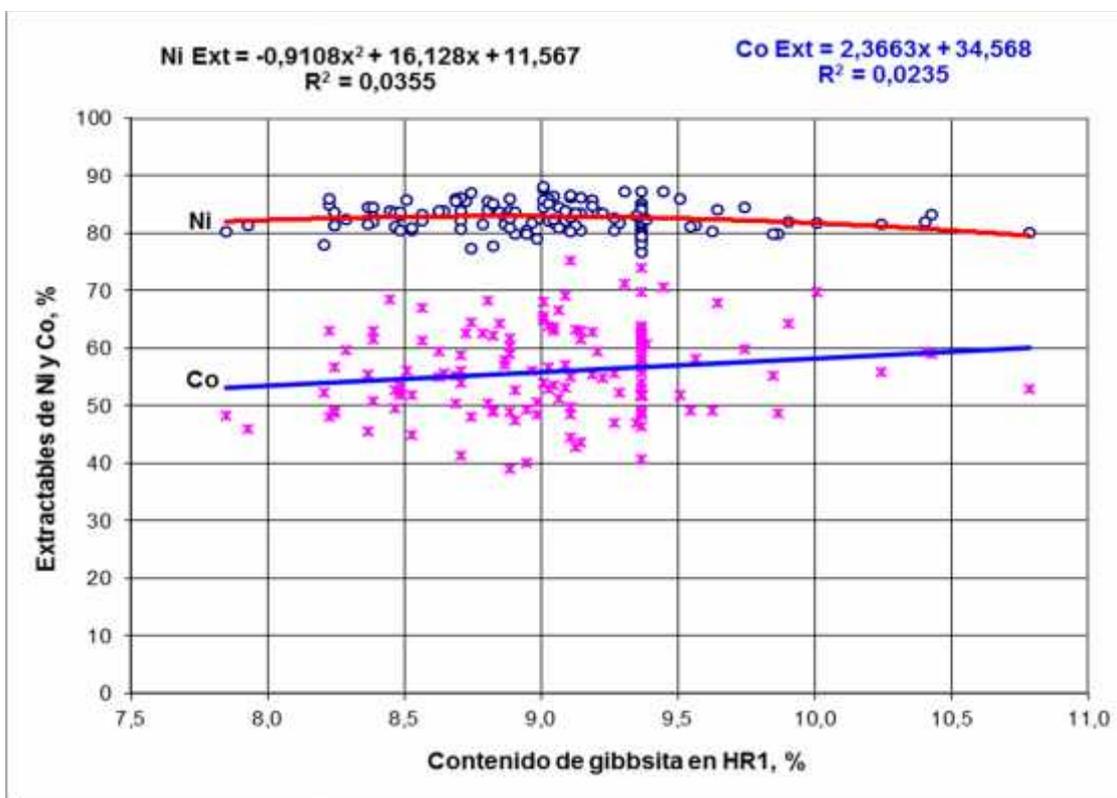


Figura 6. Influencia del contenido de la gibbsita sobre los extractables de Ni y Co. BD limpia.

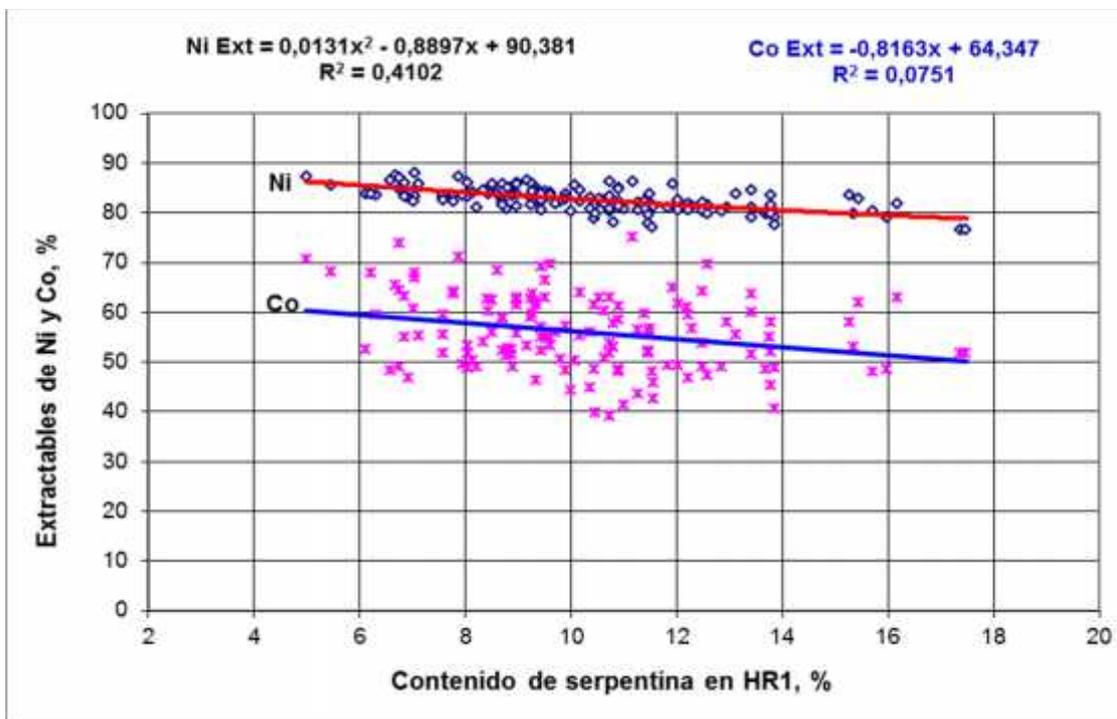


Figura 7. Influencia del contenido de la serpentina sobre los extractables de Ni y Co. BD limpia.

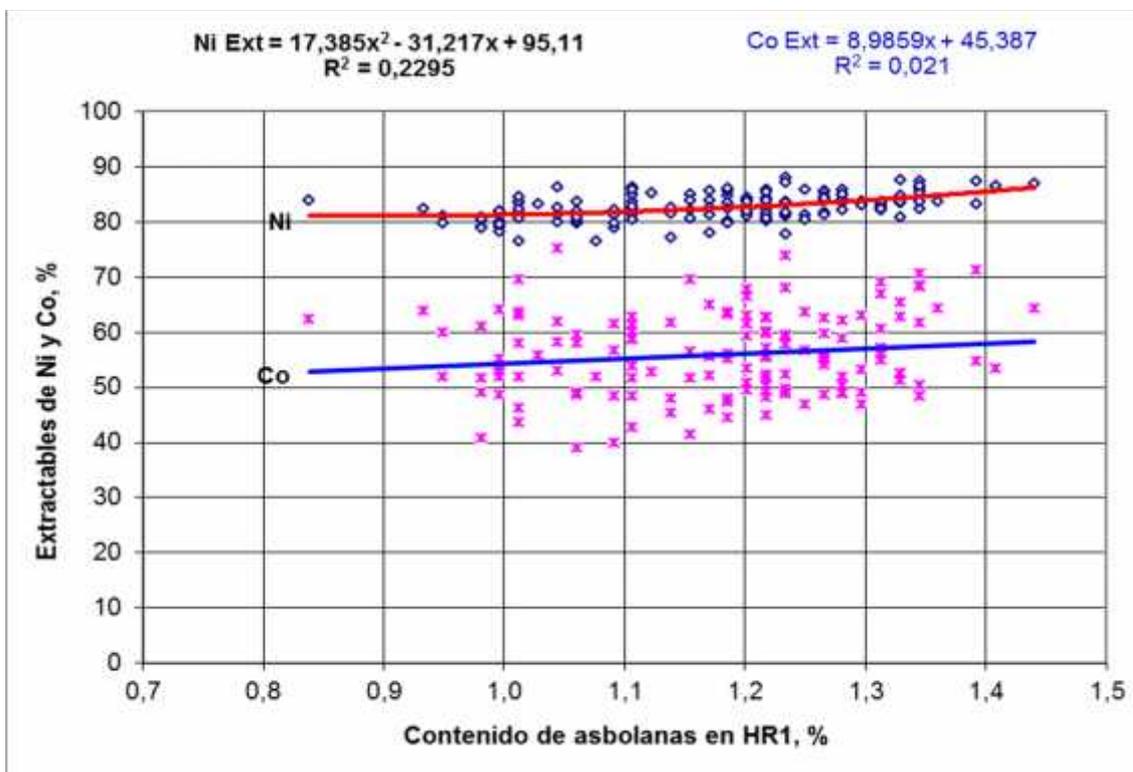


Figura 8. Influencia del contenido de asbolanas sobre los extractables de Ni y Co. BD limpia.

### 3.2. Discusión

En las Figuras de la 2 a la 7 se mostraron las ecuaciones de regresión polinómica de segundo orden para el extractable de Ni como resultado principal, mientras que para el Co solamente se representó su función lineal para ilustrar la tendencia en su comportamiento y poder compararla con la del Ni, ya que es conocido (Chang y Vargas 2013) que el extractable de Co se afecta considerablemente durante el procedimiento empleado en la planta de Hornos de Reducción para la determinación de ambos extractables, notándose en la gran dispersión de los puntos experimentales del Co. Los coeficientes de correlación par y múltiple de los modelos de regresión para el Ni Ext fueron publicados en Chang-Cardona et al. (2005); los primeros, se recordarán en cada caso que se discuta.

Al valorar el comportamiento de los extractables de Ni y Co, respecto a la variación del contenido de los principales minerales alimentados con la mena tecnológica, se pudo establecer las regularidades que más abajo se analizan.

#### 3.2.1. Minerales que contienen Fe

La goethita representa el mineral mayoritario en la mena tecnológica (Tabla 1) con el mayor contenido de Fe, de ahí que su comportamiento sea importante para la reducción, más aún cuando está comprobado que la goethita es portador de Ni y Co (Da Silva et al. 2000; Rojas-Purón 2001; Oliveira et al. 2001), lo que lo convierte en el mayor suministrador de masa de estos metales a la planta, y por tanto, el incremento de su contenido (Figura 2) es bueno para los extractables de Ni y Co, lo cual se corresponde con el conocimiento teórico y práctico de este proceso a nivel mundial. Sus coeficientes de correlación par en los modelos estadísticos del extractable de Ni variaron desde 0,183 para una BD sucia (N=200) hasta 0,422 para la BD limpia que se analiza. Los valores de los coeficientes de distribución  $R^2$  y los de correlación par son aceptables para las condiciones industriales de investigación descritas, pero lo más importante es la clara tendencia a incrementar el Ni Ext (Figura 2) que permite realizar un adecuado análisis técnico diario al comparar los resultados de cada turno.

Todo lo contrario sucede con la nontronita (Figura 3), la que siempre fue difícil de identificar semicuantitativamente por DRX, y de calcular, para poder validar su efecto negativo sobre los extractables de Ni y Co en condiciones de producción comercial, lo que constituye una novedad científica experimental. Lo mismo ocurre con la halloysita, que junto a la

nontronita se denominan arcillas, las cuales acentúan su influencia negativa sobre ambos extractables (Figura 4) con mayor confiabilidad. Los coeficientes de correlación par de la nontronita variaron desde -0,246 para una BD sucia, hasta -0,310 en la BD limpia, mientras que como arcillas alcanzó -0,424 en la última BD.

La magnetita y la maghemita se forman a partir de la disociación de la goethita hasta hematita y la reducción de esta última, dando resultados positivos sobre el Ni Ext (Figura 5). Estos no se disocian durante la reducción, pero portan parte del Ni y el Co que no lograron librarse como óxidos. Los coeficientes de correlación par del sistema magnetita-maghemita respecto al extractable de Ni fueron positivos: 0,159 (BD sucia) y 0,402 (BD limpia), los que son muy parecidos a los de la cromita que tampoco se disocia.

### 3.2.2. Minerales que contienen Al

Los minerales del aluminio son menos conocidos por su influencia sobre la tecnología de reducción, representados en su principal masa por la gibbsita (Figura 6) y en menor medida por la halloysita (Figura 4). En la Figura 6 se observa una regularidad muy importante y novedosa: a contenidos mayores que 9 % de gibbsita el extractable de Ni tiende a disminuir, mientras que el de Co aumenta. Tal comportamiento confirma que se ha incorporado más minerales de la capa superior de LB cerca del contacto con la de escombro, que es más pobre en Ni y más rica en Co. Los valores de los coeficientes de correlación par de la gibbsita: 0,07 (BD sucia) y -0,108 (BD limpia) explican su pequeño coeficiente de distribución  $R^2=0,035$  en la Figura 6. La ambigüedad en los signos y la débil correlación par de la gibbsita con el Ni Ext fue demostrado en el artículo Chang-Cardona et al. (2005).

### 3.2.3. Minerales que contienen Mg y Si

Los minerales del grupo de la serpentina muestran un amplio rango de variación de su contenido, lo que confirma su representatividad y la validez del campo de acción de los modelos estadísticos para su uso industrial. Dichos minerales manifiestan una marcada influencia negativa sobre los extractables de Ni y Co con el más elevado coeficiente de determinación, respecto al extractable de Ni entre todas las funciones, lo cual se refleja gráficamente en la Figura 7. Estos resultados se corresponden con el conocimiento teórico y práctico de este proceso a nivel mundial y corrobora la necesidad de perfeccionar la clasificación de la mena cruda en la planta de Preparación del Mineral y mejorar el control de su calidad en la explotación geólogo-minera en la mina para

disminuir su contenido en la mena tecnológica. También, sus coeficientes de correlación par fueron los más altos en sentido negativo: -0,409 (BD sucia) y -0,639 (BD limpia), muy parecidos a los del cuarzo (Chang-Cardona et al. 2005).

#### 3.2.4. Minerales que contienen Mn

El manganeso no es controlado en el proceso, pero este tiene una relación directa con un grupo de minerales denominado asbolanas, que de acuerdo a los resultados de Laverov (1985) son portadores de mucho más Co que Ni, según la variedad presente. En la Figura 8 se muestra una clara tendencia a incrementar los extractables de Ni y Co al aumentar el contenido de asbolanas en la mena tecnológica alimentada al horno, confirmado por la buena correlación par para el extractable de Ni, cuyos coeficientes son: 0,104 (BD sucia) y 0,463 (BD limpia).

#### 3.2.5. Valor metodológico

La discusión realizada hasta aquí demuestra la validez de la metodología de investigación empleada a escala industrial para largos períodos de tiempo en una Unidad Demostrativa de Producción Comercial de la planta de Hornos de Reducción, la cual puede ser utilizada para generalizar con eficacia los resultados obtenidos al resto de la planta.

El caso estudiado de las menas lateríticas del yacimiento de Punta Gorda, para el cual se diseñó el software COMPRAC, versión 2.0, por presentar una elevada complejidad mineralógica permite recomendar, cuando se trata de otro yacimiento laterítico de mineralología conocida, la elaboración de un software similar, donde cambiarán algunos tipos de minerales y sus cantidades, en correspondencia con la nueva composición química de la mena. Estos tipos de softwares constituyen una herramienta importante para ayudar a confeccionar diariamente la BD de producción; a partir de la cual se realizan los análisis técnicos correspondientes en los grupos o departamentos técnicos de esas empresas productoras, con resultados aceptables de sensibilidad en el comportamiento del Ni Ext y la tendencia lineal del extractable de Co para la toma de decisiones operacionales en la mina y la planta de Preparación del Mineral, respecto a la disminución de los minerales peligrosos para el proceso de reducción. También, se puede emplear en proyectos de ingeniería básica con minerales lateríticos por vía piro-metalúrgica para analizar diferentes alternativas tecnológicas en un proceso de inversiones, mediante el cálculo del balance de masa y energía con la precisión que requiere un simulador, lo cual contribuirá a disminuir el índice de consumo de la

fuentes de energía carbónica que se emplee o puede ayudar a seleccionar una de dichas fuentes.

#### 4. CONCLUSIONES

Se obtuvo a escala industrial, por primera vez, las dependencias gráficas que demuestran con claridad la influencia del contenido de los principales minerales sobre los extractables de Ni y Co, con la suficiente sensibilidad y confiabilidad (en el caso del Ni) para que se puedan tomar decisiones operacionales eficaces en el circuito tecnológico Mina-Preparación de Mineral-Hornos de Reducción.

Se validó una metodología de investigación a escala industrial, para largos períodos de tiempo, en una Unidad Demostrativa de Producción Comercial de la planta de Hornos de Reducción, que permite la generalización de sus resultados al resto de la planta.

Se demostró la efectividad del uso del software COMPRAC para obtener la composición racional de 100 kg de varios tipos de mena laterítica del yacimiento Punta Gorda, con el propósito de ayudar a crear una BD de producción que correlacione los extractables de Ni y Co con el contenido de los principales minerales alimentados a la planta de Hornos de Reducción.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de la empresa niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) en Moa y, en particular, al personal técnico y administrativo de la: Mina, planta de Preparación de Mineral, planta de Hornos de Reducción y Unidad Básica de Servicios Técnicos, por el financiamiento del proyecto Modelo Geo-tecnológico-ambiental del yacimiento Punta Gorda, durante el período 2003-2004, y su excelente apoyo técnico y logístico.

#### 6. REFERENCIAS

ARCE-MOLINA, J. & CHANG-CARDONA, A. 2004: SOFTWARE COMPRAC. Composición Racional. Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA). Registro: 1767-2004.

CHANG-CARDONA, A.; ARCE-MOLINA, J. & TOIRAC, M. M. 2005: Modelos multivariados para predecir los extractables de Ni por la composición mineralógica de la mena laterítica en la planta Punta Gorda. *Minería y Geología* 21(1).

CHANG-CARDONA, A.; ARCE-MOLINA, J. & TOIRAC, M. M. 2006: Modelos multivariados para predecir los extractables de Ni por la composición

química de la mena laterítica en la planta Punta Gorda. *Minería y Geología* 22(2).

CHANG-CARDONA, A. & ROJAS-VARGAS, A. 2013: Optimización del flujo de aire específico para la lixiviación estándar QT del mineral reducido en el proceso Caron. *Minería y Geología* 29(1): 1-16.

DA SILVA, E. F.; DE OLIVEIRA, S. M. B. & FONSECA, E. C. 2000: Extracción química selectiva secuencial sobre el estudio de la distribución del Co, Cr, Zn y Ni en muestras del yacimiento Punta Gorda. *Geochimica Brasiliensis* 14(1): 41-50.

LABRADOR, M.; PROENZA, J. A.; GALÍ, S.; MELGAREJO, J. C.; TAULER, E.; ROJAS-PURÓN, A.; MUÑOZ-GÓMEZ, N. & RODRÍGUEZ-VEGA, A. 2006: Minerales de Mn-Co-Ni en las lateritas de Cuba Oriental: resultados preliminares. *Macla* 9: 281-284.

LAVEROV, N. P. 1985: Yacimientos de minerales metálicos de Cuba. Mir, Moscú, 245 p.

OLIVEIRA, S. M. B; DE MOYA-PARTINI, C. S. & ENZWELIELER, J. 2001: Ochreous laterite: a nickel ore Punta Gorda, Cuba. *Journal South American Earth Science* 14: 307–317.

ROJAS-PURÓN, A. L. 2001: Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. *Minería y Geología* 18(3-4): 21-31.

**Antonio R. Chang-Cardona.**

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Metalurgia-Química.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín. Cuba.  
e-mail: [achang@ismm.edu.cu](mailto:achang@ismm.edu.cu).

**Luis A. Rojas-Purón.**

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Auxiliar. Departamento de Geología.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín. Cuba.  
e-mail: [artrojaspuron@ismm.edu.cu](mailto:artrojaspuron@ismm.edu.cu)

**Jorge Arce-Molina.**

Máster en Ciencias. Profesor Auxiliar. Departamento de Metalurgia-Química.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín. Cuba.  
e-mail: [jarce@ismm.edu.cu](mailto:jarce@ismm.edu.cu).