

# ANALISIS TEORICO DEL BENEFICIO DE LA MENA LATERITICA

## THEORETICAL ANALYSIS OF LATERITIC ORE BENEFIT

**ALBERTO HERNANDEZ FLORES**

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.  
E-mail: ahflores@moa.minbas.cu

**JOSE F. FALCON HERNANDEZ**

Universidad de Oriente.

**RAFAEL A. TRUJILLO CODORNIUX**

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

**AIDA ALMAGUER FURNAGUERA**

CITMA Santiago de Cuba.

**MARIA MAGDALENA TOIRAC SUAREZ**

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

**RESUMEN:** A partir de los trabajos de caracterización de los yacimientos lateríticos cubanos y de la mena de alimentación a la tecnología ácida a presión, en cuanto a las propiedades físicas, diámetro y susceptibilidad magnética de las partículas, se logra predecir los resultados del beneficio en un esquema ideal. Se toma como método de investigación científica la teoría de separación del profesor O. N. Tijonov, cuyo sustento fundamental radica en el estudio de la beneficiabilidad de los minerales desde la óptica de la distribución fraccional de los componentes y fases minerales contenidos en la mena, en función de las propiedades físicas y físico-químicas, y las características de separación.

Como resultado, se obtiene desde el punto de vista teórico un enriquecimiento de la mena de alimentación a la tecnología extractiva por vía húmeda; se incrementa el contenido de Ni y se disminuyen los de Al y Mg.

**Palabras claves:** Yacimientos lateríticos, beneficiabilidad, teoría de separación.

**ABSTRACT:** Taking into consideration the works carried out to characterize Cuban lateritic deposits and ore feeding pressure acid technology, we are able to predict the results of smelting process. The professor O. N. Tijonov theory of separation was used as a method of scientific research. As for the physical properties; diameter and susceptibility of the particles is possible to predict the results of the benefit in an ideal outline.

The concentration of ore feeding humid extractive technology, the increase of Ni and the decrease of Al and Mg are the results of the present work (from the theoretical point of view).

**Key words:** lateritic deposits, concentration, theory of separation.

### INTRODUCCIÓN

Cuba posee una de las mayores reservas conocidas de minerales lateríticos, las que han sido explotadas para la extracción del níquel y el cobalto contenidos en ellas. Sin embargo, los yacimientos lateríticos tienen en mayor cantidad otros componentes que hasta ahora no se utilizan y se acumulan como residuales, ocupando grandes extensiones y contaminando el medio ambiente.

La preparación mecánica a la cual se somete actualmente el mineral no garantiza la calidad de la mena de

alimentación al proceso de metalurgia extractiva, lo que exige durante la explotación minera la extracción de minerales de varios frentes de arranque, que son mezclados para compensar la variabilidad química y mineralógica entre zonas e interzonas; de esta manera, aunque se logra mantener la composición química de los elementos principales (Ni, Co, Fe y Mg) en los límites requeridos, no se regula la composición mineralógica y se pierden recursos que al no contar con métodos de preparación ulterior pasan a los depósitos de residuales (Falcón H., J. F., A. Hernández F., G. Carthy C., 1991).

**TABLA 1. ANALISIS GRANULOMETRICO DEL YACIMIENTO MOA**

Zona u horizonte	Salida (porcentaje en peso) segun fraccion granulometrica (%)					
	+1,6	+0,83	+0,417	+0,074	+0,045	-0,045
Concreciones	13,6	14,16	5,21	14,59	3,55	48,89
Ocres superiores	4,73	6,05	10,99	16,74	6,83	55,26
Ocres medios	2,39	3,1	8,67	21,48	9,09	55,29
Ocres inestructurales	2,3	4,85	7,59	26,15	29,7	29,41
Serpentinita alterada	28,99	9,56	3,88	18,07	11,31	28,19

Las investigaciones geológicas sobre los yacimientos lateríticos, indican contrastes significativos en la concentración de los distintos elementos en las zonas y partículas de diferentes granulometrías que constituyen las partes o el yacimiento en su conjunto. Se observa, por ejemplo, que en la medida que disminuyen los contenidos de sílice y magnesio, aumentan los de hierro y níquel. Estos dos últimos tienden a concentrarse en las partículas más pequeñas (lamas de algunos micrones), mientras que los minerales que contienen cobalto, cromo y manganeso se concentran en partículas intermedias entre 200 y 20 micrones, y por su mayor densidad pueden ser separados de otros silicatos y óxidos acompañantes (Almaguer, F. A., 1989; Gerth, J., 1990).

El objetivo de este trabajo es exponer los resultados del análisis teórico de la separación de componentes a partir del contraste que manifiesta la mena laterítica, en cuanto a diámetro y susceptibilidad magnética de las partículas.

**MATERIALES Y MÉTODOS**

Los materiales utilizados en la investigación son el resultado de los diferentes análisis: granulométrico, químico y mineralógico a que se han sometido varias

muestras de mineral, pulpa cruda y subproductos de la industria.

Como método se utilizó el modelo de la teoría de separación del profesor Tijonov, el cual se fundamenta en el estudio de la beneficiabilidad de los minerales desde la óptica de la distribución fraccional de los componentes y fases minerales contenidos en la mena, en función de las propiedades físicas y físico-químicas, y en las características de separación. Esto permitió el análisis teórico de la separación de componentes a partir del contraste que manifiesta la mena laterítica en cuanto al diámetro y susceptibilidad magnética de las partículas.

**GRANULOMETRÍA**

Las diferentes clases granulométricas de las cortezas de intemperismo presentan contrastes significativos en cuanto al porcentaje en peso de la fracción, contenido químico y mineralógico, que resulta de interés desde el punto de vista tecnológico.

En la Tabla 1 se dan los resultados del análisis granulométrico efectuado a muestras del yacimiento Moa (Rojas Purón, A., 1995). En todos los horizontes del perfil se manifiesta el predominio de las clases finas y resulta más significativo en los horizontes ocrosos sin concreciones, que constituyen la zona menífera principal para los procesos extractivos actuales.

La figura 1 expone los resultados del análisis granulométrico y químico efectuado a una muestra de pulpa de alimentación a la empresa Comandante Pedro Sotro Alba-Moa Níquel S.A. Las barras representan el contenido de níquel y magnesio en las diferentes clases de tamaño y la curva la salida de material en los intervalos granulométricos.

**BENEFICIO DEL MINERAL**

Para estudiar la posibilidad de beneficiar el mineral laterítico se utilizó como método la Teoría de separación de minerales útiles, propuesto por el profesor Tijonov. Éste es un método actual, novedoso e integrador, que además de haber sido utilizado para el carbón, existen experiencias de su empleo en el estudio de menas complejas de cobre-níquel, minerales compuestos por óxi-

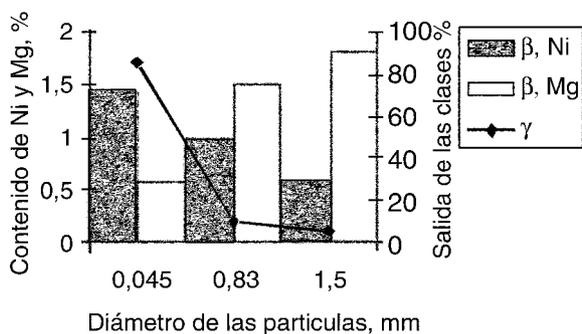


Figura 1. Contenidos de níquel y magnesio por clases de tamaño, %.

No	Argumento y función	Valores numéricos			Observación
1	i	1	2	n = 3	
2	li ( mm)	0,022	0,439	1,16	
3	Δ li ( mm)	0-0,045	0,045-0,833	0,833-1,5	
4	γ (li) Δ li	0,85	0,095	0,055	Σ = 1
5	β (li) % Ni	1,44	1,0	0,43	$\bar{\beta}_{inic} = 1,34$
	β (li) % Co	0,12	0,31	0,05	0,13
	β (li) % Fe	48,6	35,32	46,2	47,2
	β (li) % Al	4,8	7,97	8,4	5,3
	β (li) % Mn	0,60	1,79	0,52	0,7
	β (li) % Mg	0,56	1,81	1,5	0,73
	β (li) % Cr	1,46	3,85	1,66	1,56
6	ε <sub>conc</sub> (li)	0,63	0,11	0	
7	γ (li) ε <sub>conc</sub> (li) Δ li	0,53	0,01	0	
8	$\bar{\gamma}_{conc} = 100 \sum_{i=1}^n \gamma (li) \epsilon_{conc} (li) \Delta li$	$\bar{\gamma}_{conc} = (0,53 + 0,01) \cdot 100 = 54\%$			
9	$100 \gamma (li) \epsilon_{conc} (li) \Delta li / \bar{\gamma}_{conc}$	0,98	0,018	0	

dos ferrosos (Tijonov, O. N., 1990), que tienen relación con la materia prima (laterita) que nos ocupa .

Suponiendo que la propiedad física se puede expresar a través de una variable real ξ, la que puede ser vista como una variable aleatoria al tomar muestras de partículas de forma casual y midiendo ξ para cada una de ellas, los resultados serán diferentes y aleatorios expresando la heterogeneidad del mineral inicial con respecto a ξ.

El porcentaje de partículas que pasan al concentrado con respecto a la masa total será:

$$\bar{\gamma}_{conc.} = 100 \int_{\xi_{min.}}^{\xi_{max.}} \gamma (\xi) \epsilon (\xi) d\xi \tag{1}$$

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

$$\bar{\beta}_{inic.} = \int_{\xi_{min.}}^{\xi_{max.}} \beta (\xi) \gamma (\xi) d\xi \tag{2}$$

$$\bar{\beta}_{conc.} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{conc.}} \int_{\xi_{min.}}^{\xi_{max.}} \beta (\xi) \epsilon (\xi) \gamma (\xi) d\xi \tag{3}$$

La suma a través de todas las posibles fracciones de la masa del componente útil en todo el concentrado. La división por la salida  $\bar{\gamma}_{conc.}$  permite encontrar el valor medio de la concentración del componente útil  $\bar{\beta}_{conc.}$  de ésta los parámetros iniciales resultan las fracciones  $\gamma (\xi)$  y  $\beta (\xi)$  que caracterizan a las partículas de la materia prima por sus propiedades físicas y por la concentración del componente útil en ellas. Estos valores junto a  $\epsilon (\xi)$ , que resulta la característica principal del equipo de beneficio, permite calcular los índices comunes de beneficio, la salida  $\bar{\gamma}_{conc.}$ , el contenido  $\bar{\beta}_{conc.}$  y la extracción o recuperación  $\bar{\epsilon}_{conc.}$ :

$$\bar{\epsilon}_{conc.} = (\bar{\gamma}_{conc.} \cdot \bar{\beta}_{conc.}) / \bar{\beta}_{inic.} \tag{4}$$

**TABLA 3. RESULTADOS DE LA SEPARACION**

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

**TABLA 4. RESULTADOS DEL ANALISIS MAGNETICO**

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

**Beneficio del mineral por el diámetro de las partículas**

Para determinar las posibilidades de beneficiar la pulpa de alimentación al proceso extractivo, aplicando los fundamentos de la teoría de separación, se partió de que la propiedad física para la separación es el diámetro de las partículas (I). El contenido de componente útil y estéril (Ni, Mg y Al) en el material inicial (pulpa) es una función de I. Los resultados del análisis químico-granulométrico se agrupan en tres clases de tamaño: +0,833 mm; -0,833 +0,045 mm, y -0,045 mm (Koniev, V. A., 1987; Hernández Flores, A., J. Falcón H., 1993). La distribución de probabilidad  $\gamma(I)$  se conoce por el análisis granulométrico.

Si se efectúa la separación en un hidrociclón, considerando como concentrado el rebozo o producto fino, que para la separación de minerales con un contenido inicial del 60 al 85 % de las clases -0,045 mm, diámetro interior del cuerpo de 75-300 mm, contenido de sólido alrededor del 20 % y presión en la entrada de 0,02 a 0,025 Mpa, se obtiene un rebozo con un contenido de la clase -0,045 de hasta el 99 % y una salida en el concentrado (rebozo) de 50 a 55 %.

La característica de separación del hidrociclón se puede calcular por la ecuación:

$$\bar{e}_{conc}(I_i) = \bar{\gamma}_{conc} [\gamma_{conc}(I_i) / (\gamma_{inic}(I_i))] \quad (5)$$

donde:

$\bar{\gamma}_{conc}$ : Es la salida del concentrado, % (50 -55 %).

$\gamma_{conc}(I_1)$  / Salida de la fracción en el concentrado, %.

$\gamma_{inic}(I_2)$  / Salida de la fracción en el alimentado, %.

Con estos elementos y auxiliándonos de la Tabla 2, podemos predecir los resultados del beneficio.

Finalmente, se calcula el contenido y recuperación de los elementos en el concentrado por las ecuaciones (3) y (4), respectivamente.

En la Tabla 3 se exponen los resultados completos de la separación y se puede diagnosticar como resultado del beneficio un incremento de níquel hacia el producto fino de la separación en 0,08 %, y una disminución del contenido de aluminio y magnesio de 0,46 y 0,15 %, respectivamente, lo que constituye un beneficio sustancial al proceso en su conjunto por el alto consumo de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de estos elementos en la lixiviación.

**Beneficio por la susceptibilidad magnética del mineral**

Las investigaciones desarrolladas con el mineral del yacimiento Moa, dieron como resultado que la fracción fuertemente magnética se concentra en las clases relativamente gruesas (mayores de 0,5 mm), lo que representa del 15 al 30 % de la mena; la fracción no magnética lo hace hacia las clases granulométricas finas, inferiores a 0,02 mm.

Sobol (1969), en pruebas efectuadas en el reactor "A" de la planta de lixiviación de la empresa Pedro Sotto Alba, observó que la mayor parte de níquel, cobalto y manganeso presentes en la fracción magnética no se lixivian a causa de las grandes dimensiones de las partículas, su mayor densidad (4 800 kg/m<sup>3</sup>), superior a la densidad media del mineral que es 3 550 kg/m<sup>3</sup>, y a la descomposición más lenta de la magnetita. Esto ocasiona una disminución en la velocidad del proceso de lixiviación, un incremento de níquel y cobalto en las colas, y la formación de las "costras" en los reactores que causan serias dificultades en las operaciones de la planta.

El producto grueso (arenas) de la separación se encuentra en un rango de tamaño de - 0,833 a 0,045 mm, al mismo pasan partículas muy pequeñas que se consideran como agua. Además, de acuerdo con las experiencias de Sobol, en este producto se concentran las fracciones fuertemente magnéticas, que ocasionan dificultades al proceso extractivo y aportan poco níquel y cobalto. De aquí, la necesidad de estudiar el comportamiento de este producto al ser sometido a separación magnética.

Partimos del análisis magnético efectuado a una muestra mineral (- 0,833 + 0,045 mm) con la siguiente composición química (%):

Ni	Co	Fe	Al	Mg
1,02	0,20	28,82	6,70	0,996

Los resultados del análisis magnético y las características de separación calculadas según las fracciones magnéticas en el alimentado y el concentrado, se expresan en la Tabla 4.

Estos elementos constituyen la base para el cálculo de los índices cualitativos y cuantitativos de la separación.

ción magnética. El valor de la salida en el concentrado para la fracción no magnética (mayor de 7 amperes) corresponde a las condiciones ideales de la separación, pues teóricamente no deben pasar al concentrado partículas del producto alimentado con baja susceptibilidad magnética, aunque en la práctica industrial, dado los errores de clasificación, no ocurre exactamente así.

Es conocido que la propiedad física que se tiene en cuenta en el proceso de separación magnética es la susceptibilidad magnética, en este caso no fue posible determinar esta propiedad a las distintas fracciones magnéticas; no obstante, las experiencias en este campo han demostrado que en el analizador magnético tubular para intensidades de corriente de 1, 3 y 5 amperes, pasan al producto magnético partículas minerales con susceptibilidades magnéticas medias de 240, 55 y 20 cm<sup>3</sup>/g . 10<sup>-6</sup>, respectivamente; es decir, para pequeñas intensidades de corriente pasan los minerales de mayor susceptibilidad y viceversa; por esta razón, en lo adelante utilizaremos I<sub>i</sub> en lugar de χ<sub>i</sub>. De acuerdo con las consideraciones expuestas, los índices de la separación resultan de la manera siguiente:

$$\Delta I_i, A \quad 0-1 \quad 1-3 \quad 3-5 \quad 5-7 \quad 7-10$$

$$\gamma(I_i) \epsilon_{conc.}(I_i) \Delta I_i \quad 0,06 \quad 0,086 \quad 0,015 \quad 0,005 \quad 0$$

$$\bar{\gamma}_{conc.} = 100 \sum_{i=1}^n \gamma(I_i) \epsilon_{conc.}(I_i) \Delta I_i = 16,6\%$$

$$100 \gamma(I_i) \epsilon_{conc.}(I_i) \Delta I_i / \bar{\gamma}_{conc.} \quad 0,36 \quad 0,51 \quad 0,09 \quad 0,03 \quad \dots$$

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

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

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

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

y la recuperación calculada por la fórmula convencional (4), queda como:

$$\bar{\epsilon}_{Ni} = 20,07\%; \quad \bar{\epsilon}_{Co} = 22,29\%; \quad \bar{\epsilon}_{Fe} = 20,93\%;$$

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

En la Tabla 5 se exponen los resultados totales de la separación, de forma similar al ejemplo anterior. Convencionalmente, a los productos del beneficio magnético se les denomina concentrado y colas, como en todos los procesos de beneficio. Aquí se denominarán producto

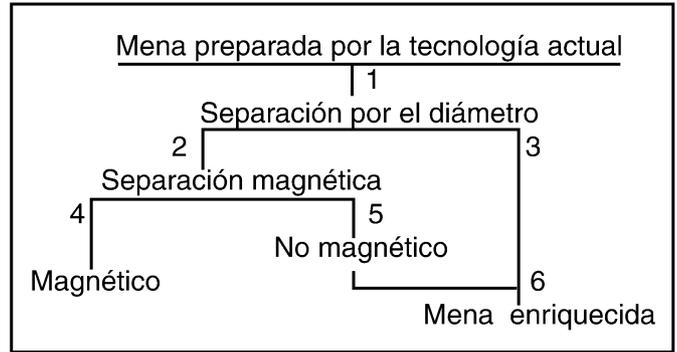


Figura 2. Esquema ideal del

magnético y producto no magnético, respectivamente, ya que este último puede resultar más conveniente para el proceso extractivo.

Si sólo se tiene en cuenta el contenido de los metales, podría tomarse como producto más conveniente el magnético, pero éste únicamente representa el 16,6 % de la operación y un 7% de la pulpa inicial; por su parte, el producto no magnético representa el 83,4 % de la separación y en éste se obtiene la mayor extracción o distribución de cada uno de los metales.

Al separar el 14,77 % de aluminio y el 10,55 % de magnesio del producto arenas de la clasificación, teóricamente queda beneficiado el mineral de entrada al proceso extractivo, conformado por la suma del rebozo o producto fino de la clasificación, más el producto no magnético. Por otra parte, se obtiene un concentrado magnético con un contenido de cobalto.

### INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SEPARACIÓN TEÓRICA EN UN ESQUEMA IDEAL

Si se integran en un esquema único de beneficio las dos operaciones de separación estudiadas, se obtiene un esquema ideal (Fig. 2) para el beneficio de la mena laterítica que se alimenta al proceso extractivo.

Teóricamente, se puede afirmar que al aprovechar el contraste que existe entre las propiedades físicas, diámetro y susceptibilidad magnética de la mena, se puede enriquecer o mejorar la calidad de ésta para el proceso extractivo. Esto permite disminuir el contenido de aluminio y magnesio en la pulpa en un 8,56 y 6,58 %, respectivamente (Tabla 6), y resultan los elementos que mayor cantidad de ácido sulfúrico consumen en el proceso de

TABLA 5. RESULTADOS DE LA SEPARACION MAGNETICA

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

**TABLA 6. RESUMEN DE LOS INDICES GENERALES DEL PROCESO**

No.	Producto	$\gamma$ (%)	Contenido (%)					Recuperacion (%)				
			Ni	Co	Fe	Al	Mg	Ni	Co	Fe	Al	Mg
1	Mena inicial	100	1,34	0,13	47,2	5,3	0,73	100	100	100	100	100
4	Magnetico	7,63	1,17	0,27	36,25	5,95	0,63	6,66	15,84	5,86	8,56	6,58
6	Pulpa enriquecida	92,36	1,35	0,118	48,11	5,24	0,74	93,34	84,16	94,14	91,44	93,42

lixiviación; además, se incrementa el contenido de níquel en 0,01 %, lo que representa más de 200 toneladas de Ni al año.

El producto magnético se caracteriza por un alto contenido de cobalto y significativos valores en níquel, esto puede estar relacionado con el grosor de las partículas (-0,833 + 0,045 mm) que conforman el producto. En este rango de tamaño se concentran las asbolanas o hidróxidos impuros de manganeso a los que se encuentra asociado el cobalto; además, el níquel presente en este producto está contenido fundamentalmente en la fase magnetita, la cual ocasiona dificultades tecnológicas al proceso extractivo, por lo que resulta conveniente su separación de la mena.

### CONCLUSIONES

- El contraste en las propiedades físicas (diámetro y susceptibilidad magnética) de las partículas, que se manifiesta en las menas lateríticas, hace posible su beneficio mediante la inclusión de variantes de esquemas tecnológicos que contemplen operaciones de clasificación-separación magnética.
- Se logra separar y/o concentrar componentes que se diferencian por su diámetro y susceptibilidad magnética: el níquel se concentra en el producto fino de la clasificación, mientras que el aluminio y el magnesio lo hacen en el producto grueso; el producto magnético se caracteriza por un alto contenido de cobalto.

### BIBLIOGRAFÍA

- ALMAGUER, F.A.: "Mineralogía y geoquímica de las cortezas de intemperismo lateríticas de las rocas ultramafitas de la provincia Holguín", Tesis Doctoral, Universidad de Ostrava, Checoslovaquia, 1989.
- FALCÓN H, J.F., A. HERNÁNDEZ F., G. CARTHY C.: "Beneficio de minerales lateríticos, utilización y perspectivas", I Conferencia Internacional de Minería y Geología Geomin '91, Moa, 1991.
- FUSHIMI, H.: "Beneficiation of magnesium silicate nickel ore", J. Min. Met. Inst. Japan, 1964.
- GERTH, J.: "Unit - cell dimensions of pure and trace metal associated goethites", *Geochimica and Cosmochimica Acta* (London), 54 (2): 363 - 3712, 1990.
- HARREY, W.W., HOSSAIN, M. A.: "Co recovery of chemium From domestic nickel laterites", J. Met. 39 (1), 1986.
- HERNÁNDEZ FLORES, A., J. FALCÓN H.: "Preparación y beneficio de minerales lateríticos en el proceso ácido a presión", *Minería y Geología*, X (2): 17-24, 1993.
- KONIEV, V.A.: "Investigación preliminar para el enriquecimiento de la pulpa de entrada a la fábrica de Moa", Informe técnico, CIS Unión del Níquel, Moa, 1987.

QUINTANA PUCHOL, R. y otros: "Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa: análisis granulométrico", *Minería y Geología*, 3 (1): 94-104, 1985.