

ANALISIS LA COMPOSICION SUSTANCIAL DEL PRODUCTO NO MAGNÉTICO DE LA MENA NIQUELÍFERA EN UN PERFIL LATERÍTICO DEL YACIMIENTO PUNTA GORDA, MOA, HOLGUÍN.

SUBSTANTIAL COMPOSITION ANALYSIS OF THE NON MAGNETIC PRODUCT OF A NICKEL ORE FROM THE LATERITIC PROFILE OF PUNTA GORDA

George Agyei¹, Alberto Hernández Flores², Alfredo Luís Coello Velázquez³

¹University of Mines and Technology, Box 237, Tarkwa, Ghana, Email: georgegyei@yahoo.com

² Centro de Investigaciones de Níquel, Carretera Moa Baracoa, s/n, Email: ahflores@cil.moa.minbas.cu

³ Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 833329, Moa, Email: acoello@ismm.edu.cu

RESUMEN

En este trabajo se realiza la caracterización de las propiedades físicas más contrastantes de la mena níquelífera: tamaño y densidad mediante métodos de distribución fraccional junto con las técnicas de análisis de la Florescencia de Rayos-X, Absorción Atómica. Se establecen las regularidades de la distribución másica y del contenido de los elementos siguientes: Ni, Co, Fe, Al, Mg, SiO₂, Mn y Cr en los intervalos de tamaño y densidad. Además se determinan las funciones que permiten describir la distribución másica y del contenido del mismo a partir de los contrastes ya mencionados, aspecto que permitirá predecir la posibilidad de identificar las partículas de acuerdo a las propiedades físicas mencionadas. Durante la caracterización densiométrica de la mena ferroníquelífera se utilizó el tetrabromoetano. Existe predominio de las fracciones ligeras menores de 2,80 g/cm³ al combinar el tamaño y la densidad. El análisis fraccional según el tamaño y la densidad de la mena laterítica del níquel permite concentrar notablemente el dióxido de silicio, el magnesio y aluminio en las fracciones ligeras (menores de 2,70 g/cm³); la SiO₂, entre 17-26 %; el Al, entre un 12 al 19 % en los productos flotados de los tamaños mayores de 0,4 mm. El Cr y el Co se concentran en las fracciones pesadas, mayores de 2,90 g/cm³; las intermedias, 2,70 a 2,90 g/cm³, son ricas en níquel y las menos densas (menores de 2,70 g/cm³), tienden a empobrecerse en níquel.

PALABRAS CLAVE: No magnético; mena, níquel; fraccional; medio denso; distribución

ABSTRACT

Sizing and dense media fractionation together with X-ray Fluorescence and atomic absorption characterisation is used to characterize the nickel laterite ore. This work presents the regularities of mass and content distribution of Ni, Co, Fe, Al, Mg, SiO₂, Mn and Cr in different ranges of sizes and densities. The functions for describing the mass and content distribution of the ore are determined, an aspect that guides to predict the possibility of identifying the particles according to these physical properties. During the dense medium analysis of the oxide ore, tetrabromoethane was used. The results also show that there is a predominance of light fractions less than 2.80 g/cm³ when the size of particles and density of the medium are combined. Fractional analysis based on size and density concentrates silicon dioxide, magnesium and aluminium in the float fraction (less than 2,70 g/cm³): SiO₂ with values between 17-26%; and Al, between 12 to 19% in the float products of particles sizes greater than 0.4 mm. Cr and Co concentrate in the heavy fractions above 2.90 g/cm³; the

intermediate fractions, 2,70 to 2,90 g/cm³, are enriched in nickel; and the final float obtained with density below 2,70 g/cm³, is depleted in nickel.

KEY WORDS: Non magnetic; nickel; ore; fractional, distribution, dense medium

INTRODUCCIÓN

La mena níquelífera formada a partir de la meteorización de las rocas básicas y ultrabásicas de minerales serpentinitas del nordeste de Cuba, constituye el material de alimentación del proceso Caron de la Empresa “Comandante Che Guevara” ubicada en Moa, Cuba. Esta mena oxidada es denominada industrialmente la *laterita de balance*.

La mena, laterita de balance para el proceso Caron, exige un contenido mayor de 35 % Fe, y mayor del 1% para el Ni (Yeste, 1979), pero actualmente ya se empieza a tener en cuenta la presencia de otros metales como el Al, Cr, Co, Mn, que pueden ser extraídos con una visión más integral para su aprovechamiento, de ahí la necesidad de conocer con más detalle los aspectos de la composición sustancial de esta mena laterítica.

Los yacimientos lateríticos cubanos se caracterizan por ser menas oxidadas con potentes espesores de los horizontes de ocre que alcanzan valores de algunas decenas de metros. (Vera, 2001; Pérez-Mello, 2003). Su granulometría, composición química y mineralogía son esenciales para la selección del tratamiento metalúrgico.

Varios trabajos han caracterizado estos parámetros con distintos enfoques. Ponce y Carrillo (1984) valoran la composición sustancial, la granulometría y el carácter magnético de la mena ferroníquelífera en el yacimiento “La Delta”. Más tarde, sobre la base de una muestra patrón de laterita, Ponce y Carrillo (1988) determinan la composición mineralógica por fracciones granulométricas en un rango de tamaño bastante amplio. Las investigaciones de (Almaguer y Zamarsky, 1993; Almaguer, 1995; Beyris, 1997; Rojas, 1995; Rojas et al., 2005) indican algunos contrastes en la concentración de los diferentes elementos en las zonas y partículas de diferentes granulometrías, por ejemplo, en la medida que disminuyen los contenidos de sílice y magnesio aumentan los contenidos de hierro y níquel.

El níquel y el hierro tienden a concentrarse en las partículas más pequeñas (0,044mm) mientras que los minerales que contienen cobalto, cromo y manganeso se concentran en partículas intermedias entre 0,2 mm y 0,020 mm micrones y por su mayor densidad pueden ser separados de otros silicatos y óxidos acompañantes. (Almaguer 1989, 1995 Almaguer y Zamarsky; 1993; Almaguer 1996 a 1996 b; Rojas, 1995; Agyei, 2005, 2006)

Beyris (1997) evaluando la influencia de la composición mineralógica de la pulpa cruda en la sedimentación demuestra que las fases silicatadas se concentran en las fracciones gruesas, mientras que las fases de óxidos de hierro lo hacen en las fracciones granulométricas finas, lo cual fue confirmado en el trabajo de (Rojas y Beyris, 1994) para diferentes frentes de explotación.

(Carthy y Falcón, 1985; Leyva et al., 1995) reportan la obtención de concentrados de cromita a partir de un esquema combinado de clasificación-separación magnética-

beneficio gravitacional de las colas la planta “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro. Para las lateritas de balance, (Hernández, et al 1995) aplicando un minucioso esquema de lavado, demuestran que en el rebose de la clasificación se incrementa el contenido de hierro y níquel, y disminuye el contenido de aluminio y magnesio.

A finales de los años 80 y principios de los 90, investigadores del Departamento de Metalurgia del Instituto Superior Minero Metalúrgico realizaron un grupo importante de trabajos encaminados al beneficio de las lateritas y sus escombros con varios enfoques, que han quedado resumidos en los trabajos de (Hernández et al 1995; 1997, Falcón et al.1997a, 1997b, 2000; Coello et al 1998; Ramírez 2002).

Hernández (1997, 2000) realiza un análisis teórico sobre la posibilidad de la concentración de los componentes principales del mineral laterítico, aplicando los elementos metodológicos aportados por Tijonov (1978,1984), de acuerdo a sus resultados es posible el incremento de níquel en 0,08 % y una disminución de contenido de aluminio y magnesio en 8,56 % y 6,58 % respectivamente en los rebozos de la clasificación.

(Coello et al., 1998) después de un riguroso análisis de los trabajos precedentes fundamentaron la inconveniencia de usar las curvas de beneficiabilidad para el estudio de los minerales lateríticos y sus escombros, y propone el uso del enfoque fraccional por las siguientes razones:

- Las partículas minerales se diferencian no por una propiedad física, sino por varias, lo cual implica el uso de diferentes propiedades de separación.
- Las partículas minerales son portadoras no solo de un mineral útil, sino de varios.

Agatzini y Zafiratos (2004a ,2004b) beneficiaron mineral serpentinitico de Kastoria, norte de Grecia mediante separación magnética con la disminución de calcita por 37 % y pérdida de níquel a los productos no magnéticos por 5 %, obtuvieron recuperación de níquel y cobalto en material serpentinitico por 60 % 45 % respectivamente mediante lixiviación en pila, sin embargo la efectividad del proceso estaba mermada por el contenido de calcita que afecta negativamente a la permeabilidad de la pila de lixiviación.

Agyei (2006) describe las regularidades de la distribución másica y del contenido de los elementos siguientes: Ni, Co, Fe, Al, Mg, SiO₂, Mn y Cr en los intervalos de tamaño, intensidad de corriente y densidad, herramientas, que aportan nuevos conocimientos sobre las potencialidades de preconcentración de los componentes cuyo efecto, contribuye a regular la calidad de la laterita de balance suministrada al proceso extractivo para su aprovechamiento más integral y sostenible. En este trabajo se determinan las funciones que permiten describir la distribución másica y del contenido del mismo a partir de los contrastes ya mencionados, aspecto que permite predecir la posibilidad de identificar las partículas de acuerdo a las propiedades físicas mencionadas. También se complementan los resultados con una valoración mineralógica entre los productos de separación y las propiedades físicas.

El estudio y conocimiento sobre las potencialidades de preconcentración de los componentes de la laterita de balance es aún insuficiente; cualquier estudio orientado a la inclusión de operaciones de beneficio en calidad de preconcentración en el proceso Caron es preciso valorar la distribución de elementos químicos y las fases minerales en la mena laterítica, comprendiendo medio denso con rango de densidad desde 2,50 a 2,94g/cm³.

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

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

Las curvas de beneficiabilidad constituyen una vía eficiente para la evaluación de la separación de menas cuyos minerales se diferencian en una sola propiedad física ξ (densidad, ρ ; susceptibilidad magnética χ y otras). Tijonov (1984) demuestra matemáticamente la posibilidad del cálculo de los parámetros de la curva de beneficiabilidad a partir de las funciones de distribución diferencial másica y de contenido. Por otra parte, el índice de contraste (desviación ponderada relativa del contenido del componente útil, fórmula a pesar de ser posible su utilización como criterio valorativo, brinda una información extremadamente pobre sobre la materia prima mineral.

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

donde : β_{inic} : contenido inicial de la mena.

β : contenido del componente útil en el grano.

q : unidades másica de los granos en la muestra.

n : número de granos en la muestra.

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

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

donde:

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

De la fórmula (2) se puede apreciar que menas con distintos grados de beneficiabilidad $\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$ pueden tener igual índice de contraste, de manera que no es aconsejable el uso de este criterio para menas complejas (multicomponentes); como medida de beneficiabilidad puede conducir a errores impredecibles. La desviación media probable (E_p , E_{cont} probable) comúnmente no es usada para la evaluación de la eficiencia de operaciones unitarias como las mesas de concentración, canales helicoidales, separadores cónicos, etc., debido a la gran cantidad de variables operacionales que pueden afectar la eficiencia de la separación. Además, como en el caso anterior no ofrece información alguna de las características de la materia prima mineral o producto de la separación.

La función de distribución diferencial $\gamma(\xi)$ de las partículas de cualquier mezcla de cualquier propiedad física ξ , es aquella función para la cual el producto $\gamma(\xi) d\xi$ es igual al fracción másica de cualquier intervalo elemental $[\xi, \xi + d\xi]$ y su incremento $d\xi$; la función

$\gamma(\xi)$ no es otra cosa que la distribución diferencial de la densidad de distribución del sólido en las fracciones elementales (Tijonov O. N., 1984) Por su parte, la función $\beta(\xi,)$ es una función continua del conjunto de valores de los contenidos medios del componente útil (o nocivo) en cada fracción i [ξ_i, ξ_{i+1}] cuando $\Delta \xi \rightarrow 0$ y $n \rightarrow \infty$ (número de fracciones) en el intervalo [ξ_{\min}, ξ_{\max}].

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

El principal objetivo del trabajo es describir la fracción ligera e la pesada del producto no magnético atendiendo la variación de la densidad, través de la determinación de las funciones de distribución $\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi,)$.

MÉTODOS Y MATERIALES

Las muestras son productos no magnéticos de cinco fracciones granulométricas (-4,0 + 2,0) mm; (-2,0 + 1,0) mm; (-0,4 + 0,2) mm; -(0,2 + 0,071) mm de una mena niquelífera seleccionadas de los pozos 45 y 44 del bloque M-49 del yacimiento Punta Gorda, suministrado al proceso Carbonato-Amónico que fue analizado como se ilustra en la figura 1.

En la caracterización, se empleó un tamizado por vía húmeda; según la serie de Tyler en los diámetros de partículas entre 4 y 0,71 mm, teniendo en cuenta investigaciones similares (Falcón, 1993, 1998; Ramírez., 2002; Coello et al., 1998; Hernández., 1997; Mitrofanov et al., 1982).

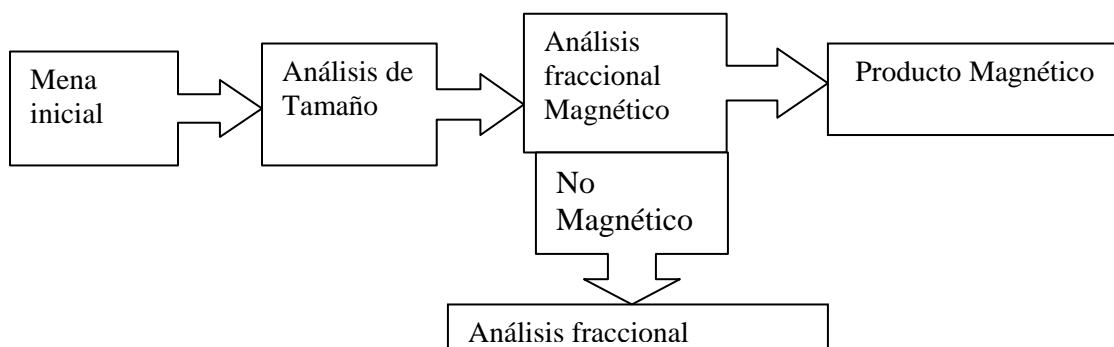


Fig.1 Esquema general del análisis fraccional

El análisis magnético por vía seca fue realizado en el Laboratorio de Beneficio de Minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Las

intensidades de corriente estudiadas fueron: 0,5; 1; 2; 4 y 6 A, aplicadas a las fracciones granulométricas (-4+2) mm; (-2+1) mm, utilizando un separador de rodillos marca 13b-C θ , el cual sirve para el enriquecimiento en seco de pequeñas muestras de minerales y materiales débilmente magnéticos. El separador empleado tiene un rodillo de 100 mm de diámetro y 80 mm de longitud; la intensidad del campo alcanzó 950 k A/m; el peso del separador es de 149 kg, las dimensiones exteriores son las siguientes:

Longitud-----900 mm
 Ancho-----520 mm
 Altura-----545 mm.

Las fracciones finas: (-1,0+0,4) mm; (-0,4+0,2) mm; (-0,2+0,071) mm; (-0,071+0,044) mm y -0,044 mm fueron separadas por vía húmeda en un Tubo de Davis en el Centro de Investigaciones del Níquel y en el ISMM de Cuba siguiendo los procedimientos establecidos para ellos. Para el análisis densiométrico se utilizó el tetrabromoetano (CHBr₂. CHBr₂. PRS) con densidad de 2,935-2,935 g/cm³ en 20/4 grados Celsius. Para obtener distintas densidades, al tetrabromoetano se le diluyó el alcohol etílico de 96 g/l. La densidad de la solución preparada fue comprobada mediante el método de Baume.

El contenido de los elementos químicos presentes en la muestra inicial, en los productos del análisis granulométrico, de la separación magnética y productos del medio denso, fueron realizados los análisis en el Laboratorio Central de la empresa Moa Nickel S.A., y Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Cuba, utilizando la técnica de Fluorescencia de Rayos X y Absorción Atómica. Las características técnicas y condiciones de trabajo del equipo son las siguientes: espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos-X, Phillips PW 1480 utilizando un tubo de Rayos-X con Rh tipo PW2182/00, con un régimen de 3000 w y 100 Kv al vacío con colimador fino.

RESULTADOS Y DISCUSION

Distribución fraccional másica según tamaño de la partícula

La distribución de las partículas no magnéticas aumenta a partir de 2,0 mm hasta 0,044 mm. Esta distribución, igual que la del análisis granulométrico de la mena inicial, tiene un comportamiento exponencial, demostrando que las propiedades de la mena niquelífera están controladas por los productos débilmente magnéticos, que constituyen los mayores porcentajes de varias fracciones granulométricas. A continuación se muestra el modelo de la función que describe la distribución másica cuyos valores experimentales se hallan en la tabla 1.

$$\gamma(l_{mm}) = \int_{l_{min}}^{l_{max}} 18,237e^{-0,6923l} dldl \quad (3)$$

R²=0.90

Tabla I. Función de distribución másica de los productos no magnéticos de las clases granulométricas

Clases de tamaño, mm.	Tamaño de partícula, l.	Magnitud de intervalo clase Δl	Función de distribución, $\gamma(l)$, 1/mm	$\gamma(l) \cdot \Delta l$
-10+8	9	2	0,3247	0,6493
-8+4	6	4	0,1594	0,6377
-4+2	3	2	0,2639	0,5277
-2+1	1,5	1	0,3450	0,3450
-1.+0.4	0,7	0,6	1,4888	0,8933
-0.4+0.2	0,3	0,2	4,2000	0,8400
-0.2+0.071	0,1355	0,129	6,5147	0,8404
0.071+0.044	0,0575	0,027	31,6593	0,8548
-0.044+0	0,022	0,044	21,3795	0,9407

Distribución de los componentes principales según tamaño de la partícula

La laterita de balance del yacimiento Punta Gorda es esencialmente ferrosa, tabla II, donde el hierro se encuentra entre un 20 a un 50 % según las diferentes fracciones granulométricas. Se encuentran además como elementos mayoritarios en esta mena el Mg, Al, SiO₂, Cr, y Mn. El níquel y el cobalto son microelementos de mucho interés.

Tabla II. Función de contenido $\beta(l_{nm})$ de los productos no magnéticos de Punta Gorda.

Clases de tamaño (mm)	Tamaño promedio de la partícula (mm)	Composición química, %							
		Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-10+8	9	1,84	0,300	19,97	5,82	14,60	23,61	0,04	3,00
-8+4	6	1,78	0,312	20,81	5,63	10,09	25,69	0,02	2,77
-4+2	3	1,41	0,159	20,63	3,84	12,11	24,47	0,01	2,07
-2+1	1,5	1,44	0,275	23,05	2,37	9,52	13,09	0,29	3,33
-1.+0.4	0,7	1,56	0,335	22,60	2,59	8,96	14,23	0,28	2,27
-0.4+0.2	0,3	1,77	0,491	30,98	1,04	5,29	5,54	1,65	4,38
-0.2+0.071	0,1355	1,71	0,362	37,58	0,69	3,91	5,01	1,83	2,66
0.071+0.044	0,0575	1,40	0,138	44,58	0,57	3,89	3,95	2,22	1,02
-0.044+0	0,022	1,45	0,083	49,80	0,44	3,86	3,62	1,68	0,59

El hierro tiende a concentrarse en las fracciones granulométricas menores de 1,0 mm, en particular en la fracción más fina (- 0,044 mm) detectándose una marcada diferencia en los contenidos de Fe, a partir de las fracciones menores de 2 mm, donde el hierro incrementa su contenido en las fracciones más fina, llegando alcanzar hasta un 49,7 %, en tanto en las fracciones gruesas sus contenidos son del orden del 20 %. En el caso del aluminio, este metal incrementa su contenido en las fracciones granulométricas mayores de 2,0 mm, en las cuales su contenido es del orden de 15 %, en tanto en las clases más finas disminuye por debajo de 3,6 %.

Es significativo para el dióxido de silicio y el magnesio su incremento en las fracciones mayores de 2,0 mm, en las cuales alcanza valores de hasta 25 % para el SiO₂ y 6 % para el Mg, tabla II. En tanto disminuyen significativamente su contenido en las fracciones menores de 2,0 mm, donde el SiO₂ posee valores alrededor de un 7 a un 3,5 %, y el Mg de 1,9 a un 0,5 %. De manera general, el tamaño de grano de 1,0 mm constituye una “barrera” significativa para concentrar Mg, Al y SiO₂, teniéndose en cuenta su alta representatividad en la composición granulométrica de esta mena. El cromo tiende a concentrarse en las partículas menores de 1,0 mm y mayores de 0,044 mm describiendo una función potencial, alcanzando su máximo contenido en la clase granulométrica (- 0,071 + 0,044 mm) como se manifiesta. Al manganeso se le observa una tendencia de concentración muy peculiar en este material laterítico de balance posee dos grupos granulométricos notables: por una parte se concentra en las fracciones gruesas mayores de 2,0 mm, en particular en los granos mayores de 8,0 mm donde alcanza un 2,9 % de Mn., y por otra parte en las fracciones medianamente finas, menores de 0,4 mm y mayores de 0,07 mm, donde alcanza valores de hasta 2,84 %. Respecto a los metales de máximo interés, Ni y Co, vale decir que material laterítico de balance posee contenidos apreciables, cumpliendo los parámetros industriales requeridos para esta materia prima mineral. Son significativos los altos contenidos de Co que posee, las partículas menores de 0,071 mm.

Para el níquel se observa una tendencia de enriquecimiento desde 1,0 mm hacia 0,044 mm de forma polinómica según las clases granulométricas. Otros investigadores (Almaguer y Zamarsky, 1993; Rojas 1995, Coello et al., 1998) habían detectado para este metal una concentración hacia las fracciones más finas. Se establece para el material ocroso níquelífero de perfiles lateríticos de Moa que el Ni tiende a concentrarse hacia las fracciones más finas menores de 45 micrones. Los altos valores de níquel reportados en las fracciones mayores de 1,0 mm podrían estar asociados además de la goethita y la hematita, con la antigorita, lizardita, y las cloritas que predominan en estas fracciones gruesas.

En la tabla 12 se relacionan los valores de la distribución de contenido $\beta(l, \rho)$ obtenidos experimentalmente y a través del modelo, la reproducibilidad del modelo se corrobora a través del análisis estadístico donde se aprecia de forma general que el coeficiente de correlación es superior a 0,80, con respecto al análisis de varianza, en todos los casos el Fisher calculado es menor que Fisher crítico con probabilidad mayor que 0,05.

Distribución fraccional másica según tamaño de la partícula y la densidad del medio

Los resultados de la función de distribución másica al considerar el tamaño y la densidad en la tabla 2 manifiestan que los mayores porcentajes de los productos se hallan en los flotados. Además, demuestran que la separación por densidad no es significativa para la mena laterítica a pesar de evidencias de enriquecimiento de algunos componentes.

Tabla III. Función de distribución $\gamma(l, \rho)$ de Punta Gorda.

Densidad g/cm ³	Función de distribución. cm ³ /(mm.g)				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,94+2,92	0,01963	0,02539	0,19670	0,15120	0,07143
-2,92+2,90	0,00000	0,01235	0,02140	0,03343	0,05323
-2,90+2,70	0,00000	0,01001	0,00983	0,03108	0,05143
-2,70+2,50	0,00000	0,00000	0,00469	0,03041	0,02185
-2,50+0,0	0,41994	0,25371	0,26530	0,12348	0,05602

A continuación se exponen los modelos de la función de distribución másica tomando como propiedad, el tamaño y la densidad del material de los productos, cuyos valores numéricos se ilustran en las tablas 1 y 2.

$$\gamma^{+1.0}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(18,42e^{-0.6923l})(0,59\rho^2 - 2,47\rho + 2,28)] dld\rho \quad (4)$$

$$R^2_L = 0,90; \quad R^2_\rho = 0,99$$

$$\gamma^{+0.4}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(18,24e^{-0.6923l})(2,02\rho^2 - 9,08\rho + 8,24)] dld\rho \quad (5)$$

$$R^2_L = 0,90; \quad R^2_\rho = 0,90$$

$$\gamma^{+0.2}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(18,24e^{-0.6923l})(1,54\rho^2 - 6,67\rho + 5,96)] dld\rho \quad (6)$$

$$R^2_L = 0,90; \quad R^2_\rho = 0,93$$

$$\gamma^{0.071}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(18,24e^{-0.6923l})(0,53\rho^2 - 1,77\rho + 1,30)] dld\rho \quad (7)$$

$$R^2_L = 0,90; \quad R^2_\rho = 0,98$$

Distribución de los componentes principales según tamaño de la partícula y densidad del medio de análisis.

A partir de las tablas 4 hasta la 11 se muestran las funciones experimentales de distribuciones bidimensionales $\beta(l, \rho)$ de los componentes. Se evidencian que el hierro aluminio dióxido de silicio muestran una concentración bien definida. El dióxido de silicio y el aluminio tienden a concentrarse en los productos ligeros y tamaños gruesos mientras el hierro se concentra en los productos pesados; la sílice alcanzando hasta 26,45 % para la fracción (-4,0+2,0) mm mientras el aluminio oscila entre 13 y 18 % para la fracción mayores de 1,0 mm. Los elementos que poseen valores intermedios como Mg, Cr, y Mn también exhiben regularidades en su modo de concentración: el Mg se enriquece en los productos ligeros mientras el Cr lo hace en los productos pesados mayores de 2,90 g/cm³. El níquel se enriquece en las densidades intermedias entre 2,50-2,70 g/cm³ en todo el espectro granulométrico, mientras que el cobalto se enriquece en las densidades pesadas mayores de 2,70 g/cm³ en todo el espectro granulométrico.

A partir de las ecuaciones 8 hasta 14), se relacionan las expresiones matemáticas que describen estas funciones de distribución de contenido, $\beta(l, \rho)$, de los componentes.

En la tabla 13 se relacionan los valores de la distribución de contenido $\beta(l, \rho)$ obtenidos experimentalmente y a través del modelo, la reproducibilidad del modelo se corrobora a través del análisis estadístico donde se aprecia de formas general que el coeficiente de correlación es superior a 0,80, con respecto al análisis de varianza, en todos los casos el Fisher calculado es menor que Fisher crítico con probabilidad mayor que 0,05.

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Ni} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} [(-0,0434l^2 - 0,2894l + 1,90)(-0,186\rho + 1,28)] dld\rho \quad (8)$$

$$R^2_L = 0,80; R^2_\rho = 0,96$$

$$\beta^{Co}(l_{nm}, \rho) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} (0,1131\rho + 0,767) d\rho \quad (9)$$

$$R^2_\rho = 0,87$$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Fe} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} [(-3,8743l + 50)(1,8145\rho + 28)] dld\rho \quad (10)$$

$$R^2_L = 0,91; R^2_\rho = 0,88$$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Mg} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} [(0,9e^{0,3573l})(-0,531\rho + 2,96)] dld\rho \quad (11)$$

$$R^2_L = 0,96; R^2_\rho = 0,97$$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Al} = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(4e^{0.184l}) (-0,315\rho + 8,153)] dld\rho \quad (12)$$

$R^2_{L}=0,90; R^2_{\rho}=0,83$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{SiO_2} = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(2,2e^{0.3858l}) (-0,404\rho + 4,0)] dld\rho \quad (13)$$

$R^2_{L}=0,91; R^2_{\rho}=0,90$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Cr} = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(0.0078e^{-0.7014l}) (0.3465\rho + 0.5)] dld\rho \quad (14)$$

$R^2_{L}=0,80; R^2_{\rho}=0,93$

Tabla IV. Función experimental de distribución $\beta^{Ni}(l, \rho)$ de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Ni, %				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
	0,53	0,57	0,73	0,73	1,00
-2,935+2,92	0,87	0,65	0,96	0,79	0,60
-2,92+2,90	0,00	0,95	1,041	0,8	0,58
-2,90+2,70	0,00	1,09	1,97	0,72	1,14
-2,70+2,50	0,00	0,00	1,310	1,24	1,14
-2,50+0,0	1,51	0,98	1,00	1,044	0,96

Tabla V. Función experimental de distribución $\beta^{Co}(l, \rho)$ de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Co, %				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	0,312	0,367	0,854	0,537	0,168
-2,935+2,92	0,386	0,281	0,854	0,235	0,077
-2,92+2,90	0,000	0,21	0,541	0,43	0,075
-2,90+2,70	0,000	0,110	0,226	0,24	0,114
-2,70+2,50	0,000	0,000	0,222	0,339	0,110
-2,50+0,0	0,129	0,021	0,360	0,221	0,140

Tabla VI. Función experimental de distribución β^{Fe} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Fe, %				
	l , mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
$\geq 2,935$	37,03	33,27	26,33	26,33	35,89
-2,935+2,92	35,02	30,68	22,09	25,51	24,94
-2,92+2,90	0,00	28,020	20,470	22,900	24,56
-2,90+2,70	0,00	28,11	20,140	24,22	20,58
-2,70+2,50	0,00	0,00	20,000	24,27	20,35
-2,50+0,0	17,93	17,52	19,180	22,3	32,30

Tabla VII. Función experimental de distribución β^{Mg} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Mg, %				
	l , mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
$\geq 2,935$	0,37	0,90	0,51	0,32	0,45
-2,935+2,92	1,81	1,20	1,46	0,51	0,38
-2,92+2,90	0,00	2,01	1,510	0,46	0,43
-2,90+2,70	0,00	2,40	1,300	0,6	0,56
-2,70+2,50	0,00	0,00	3,210	1,94	0,850
-2,50+0,0	3,56	3,50	3,350	2,39	0,48

Tabla VIII. Función experimental de distribución β^{Al} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Al, %				
	l , mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
$\geq 2,935$	7,13	6,13	6,30	3,63	3,75
-2,935+2,92	9,75	7,87	7,17	4,21	3,96
-2,92+2,90	0,00	8,15	7,30	4,65	4,09
-2,90+2,70	0,00	8,15	7,62	4,58	4,07
-2,70+2,50	0,00	0,00	7,65	7,64	3,58
-2,50+0,0	12,70	17,96	18,79	4,19	3,75

Tabla IX. Función experimental de distribución $\beta^{\text{SiO}_2}(l, \rho)$ de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de SiO ₂ ,%				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	1,60	1,28	1,28	1,71	1,77
-2,935+2,92	1,07	2,20	2,20	1,79	1,78
-2,92+2,90	0,00	2,50	2,50	1,84	1,85
-2,90+2,70	0,00	2,80	2,80	1,95	1,95
-2,70+2,50	0,00	3,00	3,00	1,95	1,05
-2,50+0,0	26,45	17,26	13,120	8,52	2,68

Tabla X. Función experimental de distribución $\beta^{\text{Cr}}(l, \rho)$ de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Cr,%				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	1,44	1,79	1,40	1,02	1,01
-2,935+2,92	1,24	1,64	0,01	0,67	0,69
-2,92+2,90	0,00	1,00	0,01	0,47	1,03
-2,90+2,70	0,00	0,85	0,01	1,00	1,03
-2,70+2,50	0,00	0,00	0,01	0,30	1,01
-2,50+0,0	0,28	0,41	1,26	0,90	0,62

Tabla XI. Función experimental de distribución $\beta^{\text{Mn}}(l, \rho)$ de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Mn,%				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	2,84	3,37	7,09	1,56	0,83
-2,935+2,92	2,84	2,32	7,03	1,70	0,73
-2,92+2,90	0,00	1,88	7,030	1,20	0,72
-2,90+2,70	0,00	1,80	1,563	1,78	0,65
-2,70+2,50	0,00	0,00	1,850	2,50	0,74
-2,50+0,0	1,55	0,68	3,090	1,58	0,95

Tabla. XII. Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo al tamaño

Tamaño	Ni		Fe		Al		SiO ₂		Mg	
	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo
-10+8	1,84		19,97	14,04	14,60	17,43	23,61	48,18	5,82	15,69
-8+4	1,78		20,81	29,52	10,09	8,35	25,69	10,29	5,63	3,76
-4+2	1,41	1,15	20,63	37,26	12,11	5,78	24,47	4,76	3,84	1,84
-2+1	1,44	1,57	23,05	41,13	9,52	4,81	13,09	3,24	2,37	1,29
-1+0.4	1,56	1,78	22,60	43,45	8,96	4,31	14,23	2,57	2,59	1,04
-0.4+0.2	1,77	1,84	30,98	44,23	5,29	4,15	5,54	2,38	1,04	0,97
-0.2+0.071	1,71	1,88	37,58	44,73	3,91	4,05	5,01	2,26	0,69	0,92
-										
0.071+0.044	1,40	1,89	44,58	44,83	3,89	4,03	3,95	2,24	0,57	0,91
-0.044+0.00	1,45	1,90	49,80	45,00	3,86	4,00	3,62	2,20	0,44	0,90
Análisis de datos										
R ²	0,80		0,91		0,90		0,91		0,96	
F	2,33		2,57		0,74		0,60		0,08	
F crítico	4,75		4,49		4,49		4,49		4,49	
Probabilidad	0,15		0,13		0,40		0,45		0,79	

Tabla. XIII. Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo al tamaño de la partícula y la densidad del medio separador. $\beta(l, \rho)$ de Punta Gorda.

l (mm)	ρ (g/cm ³)	Ni		Fe		Al		SiO ₂		Mg	
		$\beta(l, \rho)$ exp	$\beta(l, \rho)$ modelo	$\beta(l, \rho)$ exp	$\beta(l, \rho)$ modelo	$\beta(l, \rho)$ Exp	$\beta(l, \rho)$ modelo	$\beta(l, \rho)$ exp	$\beta(l, \rho)$ modelo	$\beta(l, \rho)$ exp	$\beta(l, \rho)$ modelo
2,0	2,9 35	0,53	0,73	37,03	33,33	7,13	7,23	1,60	2,38	0,37	1,40
	2,9 2	0,87	0,73	35,02	33,30	9,75	7,23	1,07	2,39	1,81	1,40
	2,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	2,9 35	0,57	0,73	33,27	33,33	6,13	7,23	1,47	2,38	0,90	1,40
	2,9 2	0,65	0,74	30,68	33,30	7,87	7,23	2,56	2,39	1,20	1,40
	2,9	0,95	0,74	28,02 0	33,26	8,15	7,24	2,85	2,40	2,01	1,42
	2,7	1,09	0,78	28,11	32,90	8,15	7,30	2,85	2,48	2,40	1,52
	2,5	0,00	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4	2,9 35	0,73	0,73	26,33	33,33	5,45	7,23	1,28	2,38	0,51	1,40
	2,9 2	0,96	0,74	22,09	33,30	7,17	7,23	2,54	2,39	1,46	1,40
	2,9	1,041	0,74	20,47	33,26	7,44 7	7,24	2,83	2,40	1,51	1,42
	2,7	1,970	0,78	20,14	32,90	7,62 0	7,30	2,71	2,48	1,30	1,52
	2,5	1,310	0,82	20,00	32,54	7,65 0	7,37	3,00	2,56	3,21	1,63
0,2	2,9 35	0,73	0,73	26,33	33,33	3,63	7,23	1,71	2,38	0,32	1,40
	2,9 2	0,79	0,74	25,51	33,30	4,21	7,23	1,79	2,39	0,51	1,40
	2,9	0,8	0,74	22,90	33,26	4,65	7,24	1,84	2,40	0,46	1,42
	2,7	0,72	0,78	24,22	32,90	4,58	7,30	1,95	2,48	0,60	1,52
	2,5	1,24	0,82	24,27	32,54	7,64	7,37	1,95	2,56	1,94	1,63
0,07	2,9 35	1,00	0,73	35,89	33,33	3,75	7,23	1,77	2,38	0,45	1,40
	2,9 2	0,60	0,74	24,94	33,30	3,96	7,23	1,78	2,39	0,38	1,40
	2,9	0,58	0,74	24,56	33,26	4,09	7,24	1,85	2,40	0,43	1,42
	2,7	1,14	0,78	20,58	32,90	4,07	7,30	1,95	2,48	0,56	1,52
	2,5	1,14	0,82	20,35	32,54	3,58	7,37	1,05	2,56	0,85	1,63
-2,5											
Análisis de datos											
R ²		0,96		0,88		0,83		0,90		0,97	
F		1,06		3,06		1,72		1,76		2,21	
Fcrit		4,04		4,04		4,04		4,04		4,04	
Prob.		0,31		0,09		0,20		0,19		0,14	

CONCLUSIÓN

El análisis fraccional según el tamaño y la densidad de la mena laterítica del níquel permite concentrar notablemente el dióxido de silicio, el magnesio y aluminio en las fracciones ligeras (menores de $2,70 \text{ g/cm}^3$); SiO_2 , entre 17-26 %; Al, entre un 12 al 19 % en los productos flotados de los tamaños mayores de 0,4 mm.

En la laterita niquelífera, el Cr y Co se concentran en las fracciones pesadas, mayores de $2,90 \text{ g/cm}^3$, las intermedias, $2,70$ a $2,90 \text{ g/cm}^3$, son ricas en níquel y las menos densas (menores de $2,70 \text{ g/cm}^3$), tienden a empobrecerse en níquel.

Se obtuvo un producto pesado con densidad mayor que $2,935 \text{ g/cm}^3$, enriquecido en Co de 0,5 hasta 0,8 % en la fracción (-1+0,4) mm representado por asbolanas y la litioforita. $(\text{Al,Li}) \text{Mn}+4\text{O}_2(\text{OH})_2$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agatzini, S.L., Safiratos, I.G., Spathis, D., 2004a. Beneficiation of a Greek serpentinitic nickeliferous ore Part I. Mineral Processing, Hydrometallurgy. Volume 74, 3-4, October 2004: 259-265
- Agatzini, S.L., Safiratos, I.Z., 2004b. Beneficiation of a Greek serpentinitic nickeliferous ore. Part II. Sulphuric acid heap and agitation leaching, Hydrometallurgy Volume 74, 3-4, October 2004: 267-275.
- Agyei, G., Rojas, A. L. P., Hernández, A. F., 2005. Caracterización mineralógica de la mena niquelífera en un perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. I Congreso de Minera (Minería 2005). II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas MiN2-P51. Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias 2005, Palacio de Convenciones, La Habana, 5-8 de abril del 2005. Memorias en CD-ROM editado por Centro Nacional de Información Geológica e Instituto Nacional de Paleontología de Cuba. ISBN 959-7171-03-7. Sociedad Cubana de Geología.
- Agyei, G., 2006. Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la mena niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa. Cuba. 92p
- Almaguer A., V. Zamarsky, 1993. Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralógica. Revista Minería y Geología (Cuba), No2/93 : 17-24.
- Almaguer, A F., 1996a. Petrología y Corteza de intemperismo del yacimiento "Vega Grande", Nicaro, Cuba. Revista Minería y Geología. Vol. XIII No1:9-12.
- Almaguer, A. F., 1996b. Composición de las pulpas limonititas de la planta "Pedro Sotto Alba". Parte II. Periodo de crisis de sedimentación. Revista Minería y Geología. Vol. XIII. No.1:27-30.
- Almaguer, A., 1995. Cortezas de intemperismo: algunas características de sus partículas finas. Revista Minería y Geología (Cuba), No. 1/95:9-19.
- Almaguer, F.A. "Mineralogía y geoquímica de las cortezas de intemperismo lateríticas de las rocas ultramafitas de la provincia Holguín". Tesis doctoral, Ostrava, 1989.
- Beyris, P., 1997. Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa del mineral laterítico de la empresa Pedro Sotto Alba, Moa Nickel S.A. Tesis Doctoral del ISMM, Moa, Cuba: 118 p.
- Carthy, G. C., Falcón, J. H., 1985. Consideraciones preliminares sobre el beneficio de las colas de Nicaro. Minería y Geología. 2(85): 124-131.
- Coello Velásquez, A. L., Beyris, P., Hernández, A. F., Ramírez, B., 1998. Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombros laterítico. Revista Minería y Geología (Cuba), XV (1): 37-42.
- Falcón, J. H., Beyris, P. E. M., Ferrer, E. A. C., Montero, M., 1997a. Sedimentación de la pulpa cruda en la empresa Moa Níquel S.A. Revista Minería y Geología. Vol. XIV (1):31-36.
- Falcón, J. H., Hernández, A. F., Coello, A. L. V., 1997b. Preparación mecánica de los minerales lateríticos. Revista Tecnológica. Vol. 1. No 1: 9-17.
- Falcón, J., Hernández, A., 1993. Preparación y beneficio de minerales lateríticos en el proceso ácido a presión". Revista. Minería y Geología. Vol. II, No.2: 51- 58.
- Hernández A., J. Falcón, R. Trujillo, M. Toirac, 2000. Análisis teórico del beneficio de la laterita. Revista Minería y Geología (Cuba) ,XVII (3-4) : 73-78.

- Hernández, A. F., Toirac, M., Coello, A.L., 1995. Estudio preliminar para la obtención de concentrados de cromo a partir del yacimiento de cortezas de intemperismo "Casimba" Pinares de Mayarí. *Minería y Geología*, Vol. 12, No 2: 23- 26.
- Hernández, A., 1997. Determinación de esquemas racionales para la preparación y beneficio integral de minerales lateríticos. Tesis doctoral, ISMM, Moa, Cuba:94p.
- Leyva, E. R., Rodríguez, J. E. G., Jesús, Ortiz, J. B., 1995. Contribución al estudio estructural de los minerales componentes de las colas de Nicaro. *Minería y Geología*. Vol. XII No.2:9-15.
- Pérez-Mello, N. C., 2003. Comparación de métodos de estimación y simulación para el cálculo de los recursos tomando como ejemplo el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda. Tesis en opción al Grado Académico de Master en Ciencias Técnicas., ISMM, Moa, Cuba: 80p.
- Ponce, N., D. Carrillo, 1984. Mineralogía y composición sustancial de las menas ferro níquelífera del yacimiento Delta, Moa. *Serie Geológica No.1:3-16*.
- Ponce, N., D. Carrillo, 1988. Mineralogía y composición sustancial de las muestras patrones de lateritas. *Serie Geológica No.3: 75-82*.
- Ramírez, M., 2002. Estudio de beneficiabilidad de los escombros lateríticos de la región Moa". Tesis de Maestría. ISMM, Moa, Cuba: 54p.
- Rojas Purón, A. L., Orozco, G. M y Vera, O. S, 2005. Caracterización mineralógica y geoquímica de las fases minerales de Mn portadoras de Co en perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda. *Geociencias 2005. Memorias en CD-ROM, La Habana, 5-8 de abril del 2005*.
- Rojas, A. L., P. Beyris ,1994. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria
- Rojas, A. L., 1995. Principales fases minerales portadores de níquel en los horizontes lateríticos. Tesis doctoral, ISMM, Moa, Cuba: 75p.
- Tijonov, O.N., 1984. Beneficio de minerales útiles en Asia, África y América Latina, Edición Nedra, San Petersburgo, Rusia: 294p.
- Tojnov, O.N., 1978. Fundamentos teóricos de procesos de separación en la concentración de minerales. Edición Nedra, San Petersburgo, Rusia.
- Vera, A. Y., 1979. Introducción a los yacimientos de níquel cubanos. La Habana, Editorial Orbe: 213p.
- Vera, O., 2001. Procedimiento para la determinación de las redes racionales de explotación de los yacimientos de níquel y cobalto en la región Moa. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMM, Moa. Cuba: 111p.