

Regularidades de los pasivos ambientales minero-metalúrgicos sólidos, generados por las industrias del níquel en Cuba



Regularities of the environmental mining metallurgic solid passives, generated for the nickel industries in Cuba

<http://open.to/a/ZWkUD>

María Caridad Ramírez Pérez ^{1*}, José Alberto Pons Herrera ¹, Jesús Ortiz Bárcenas ²

RESUMEN: Las Empresas productoras de níquel en las regiones de Nicaro y Moa, han generado durante más de 50 años, importantes volúmenes de residuos sólidos, denominados Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos (PAMMs), cuyos valores se incrementan anualmente en la zona de Moa, sin que existan propuestas concretas para su utilización. El objetivo del trabajo es brindar una actualización del conocimiento acerca de las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas de diferentes tipos de PAMMs, entre los que destacan los siguientes: Escombros Lateríticos de la región Mayarí - Moa y Colas procedentes del proceso de lixiviación ácida a alta presión (HPAL). La combinación de diferentes técnicas instrumentales: Fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y análisis térmicos diferencial y termogravimétrico (ATD, ATG) permitieron comparar las características y establecer las regularidades físico-químicas y térmicas de estos residuos sólidos, que fundamentan las propuestas de uso, esencialmente para la industria siderúrgica cubana. Se muestran además, los resultados de pruebas experimentales realizadas utilizando escombros lateríticos de Nicaro y Moa como fuente de materia prima para la obtención de un producto siderúrgico prerreducido en la producción de arrabio con níquel (NPI) y como material oxidante durante los procesos de elaboración de aceros.

Palabras clave: Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos, Regularidades.

ABSTRACT: The nickel producing companies in the regions of Nicaro and Moa they have generated, during over 50 years, important volumes of solid residues, named Environmental Mining Metallurgic Passives (PAMMs), whose values can be increased in the Moa area, without concrete proposals for their utilization. The objective of the work is an update of the knowledge of the physical, chemical, mineralogical and thermal characteristics of different types of PAMMs, between the ones that the following highlight: lateritic rubble and solid residues of metallurgical processes the plant of the leaching processes high pressure acid (HPAL). The combination of different instrumental techniques: X-rays Fluorescence (XRF), X-rays diffraction (XRD) and thermal and differential thermogravimetric analysis (DTA, TGA) allowed to compare the characteristics and establish the physical - chemical and thermal regularities of these solid residues, that base the proposals of use, essentially for the Cuban and steel industry. In addition, the results of experimental test using lateritic rubble of Nicaro and Moa as a source of raw material for the production of a pre-reduced product in the production of nickel-based pig iron (NPI) and as an oxidizing material during the steelmaking processes.

Keywords: Environmental Mining Metallurgic Passives, Regularities.

Recibido: 28/07/2018

Aprobado en su forma original: 15/09/2019

¹Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, "Antonio Núñez Jiménez" (ISMMM), Cuba

²Ministerio de Industrias (MINDUS), Cuba

*Autor para correspondencia: *María Caridad Ramírez Pérez*. E-mail: mcaridad@ismm.edu.cu

INTRODUCCIÓN

La explotación de los yacimientos minerales se realiza con el fin de poner a disposición de la humanidad, las materias primas necesarias para el desarrollo económico de cualquier país. A lo largo de la historia de la minería en Cuba, la actividad extractiva de yacimientos no metálicos y metálicos, ha sido y es intensa, fundamentalmente, los referidos al níquel y materiales para la construcción. Asociado a estas actividades, las Empresas productoras de níquel en las regiones de Nicaro y Moa, han generado durante más de 50 años, importantes volúmenes de residuos sólidos, resultado tanto de la propia actividad minera como de los procesos extractivos que se desarrollan.

Estos residuos son denominados Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos (PAMMs), cuyos valores se incrementan anualmente, particularmente en la zona de Moa, sin que existan propuestas concretas para su utilización a favor de la economía del país, mientras que ocasionan daños diversos en el entorno social y ambiental.

Como PAMMs, se consideran a los escombros lateríticos o concreciones ferruginosas de los yacimientos que en la actualidad no están en explotación, los Gabros, los rechazos de las plantas de preparación del mineral que entra al proceso de extracción de níquel y cobalto, y las colas procedentes de los procesos de lixiviación carbonato amoniacal (CARON) y ácida a alta presión (HPAL).

Estos residuos están formados en su mayoría por óxidos de hierro, cuyos contenidos oscilan entre 43 % hasta 53 %, formando parte de las reservas de minerales de hierro con posibilidades de una aplicación inmediata en la industria siderúrgica cubana. Contienen además, otros óxidos que pudieran ser recuperados o incorporados a otros procesos, de manera que se aprovechen para diversos fines.

La industria siderúrgica cubana se ha planteado dentro de sus objetivos, aumentar la producción y la diversificación del acero; para cumplir el objetivo cuenta con la Empresa de Aceros Inoxidables ACINOX Las Tunas y la Siderúrgica José Martí (Antillana de Acero), pertenecientes al Grupo Empresarial

Sideromecánico (GESIME). Ambas entidades tendrán en los próximos cinco años una capacidad de producción de 500 mil toneladas de acero por año ([Ortiz, 2015](#)).

La tecnología instalada en estas empresas es la de hornos de arco eléctrico y se utiliza como materia prima fundamental la chatarra nacional, para lo cual se necesita un inventario que el país no posee. Es por esto que se necesita trabajar en las investigaciones básicas sobre los minerales de hierro para dar respuesta a esta indicación ([Ortiz, 2015](#)).

Considerando que el país cuenta con reservas probadas de mineral laterítico con importantes contenidos de hierro, lo cual puede constituir una fuente de abastecimiento a la industria siderúrgica (Rodríguez, 1987), una de las soluciones a esta carencia es la obtención de materias primas metalizadas a partir de los escombros lateríticos y de otros residuales como son las colas de las tecnologías CARON Y HPAL.

Como resultado de la utilización de arrabio con níquel (NPI) que se obtiene a partir de los minerales lateríticos (Steel Business Briefing, 2014), en China, líder mundial en la producción de hierro con 519 millones de toneladas al año, se ha disminuido el costo de producción de la tonelada de aceros inoxidables en 300 dólares. Se trata de un producto alternativo para la producción de aceros de baja aleación o inoxidables, que permite utilizar minerales de baja ley en níquel ([Pons, 2013](#); [Wang, 2013](#)).

Para solucionar el problema de la sustitución parcial de la chatarra en la producción de acero, Cuba tiene necesariamente que realizar investigaciones básicas con los minerales de hierro nacionales, como los escombros lateríticos de la región de Nicaro y Moa. Varias generaciones de especialistas investigado los escombros lateríticos yacimientos de los municipios Mayarí y Moa ([López, 1988](#); [Días y Mojena, 1989](#); [Palacios, 2001](#); [Pons, 1995](#); [Ferreiro, 2006](#); [Ramírez, 2010](#); [Ortiz, 2015](#)), con la idea de utilizarlos en la industria siderúrgica. Dichos estudios han estado dirigidos, fundamentalmente, a la caracterización de estos residuos y a tareas relacionadas con la metalurgia extractiva, sin embargo, es escaso el conocimiento sobre las transformaciones

térmicas que experimentan estos materiales en los procesos pirometalúrgicos.

Las pruebas experimentales realizadas por [Ortiz, 2015](#), y otras desarrolladas recientemente por [Cobas, 2018](#) y [Hernández, 2018](#), demuestran la posibilidad de obtener, a partir de los escombros lateríticos y las colas, productos prerreducidos para la obtención de arrabio enriquecido con níquel y otros metales.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es brindar una actualización del conocimiento sobre las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas de diferentes tipos de PAMMs, obtenidas con la combinación de técnicas de análisis, que justifican las propuestas de usos de estos residuos industriales, los que representan una de las fuentes económicas más importantes en el país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron muestras de residuos consistentes en: Escombros Lateríticos y Colas del proceso HPAL.

Para los análisis químicos de las muestras se utilizó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica ATI UNICAM SOLAR 929 (DOBLE RAYO DE LUZ). Además, se determinó el contenido de los elementos en forma de óxidos, en un espectrómetro de emisión de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda (FRX-dλ), PHILIPS modelo PW 1 404 con ánodo de Rh, tensión y corriente del generador de 100 kv y 80 mA, respectivamente, utilizándose para la determinación espectrofotométrica el método de las cápsulas compactadas.

La caracterización mineralógica se realizó por el método de Difracción de rayos X según método policristalino, usando un difractómetro Siemens, modelo D5000, con monocromador para haz difractado de LiF (100) y equipado con ánodo de Cu. Los difractogramas se registraron con una constante de tiempo de 5 s y a una velocidad de exploración del papel de 0,030 %/s. Para el tratamiento de los datos mineralógicos, se emplearon los software ANALYSE de la SEIFERT X-Ray Technology (Versión 2,26) de procedencia alemana, y HIGH SCORE PLUS de Panalytical (Versión 3.0B). 01.02.2011. En la identificación de las fases se utilizó la base de datos PDF2, Años 1941-2001 y 2015.

El análisis térmico por los métodos de Análisis Termogravimétrico (ATG) y Análisis Térmico Diferencial (ATD), permitió determinar los intervalos de temperaturas en que ocurren las variaciones de masa y los principales efectos (endotérmicos y exotérmicos) producto del calentamiento continuo de las muestras. Para ello se utilizó un equipo de la firma alemana NTEZSCH, modelo STA 449 F3 y los ensayos se corrieron en atmósfera de Argón, con una velocidad de flujo de 20 mL/min. Las muestras fueron introducidas en crisoles de alúmina, se analizaron desde la temperatura ambiente hasta 1400 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, Zona A

Para la caracterización físico - química y térmica de estos escombros, se seleccionaron las fracciones granulométricas: +10 mm, -10+8 mm, -8+6 mm, -6+4 mm, -4+2 mm, -2+0,83 mm y -0,83 mm.

Características químicas

Como resultado se demostró que los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, Zona A, están compuestos por óxido de hierro(III) fundamentalmente y aunque el contenido no varía bruscamente con el tamaño de las partículas, en las mayores de dos milímetros se incrementa hasta 77,18 %, como se presenta en la [tabla 1](#).

El segundo de los mayoritarios es el óxido de aluminio, con un contenido que incrementa cuando disminuye el diámetro de las partículas. La presencia mayoritaria de los óxidos hierro y aluminio en los escombros de Zona A, constituye una regularidad de estos residuales mineros en Cuba, que justifica sean considerados óxidos de hierro con diferentes grados de contaminación con aluminio. La distribución del óxido de níquel(II) es irregular en las clases de tamaño estudiadas, evidenciándose un ligero incremento del contenido hacia las partículas más finas, en las que predominan fases portadoras de este elemento como son los oxihidróxidos de hierro, específicamente la goethita ([Rojas, 2001](#)).

Tabla 1. Composición química de las fracciones granulométricas estudiadas de los escombros de Moa Occidental, Zona A

Fracciones (mm)	Contenido expresado como óxido (%)							
	Fe ₂ O ₃	NiO	CoO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	MgO
+10	73,16	0,70	0,16	2,80	11,66	4,02	0,92	0,15
-10+8	77,13	0,68	0,13	3,21	10,53	1,75	0,68	0,25
-8+6	77,18	0,68	0,13	3,21	10,15	1,80	0,68	0,17
-6+4	75,87	0,70	0,13	3,36	10,72	1,65	0,71	0,17
-4+2	74,14	0,68	0,16	3,36	13,54	1,60	0,78	0,18
-2+0,83	69,60	0,70	0,15	3,50	17,11	1,80	0,77	0,23
-0,83	68,51	0,70	0,15	3,65	18,80	2,31	0,71	0,33

Si bien los mayores contenidos de los óxidos de silicio, de magnesio y de aluminio se encuentran en las partículas de menores diámetros, en las mayores de 0,83 mm, predominantes en el escombros estudiado, los contenidos de estos son significativos, lo que constituye un aspecto a considerar en el uso de este residuo en la industria del acero, pues ellos contribuyen a mejorar las propiedades de viscosidad y fluidez de las escorias. La distribución de los óxidos de cobalto y de manganeso es análoga y confirma su asociación en los óxidos e hidróxidos impuros de manganeso (asbolanas).

Comparación con otros escombros: Mina Martí en Nicaro; Camarioca Norte, Área 1 y Zona 12; Moa Occidental pertenecientes a FEMSA

En la [tabla 2](#) se muestra la composición química promedio de escombros de diferentes yacimientos de la región Mayarí - Moa y como se observa, el elemento mayoritario, es el hierro. Entre los escombros que se comparan, los de Zona A del yacimiento Moa Occidental, tienen un contenido de este elemento superior al resto, 73,65 %, mientras que en los de Mina Martí y los de Moa Occidental pertenecientes a FEMSA, el contenido de hierro total es 68 %. A diferencia de los demás, los escombros de Camarioca Norte, tanto de la Zona 12 y el área 1, el contenido de hierro total no supera el 45 %, puede establecerse entonces una regularidad entre los escombros del yacimiento Camarioca Norte en lo referente al contenido de este metal, que aunque es mayoritario, el contenido es inferior al de otros yacimientos de la región.

En todos los escombros que se comparan, el segundo entre los mayoritarios es el óxido de aluminio, que varía entre 6 % y 13 %, observándose valores más bajos en los del yacimiento Mina Martí.

Por otra parte, no existe una diferencia significativa en los contenidos de óxido de níquel (II); son superiores en Mina Martí y Camarioca Norte, Zona 12, con 0,80 % y 0,98 % respectivamente, lo que identifica a estos residuos como un recurso atractivo para su procesamiento como materia prima para la producción de arrabio con níquel, el cual se produce a partir de minerales de baja ley en níquel ([Shanghai Metals Market, 2013](#); [Wang, 2013](#)).

En lo que respecta al cromo, los contenidos oscilan entre 2 % y 3,3 % aproximadamente, con muy poca diferencia entre unos y otros. Así, el contenido de dióxido de silicio en los escombros de Moa está en el orden de 2 y 3 % con muy poca variación, sin embargo, en los de Mina Martí el contenido asciende a 8,26 % que junto con el elevado contenido de óxido de magnesio (6,00 %), marcan la diferencia entre los escombros de ese yacimiento y los de la región de Moa, aspecto de interés para la industria siderúrgica.

Respecto al cobalto, en todos los escombros que se comparan, el óxido de este metal es el que se encuentra en menor cuantía entre los elementos que se analizan, aspecto que es común para los escombros lateríticos cubanos; el contenido oscila entre 0,012 % y 0,22 %. Los yacimientos que tienen un contenido más elevado son los de Mina Martí y los de Camarioca Norte, Zona 12.

De la comparación se puede resumir como regularidad química, que los elementos mayoritarios en los escombros, en cuanto a contenidos de sus óxidos, son el hierro y el aluminio; que el contenido de cobalto, de manganeso, de níquel y de cromo no varía significativamente de un yacimiento a otro, mientras que el contenido de magnesio y de silicio es superior en los escombros de Mina Martí, en Nicaro, yacimiento en que el contenido de óxido de aluminio es contrastante con los demás escombros comparados.

Características mineralógicas

Se demostró que los óxidos de hierro, representados por maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) y goethita ($\alpha\text{-FeO.OH}$), constituyen las fases principales en las fracciones granulométricas estudiadas, como lo evidencia la [figura 1](#), en correspondencia con la presencia mayoritaria del hierro y su amplia distribución en el perfil granulométrico.

Los difractogramas obtenidos para las fracciones granulométricas: -10+8 mm, -8+6 mm, -6+4 mm, -4+2 mm y -2 mm son similares al que se muestra en la [figura 1a](#), correspondiente a la fracción +10 mm. La fase maghemita ha sido

detectada por la aparición de los máximos difractométricos principales a valores de distancias interplanares $d(\text{\AA}) = 2,94$; $2,51$; $2,08$ y $1,47$ constituyendo la fase principal, avalado por su contenido que oscila entre 41,40 % y 77,60 % en las fracciones granulométricas analizadas ([Ramírez, 2018](#)).

La goethita, cuyos contenidos oscilan entre 8,1 % y 31,60 %, constituye junto con la maghemita una de las fases mayoritarias. La identificación de esta fase es detectada por las reflexiones a $d(\text{\AA}) = 4,18$; $2,42$; $1,60$; esta última atribuible además a la maghemita.

Otras fases minerales se reportaron: la hematita, que no supera el 8,6 %, la gibbsita en una cantidad entre 8,42 % y 16,57 %, relacionado con el contenido de óxido de aluminio de hasta 18,80 % ([tabla 1](#)), la magnetita que se identificó en el difractograma de la fracción -2 + 0,83 mm ([figura 1b](#)), con un contenido de 37 %, y cuarzo en el difractograma de la fracción +10 mm, con su máximo de difracción principal $d(\text{\AA}) = 3,34$; aunque de baja intensidad la presencia de la fase se avala por el resultado de los análisis químicos en dicha fracción, superior al resto de las fracciones, como se muestra en la [tabla 1](#).

Tabla 2. Composición química de diferentes escombros lateríticos de la región de Mayarí - Moa

Pasivos	Composición química promedio (%)								
Escombros	CoO	MgO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe _{total}	NiO	Fuentes
Moa Occidental, Zona A	0,14	0,21	0,75	2,13	13,00	3,29	73,65	0,69	Ramírez, 2010
Mina Martí	0,22	6,00	0,34	8,26	6,27	2,15	68,19	0,80	Ortiz, 2015
Camarioca Norte, Área 1	0,02	0,37	0,64	3,05	12,81	2,60	44,77	0,45	Roché, 2017
Moa Occidental FEMSA	0,09	1,09	0,48	3,51	13,45	3,07	68,2	0,61	Huaraca, 2018
Camarioca Norte, Zona 12	0,12	0,81	0,56	2,79	10,11	2,82	34,24	0,98	Ramos, 2018

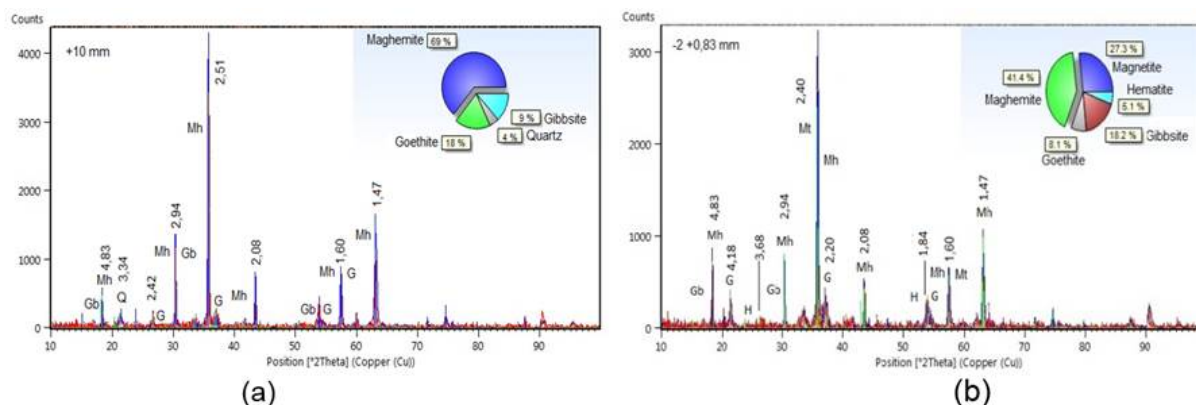


Figura 1. (a) Difractograma de la fracción +10 mm del escombro de Zona A. Mh: maghemita; G: goethita; Gb: gibbsita; Q: cuarzo. (b) Difractograma de la fracción -2 + 0,83 mm del escombro de Zona A. Mh: maghemita; G: goethita; Gb: gibbsita; H: hematita y Mt: magnetita.

La hematita se identificó por las reflexiones a $d(\text{\AA}) = 3,68$ y $1,84$; aunque de bajas intensidades constituyen líneas útiles para el diagnóstico, como demostraron Valdivia *et al.* 2013.

La fase gibbsita fue detectada según los máximos difractométricos de mayor intensidad a $d(\text{\AA}) = 4,83$ y $2,94$ y su presencia es significativa en todas las muestras entre $8,42\%$ y $18,20\%$ (Ramírez, 2018). Mineralógicamente se observa una regularidad con lo reportado en los análisis químicos, mayores contenidos de óxido de aluminio en las partículas menores de 2 mm .

La fase magnetita, como se expresó anteriormente, se reportó solo en una de las fracciones granulométricas por sus reflejos difractométricos $d(\text{\AA}) = 2,40$ y $1,60$. Como es conocido, las fases magnetita y maghemita son isoestructurales, de ahí lo complicado que resulta la identificación entre ellas si no se emplean técnicas especiales, no obstante, en el análisis cualitativo de difracción de rayos X se observó que los reflejos difractométricos se asemejan más al patrón de la maghemita que al de la magnetita.

La información aportada por estas técnicas, confirma la complejidad mineralógica del escombros de Zona A. Se demostró que el $57,76\%$ de las partículas son mayores de $0,83\text{ mm}$ y poseen contenidos de óxido de hierro entre 69 y 77% , representados fundamentalmente por maghemita y goethita como fases principales.

Además de estas fases, en el escombros están presentes la gibbsita, hematita, magnetita y el cuarzo.

Características térmicas

Un termograma representativo de los escombros de Zona A, se muestra en la [figura 2](#).

Las curvas de TG y ATD muestran las transformaciones térmicas del material calentado hasta $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$. La curva de TG muestra las principales pérdidas de masa a intervalos de temperatura que coinciden con los efectos endotérmicos y exotérmicos medidos sobre la curva de ATD. Se observan dos efectos endotérmicos alrededor de los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, el primero correspondiente a la deshidroxilación de la goethita que se transforma en hematita, coincidente con los resultados de [Díaz *et al.* 2015](#); y otro, en el intervalo de $375\text{ }^{\circ}\text{C} - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ en que la maghemita inicia su proceso de transformación a hematita, y la gibbsita en ese mismo intervalo, se transforma en bohemita.

Estos resultados refuerzan la afirmación que las fases principales en estas concreciones son la maghemita y la goethita. Por último, un efecto exotérmico es observado alrededor de los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, atribuible al reordenamiento estructural de los óxidos y formación de partículas de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ de gran tamaño y de geometría irregular para el escombros de Zona A.

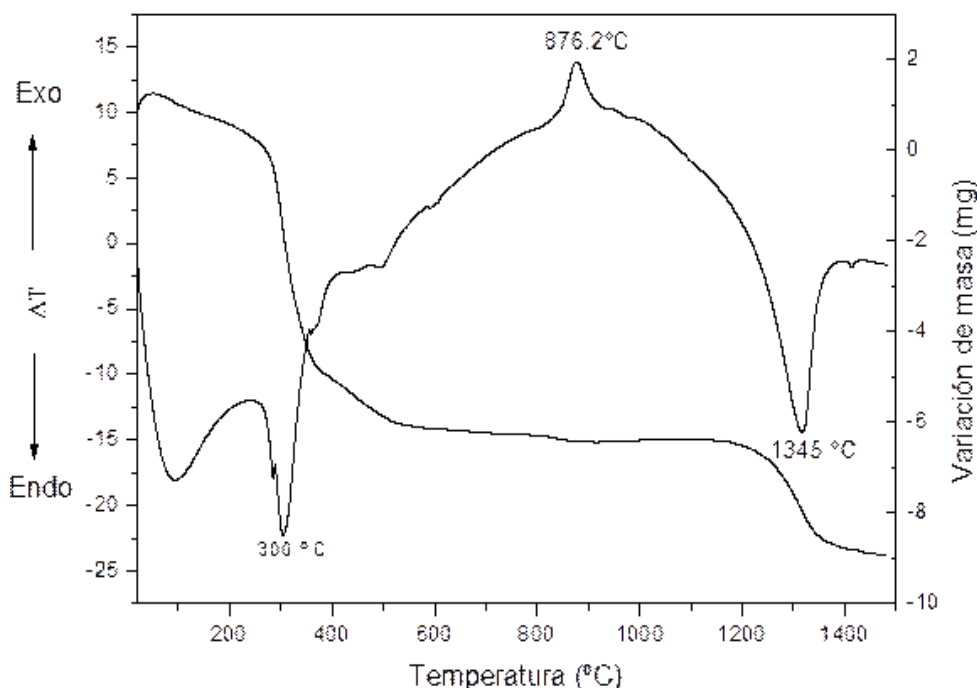


Figura 2. Curvas representativas de ATD/TG obtenidas

Escombros lateríticos de Mina Martí

Características mineralógicas

El resultado del análisis por difracción de rayos X a una muestra completa de este residuo, confirmó como fases fundamentales la hematita, la maghemita y la goethita, representadas en la [figura 3](#)

La hematita constituye la fase principal con contenidos entre 10,00 % y 70,20 % y la goethita desde 11,55 % hasta 30,00 %. La presencia de estas fases confirma la existencia mayoritaria de hierro, como es característico de los escombros lateríticos. Los estudios por Microscopia Electrónica de Barrido realizados por [Ortíz, 2015](#), confirman que los constituyentes principales de los escombros lateríticos de Mina Martí son: aglomerados hematíticos, goethitas, serpentinas y espinelas cromíferas.

Características térmicas

Las curvas de ATG, DTG y ATD están ilustradas en la [figura 4](#).

En las curvas ATD y DTG se observa, desde 453 hasta 673 K, un efecto endotérmico con picos característicos a 563 K, producidos por la pérdida de agua de constitución de la Goethita ($2\alpha\text{-FeOOH}$), que por su deshidratación se transforma en hematina ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). De acuerdo a la curva de TG, se produce una pérdida de masa hasta los 726 K, de manera continua y lenta, la cual está relacionada con la pérdida de agua débilmente enlazada.

Seguidamente otra variación en la masa de 10,00 %, tiene lugar desde 453 K hasta 673 K, por efecto del desprendimiento del agua fuertemente ligada de la goethita.

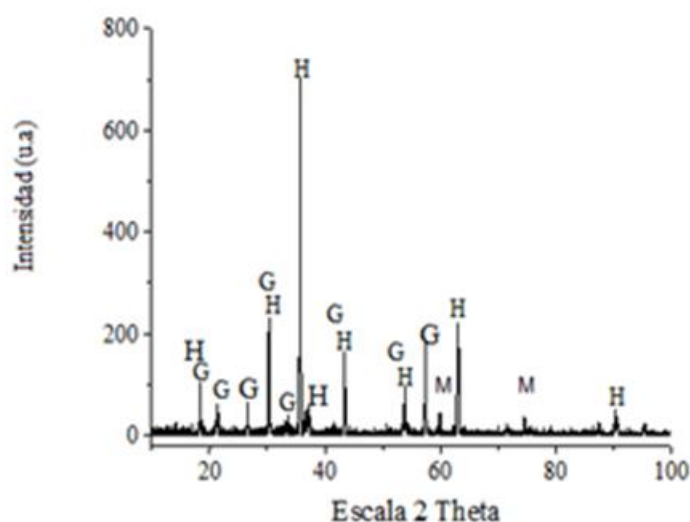


Figura 3. Difractograma de rayos X, de los escombros lateríticos de Mina Martí. G: goethita; H: hematita; M: maghemita

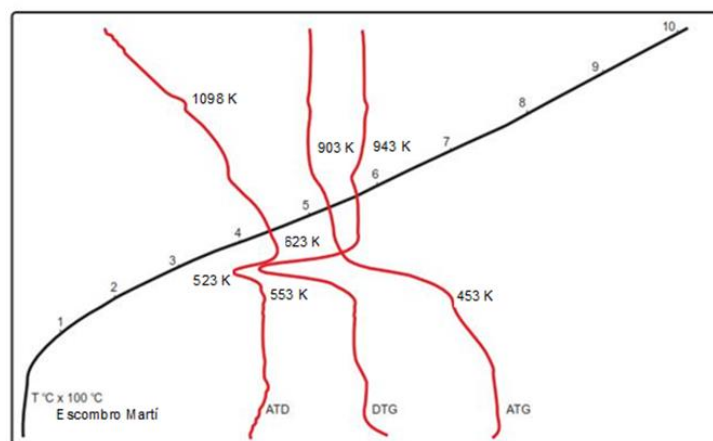


Figura 4. Registro del termograma de los escombros lateríticos de Mina Martí calentados linealmente hasta 1 473 K.

Desde 823 K hasta 943 K se observa un efecto endotérmico con pico aproximadamente a 903 K, que va acompañado de una pérdida de masa igual a 1,84 %, atribuible al desprendimiento del agua de constitución de la antigorita. La presencia de antigorita, variedad de la serpentina, se confirma por el pequeño efecto exotérmico que aparece a 1 098 K, temperatura a la cual inicia la cristalización de los silicatos presentes en la serpentina.

A continuación se exponen los resultados de las pruebas experimentales realizadas con diferentes PAMMs, que indican la posibilidad de utilizarlos en la industria siderúrgica.

Escombros lateríticos del Yacimiento Moa Occidental, Zona A ([Ramírez, 2010](#))

Se realizaron las pruebas a nivel industrial en un horno de arco eléctrico con el objetivo de evaluar el poder oxidante del escombros de Zona A, en la descarburización del acero termorresistente ACI HK-40. Se emplearon dos fracciones granulométricas y dos grupos granulométricos ([Ramírez, 2018](#)). El procedimiento utilizado, según Ramírez (2010), establece las etapas, las condiciones de trabajo y las indicaciones de toma de muestras para la comprobación de la composición química de la aleación, antes y después del proceso de descarburización.

A manera de ejemplo se muestra en la [tabla 3](#) la composición química de una de las coladas

ensayadas. La composición química de estos escombros ya fue analizada en este trabajo.

Los resultados de las pruebas experimentales demuestran la factibilidad de utilizar las partículas mayores de 2 mm de las concreciones ferruginosas de Zona A, en la descarburización del acero ACI HK-40 producido en hornos de arco eléctrico, sin afectar la composición química de la aleación.

Escombros lateríticos de Mina Martí en Nicaro ([Ortiz, 2015](#))

En 2015, Ortiz demuestra que los escombros de Mina Martí en Nicaro, por sus características físico-químicas y térmicas, pueden constituir materia prima para la obtención de arrabio con níquel. Se muestran los resultados del estudio de reducción del análisis termogravimétrico, se define el mecanismo de reducción con carbón puro hasta 1 473 K, y se determina el modelo y los parámetros cinéticos de dicho proceso. Se realizan ensayos de reducción con carbón antracita, en un horno rotatorio de laboratorio del tipo Salvis, donde se simula el proceso de prerreducción en condiciones industriales y se obtiene un prerreducido con hierro y níquel.

El ensayo de fusión de los prerreducidos, en un horno mufla de laboratorio, demostró la posibilidad de obtener un arrabio con contenido de níquel (NPI) en que el contenido de este metal es 1,27 %; constituyendo una materia prima utilizable para la producción de hierro y aceros

Tabla 3. Composición química de una de las coladas antes y después de la adición de la fracción -8+4 mm.

Contenido de los elementos (%)										
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Co	Mo	Al
Antes	0,56	0,96	1,14	24,93	0,033	0,029	20,71	0,18	0,15	0,0070
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
	0,06	0,006	0,02	0,02	0,001	0,001	0,004	0,001	51,19	
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Co	Mo	Al
Después	0,42	0,54	0,58	24,23	0,029	0,025	20,71	0,18	0,10	0,0073
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
	0,05	0,006	0,01	0,01	0,001	0,002	0,003	0,001	53,11	
Composición química Acero ACI HK-40 exigida por la norma ASTM A297-95 (%)										
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Co	B	
	0,3-0,5	0,50-1	≤0,75	23-27	≤0,40	≤0,045	19-22	0,09	0,001	
	Al	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,0087	0,18	0,0046	0,02	0,01	0,002	0,001	0,01	Balance	

inoxidables y la sustitución parcial de la chatarra en los procesos tecnológicos de las acerías.

La [figura 5](#) muestra los resultados del proceso de reducción de los escombros lateríticos de Mina Martí con distintos reductores sólidos (carbón puro, antracita y finos de coque).

Los resultados muestran una intensificación del proceso de reducción con el aumento de la temperatura y un mejor efecto si se utiliza carbón antracita comparado con los finos de carbón coque, lo que significa una mayor reactividad de este carbón en el régimen térmico utilizado. Se alcanza un grado de reducción del 85,00 % al emplear carbón puro, un 75,00 % para el carbón antracita y un 55,50 % para los finos de coque.

Esto se debe a que el contenido de carbono fijo y la reactividad del carbón puro son superiores a la antracita y al carbón coque, originándose mayor cantidad de monóxido de carbono que reacciona con los óxidos de hierro.

A partir de los resultados obtenidos por Ortíz, 2010, el grupo del proyecto “Rehabilitación de PAMMs generados por la industria del níquel en Moa”, decidió realizar pruebas de reducción aluminotérmica con escombros de Camarioca Norte Áreas 1 y 2 y con las colas de la presa vieja de la empresa “Pedro Soto Alba Moanickel SA”.

Aunque las pruebas son preliminares, vale exponer los resultados.

Colas Viejas de la empresa Pedro Soto Alba Moanickel SA ([Hernández, 2018](#))

Las pruebas experimentales consistieron en el desarrollo de ensayos de fusión-reductora, empleando aluminio como reductor. En la [figura 6](#) se evidencia, que no existen diferencias significativas entre las coladas en cuanto al contenido de hierro que oscila entre 88,3% y 90,4%, con un valor máximo de 90,40 % para la cuarta colada.

El valor promedio de 88,90 % de hierro, unido al contenido de cromo que pasa al metal, de hasta 1,55 %, indica que este material obtenido puede ser considerado como un arrabio que una vez estudiado con mayor profundidad y a mayor escala, puede llegar a constituir un material de carga para la producción de aceros en Cuba. Una mayor información de los resultados puede obtenerse en el trabajo de [Hernández, 2018](#).

Escombros lateríticos de Camarioca Norte, Área 1 ([Cobas, 2018](#))

La composición química de este pasivo ambiental se muestra anteriormente en este trabajo. Como resultado de las pruebas de fusión-

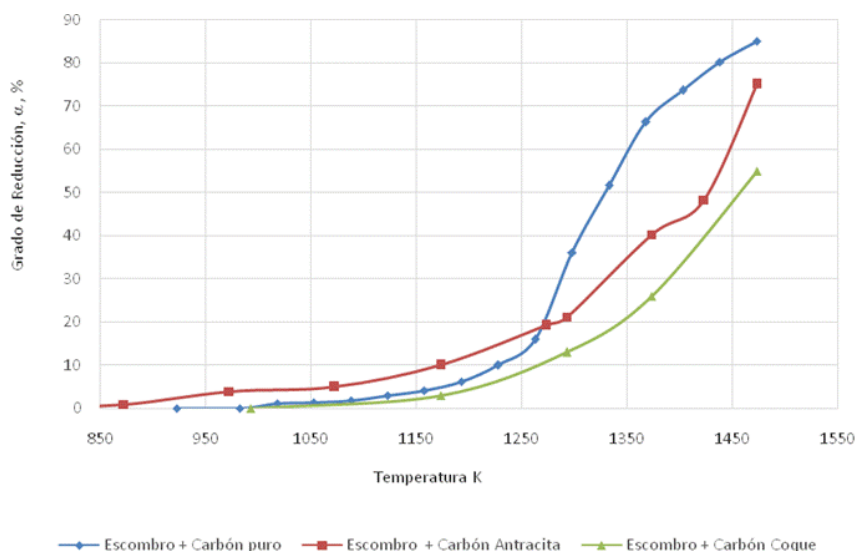


Figura 5. Relación entre la temperatura y el grado de reducción de los escombros lateríticos con distintos tipos de carbones.

Tabla 4. Composición química de las Colas Viejas de las PSA.

Composición química (%)										
CoO	MnO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe _T	NiO	V	S	PPI
0,076	1,425	0,394	2,247	17,353	2,373	40,713	0,256	0,066	0,505	16,04

reducción realizadas, se obtuvo un metal con alto contenido de hierro, con un valor promedio de 82,8 % para el área 1, acompañado de valores promedio de cromo de 1,3 %, además de Ni, Co, Si, Mn y C, que en conjunto constituyen un arrabio con elementos químicos muy utilizados en las cargas metálicas empleadas en Cuba y el mundo para la producción de aleaciones ferrosas. Se recomienda que se profundice en lo adelante en algunos elementos importantes, como son la granulometría y el tipo y cantidad de reductor a utilizar. La [figura](#) siguiente muestra el contenido de hierro y cromo en las diferentes coladas realizadas.

La presencia del cromo contenido del metal obtenido varía entre 1,1 % y 1,46 %, como se muestra en la anterior, lo que le aporta un valor adicional al arrabio obtenido, teniendo en cuenta que este elemento, es de gran aplicación en la elaboración de diferentes aleaciones ferrosas, principalmente, los aceros inoxidables.

CONCLUSIONES

1. Se amplía el conocimiento sobre las características químicas, mineralógicas y térmicas de diferentes pasivos ambientales de la región de Moa y de Nicaro. Como regularidad química se establece que en los escombros lateríticos los elementos mayoritarios en cuanto a contenidos de sus óxidos, son el hierro y el aluminio; que el contenido de cobalto, de manganeso, de níquel y de cromo no varía significativamente de un yacimiento a otro, mientras que el contenido de magnesio y de silicio es superior en los escombros de Mina Martí, en Nicaro, yacimiento en que el contenido de óxido de aluminio es contrastante con los demás escombros comparados. A diferencia de los demás, en los escombros de Camarioca Norte, tanto de la Zona 12 como los del área 1, el contenido de hierro total no supera el 45 %, lo que constituye una regularidad entre los escombros del yacimiento en lo referente al contenido de este metal, que aunque

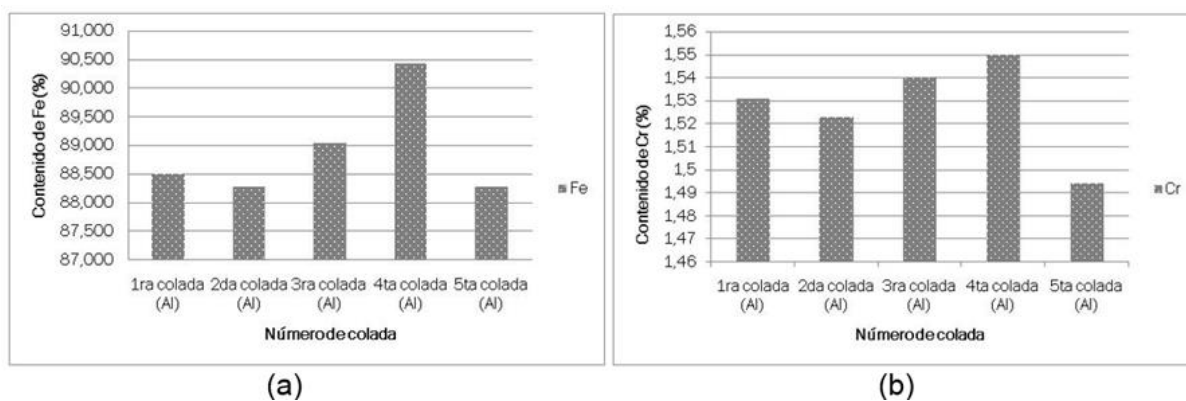


Figura 6. (a) Contenido de Fe en las coladas, (b) Contenido de Cr en las coladas.

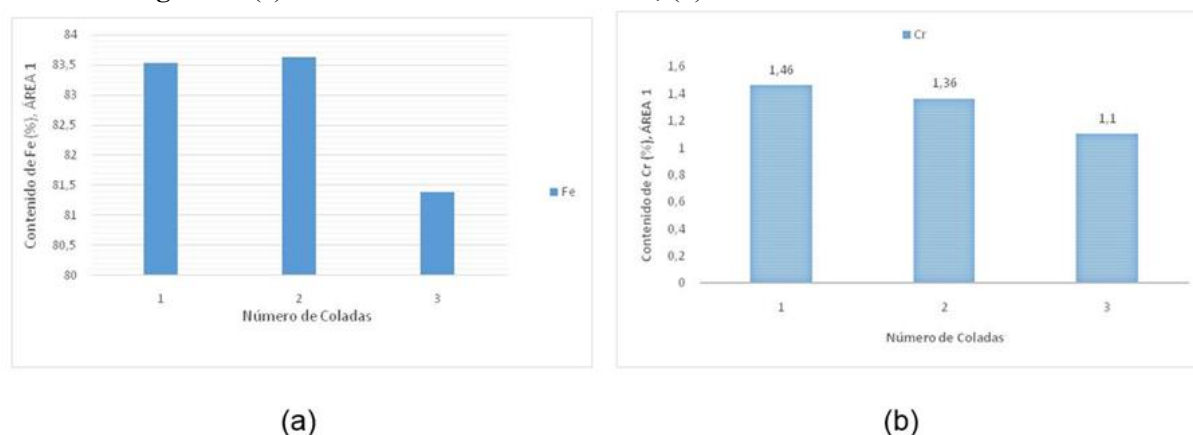


Figura 7. (a) Contenido de Fe en las coladas, (b) Contenido de Cr en las coladas.

mayoritario es inferior al de otros yacimientos de la región.

2. Las pruebas experimentales desarrolladas confirman la posibilidad de utilizar los escombros de Zona A, como oxidantes en la descarburización de aceros, mientras que los de Mina Martí pueden ser empleados para obtener arrabio con níquel (NPI), materia prima necesaria para la industria siderúrgica cubana, todo ello fundamentado en los estudios térmicos y la caracterización.
3. De forma preliminar se puede hacer propuestas de uso de los escombros de Camarioca Norte, Área 1 y las colas viejas de la Pedro Soto Alba para obtener arrabio enriquecido con cromo.

BIBLIOGRAFÍA

- Cobas, N. 2018. Evaluación Preliminar de la Fusión Reductora de los “Escombros Lateríticos”, del Yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2. Informe Técnico, Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Antonio Núñez Jiménez”, 72 p.
- Días, C. & Mojena, L. 1989. Informe sobre el estudio mineralógico por microsondas de las fracciones granulométricas del escombros laterítico de Pinares de Mayarí. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid, 50p.
- Díaz, S.; Garcés, A.; Restrepo, O.; Lara, M. & Camporredondo, J. 2015. “Thermodynamic analysis of the reduction process of Colombian lateritic nickel ore”. *Metalurgia*. 51 (4): 4-8.
- Ferreiro, G. y otros. 2006. Tratamiento previo de los escombros lateríticos del yacimiento Atlántico de Moa como paso inicial de una nueva tecnología en perspectivas”. *Revista Tecnología Química*. Vol XXVI, No.1.
- Hernández, R. 2018. Estudio pirometalúrgico del Pasivo Ambiental “Colas viejas”, de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, de Moa. Informe Técnico, Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Antonio Núñez Jiménez”, 60 p.
- López, F.; Nieto, J. & Ortiz. 1988. “Determinación de los parámetros energéticos en un proceso de molienda de escombros lateríticos”. *Revista Metalurgia*. Madrid, 24(4).255- 259.
- Ortiz, B. J. 2015. Obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron) a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de Mina Martí de Nicaro. Tesis Doctoral, Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico, 99 p.
- Palacios, A. 2001. Extracción de cobalto mediante la lixiviación ácida de los escombros lateríticos. Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, Moa: ISMM, 110 p.
- Pons, J.; Andrade, S. & Gutiérrez, D. 1995. Estudio preliminar de los escombros lateríticos con fines siderúrgicos. Parte I. Informe Técnico, Moa
- Pons, J. 2013. Producción de Níquel Pig Iron (NPI) en China, Reporte Técnico: Moa, 1-14p.
- Ramírez, M. 2010. Utilización de los escombros lateríticos de Zona A, yacimiento Moa occidental en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias, Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Ramírez, M.; Pons, J. & Romero, M. 2018, “Estudio termodinámico de muestras de concreciones ferruginosas del Yacimiento Moa Occidental, para su uso siderúrgico”. *Revista Minería y Geología*, Vol. 34 No.3 (julio-septiembre): 299-317.
- Rojas, A. 2001. “Evidencias de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas”. *Minería y Geología*. XVIII (3-4), 21 - 31.
- SMM- Shanghai Metals Market. Jan 11. V (11), 2013.
- Wang, P. 2013. The technical economy of laterite nickel ore”, Hanking Group. China.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)