



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia

# **COMPORTAMIENTO DE LAS COLAS DE LA EMPRESA "COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA" ANTE LA VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO**

**Tesis presentada en opción al título de Master en Metalurgia**

**Orleidy Loyola Breffe**

Moa

2012



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia

# **COMPORTAMIENTO DE LAS COLAS DE LA EMPRESA "COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA" ANTE LA VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO**

**Tesis presentada en opción al título de Master en Metalurgia**

**Autor: Ing. Orleidy Loyola Breffe**

\_\_\_\_\_

**Tutores: Prof. Tit., Ing. Pedro E. Beyris Mazar, Dr.C.**

\_\_\_\_\_

**Prof. Aux., Ing. Amaury Palacios Rodríguez, Dr.C.**

\_\_\_\_\_

Moa

2012

# Pensamiento

*“...nadie debe estar triste ni acobardarse mientras hayan libros en las librerías, y luz en el cielo, y amigos, y madres.”*

*José Martí.*

## Dedicatoria

*Dedico este Trabajo de Maestría con todo mi corazón, a las personas que hicieron que mi sueño llegara a ser realidad.*

◆ *Especialmente a mis Padres:*

*Nidia Breffe Osorio, Tinildo Loyola Labaceno, Camilo Conde Aguilera y  
Milka Coba Romero,*

◆ *A mi esposa:*

*Eidys Rodríguez Leyva,*

◆ *A mi hermano y hermanas:*

*Camilo Conde Breffe, Yanaisys Loyola Breffe, Yaniusca Loyola Cobas,  
Aliusca Artemán Coba y Hosanna Loyola Coba.*

## Agradecimientos

*Ofrezco mi agradecimiento a todos aquellos que de una forma u otra han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:*

- ◆ *A la Revolución Cubana por darme la oportunidad de obtener el título de Master,*
- ◆ *A mi querida madre y a mi padre por toda la confianza que han depositado en mi,*
- ◆ *A mi esposa por haberme brindado su apoyo en los momentos más difíciles,*
- ◆ *A mi hermano y hermanas,*
- ◆ *A mis tutores por haberme guiado en todo el trabajo,*
- ◆ *A mis compañeros de trabajo, en especial a:*  
*Roger Almenares y Yunior Correa,*
- ◆ *A los colegas ingenieros de la producción: Osvaldo y Alberto,*
- ◆ *A los colegas del departamento de eléctrica que también contribuyeron a la realización del trabajo.*

*A todos muchas gracias.*

## RESUMEN

La empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", vierte cada año más de 7 millones de toneladas de colas con contenidos de elementos metálicos valiosos que pueden ser recuperados. Razón por la cual el presente trabajo tiene como propósito determinar su comportamiento ante la variación de la intensidad del campo magnético. Para ello se sometió a la separación magnética por vía seca, con variación de la intensidad del campo desde 0,05 hasta 0,15 A, a tres clases granulométricas: gruesa (+0,2 mm), media (-0,2 +0,045 mm) y fina (-0,045 mm); cuya susceptibilidad magnética se incrementa con la disminución del tamaño de las partículas, con valores de  $97 \cdot 10^{-3}$ ,  $106 \cdot 10^{-3}$  y  $126 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/kg respectivamente, lo que demuestra el carácter ferromagnético. La composición química se determinó a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X. Se obtuvo que el cinc, cromo y aluminio se concentran en el producto no magnético a 0,15 A en la clase de tamaño media; así como en la gruesa a 0,15 A se concentran el Cu, Ni, Mg y SiO<sub>2</sub> en el producto no magnético. El hierro se concentra en el producto magnético de las clases media y gruesa a 0,05 A. En la clase fina la aplicación de un campo magnético no ejerce ningún efecto. Es posible concentrar el níquel hasta 1,23 % a través de un esquema de beneficio propuesto.

Palabras clave:

Colas, composición granulométrica, composición química, susceptibilidad magnética.

## SUMMARY

The company "Commander Ernesto Che Guevara", spills every year more than 7 million tons of tails with contents of valuable metallic elements that can be recovered. Reason for which the present work has as purpose to determine its behaviour before the magnetic field strenght variation. For it underwent the magnetic separation by dry way, with variation of the field intensity from 0,05 A to 0,15 A, to three granulometrics classes: gross (+0,2 mm), mediates (-0,2 +0,045 mm) and fine (-0,045 mm); the magnetic susceptibility these increased with the diminution particles size, with values of  $97 \cdot 10^{-3}$ ,  $106 \cdot 10^{-3}$  and  $126 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/kg respectively, which demonstrates the ferromagnetic character. The chemical composition was determined through the technique of X rays Fluorescence. It was obtained that zinc, chromium and aluminum are concentrated in the nonmagnetic product to 0,15 A in the size class mediates; as well as in gross size to 0,15 A are concentrated the Cu, Ni, Mg and SiO<sub>2</sub> in the nonmagnetic product. The iron concentrates in the magnetic product of the size classes mediates and gross size to 0,05 A. And the class fine the application of field magnetic does not exert any effect. And is possible to concentrate nickel up to 1,23 % through a scheme of benefit proposed.

Key words:

Chemical composition, grain sized composition, magnetic susceptibility, tails.

# ÍNDICE

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DEL TEMA .....</b>	<b>6</b>
1.1. Tratamiento de las colas de la tecnología CARON con el fin de su aprovechamiento .....	6
1.1.1. Tratamiento de las colas por el método pirometalúrgico.....	7
1.1.2. Tratamiento de las colas por el método hidrometalúrgico....	9
1.1.3. Tratamiento de las colas por el método de beneficio de materiales .....	12
1.2. Trabajos de separación magnética .....	16
1.2.1. Magnetización de los minerales.....	18
1.3. Algunas características de las colas de la tecnología CARON ....	20
1.3.1. Composición granulométrica.....	20
1.3.2. Composición química.....	21
1.3.3. Composición mineralógica .....	22
1.3.4. Otras propiedades de las colas.....	23
1.4. Fundamentos teóricos de la separación magnética .....	23
1.4.1. Esencia del método de separación magnética.....	24
1.4.2. Separación a baja intensidad del campo magnético.....	25
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
2.1. Diseño experimental .....	27
2.2. Toma y preparación de la muestra.....	28
2.2.1. Características de la materia prima utilizada .....	29

2.3. Método de elutriación.....	30
2.3.1. Características del elutriador .....	31
2.4. Método de separación granulométrica .....	32
2.5. Metodología de separación magnética .....	33
2.5.1. Susceptibilidad magnética.....	33
2.5.2. Procedimiento de separación magnética .....	35
2.6. Caracterización química.....	37
2.7. Otros equipos utilizados en la investigación.....	38
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
3.1. Características de las colas .....	40
3.1.1. Análisis químico .....	40
3.1.2. Análisis granulométrico .....	41
3.2. Operación de elutriación .....	43
3.3. Análisis de la separación granulométrica .....	43
3.3.1. Análisis de la salida según el tamaño de las partículas .....	43
3.3.2. Análisis de contenidos según el tamaño de partículas .....	44
3.4. Análisis del comportamiento magnético .....	47
3.4.1. Resultados de la susceptibilidad magnética .....	48
3.4.2. Resultados de la separación magnética .....	49
3.5. Análisis de las salidas según los campos magnéticos aplicados .....	54
3.6. Propuesta de un esquema para el tratamiento de las colas .....	55
3.7. Análisis preliminar del impacto ambiental .....	57
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS.</b>	

# **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

Cuba ocupa un lugar cimero en las reservas mundiales de minerales lateríticos de níquel, los que están caracterizados por una distribución desigual de los valores metálicos en las distintas capas que componen el perfil ferruginoso. De lo cual se deriva que las tecnologías diseñadas para procesarlos no logren su aprovechamiento racional, en el que se generan grandes volúmenes de residuales de los procesos mineros y tecnológicos.

Los yacimientos lateríticos cubanos se encuentran ubicados fundamentalmente en el nordeste de la provincia de Holguín, donde actualmente operan las tres industrias metalúrgicas que se dedican a su procesamiento; una con la tecnología ácida a presión y las dos restantes con la tecnología Carbonato Amoniacal (proceso CARON), la que logra extracciones de níquel de un 86 % y de cobalto no más de un 30 %, en la que gran parte de las especies metálicas quedan en los sólidos no lixiviados del proceso; además existe un proyecto en ejecución para la producción de Ferroníquel (FeNi).

Debido a lo anterior, la obtención de concentrados de níquel a partir de menas lateríticas en nuestro país, lleva aparejado la deposición de un volumen considerable de sólidos no lixiviados del proceso extractivo, denominados colas (residuos); las cuales son almacenadas en presas para su futuro aprovechamiento.

La generación de colas de la industria del níquel cubana, se comenzó con la puesta en marcha en 1943 de la empresa “Comandante René Ramos Latourt” de Nicaro, seguida en 1959 con el inicio de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba” (Moaníckel S.A.), y posteriormente en 1986 con la arrancada de la fábrica “Comandante Ernesto Che Guevara” (ECG) de Punta Gorda. Las colas, además de residual, constituyen una importante materia prima para la obtención de otros

elementos valiosos contenidos como el cobalto (Peña 2011). Los volúmenes de colas se incrementan en la medida que aumenta la producción de níquel en las empresas; en la actualidad se vierten más de 7 millones de toneladas al año.

Para el Grupo Empresarial Cubaníquel, la generación de colas por las industrias del níquel cubanas con altos contenidos de hierro y metales pesados por casi siete décadas, constituye uno de los problemas de mayor impacto ambiental, que se transforma en una fuente de contaminación que afecta la flora, la fauna terrestre y marina aledañas a la zona de los depósitos, y las aguas superficiales y subterráneas como consecuencia del alto régimen de precipitación en la región; además de las molestias y contaminaciones atmosféricas ocasionadas en los asentamientos poblacionales cercanos a los depósitos en las épocas de sequía. Por lo que se convierte en un gasto económico adicional, ya que se necesita regar agua continuamente para reducir el polvo arrastrado por el aire.

Algunos especialistas dedicados al desarrollo económico futuro de la región Moa–Nicaro, consideran que el proceso minero estará indisolublemente ligado a la explotación de los minerales almacenados en las presas de colas, ya que la explotación de las lateritas, al igual que todos los recursos naturales, tiene un tiempo de vida limitado, y constituyen recursos no renovables. De ahí la importancia de desarrollar investigaciones encaminadas a su procesamiento para lograr una mayor eficiencia en el aprovechamiento de los recursos, con el objetivo de mantener una sustentabilidad económica en la región.

La demanda creciente de los minerales de hierro en el mercado mundial, abre una posible alternativa para la utilización de las colas, ya que el metal representa aproximadamente el 45 % de la masa total. Después de los ajustes necesarios en los contenidos de hierro, níquel, cobalto y cromo, las colas pudieran ser comercializadas como un nuevo producto con alto valor agregado para los consumidores del mineral, de tal manera que se puede convertir en una materia prima codiciada por los clientes aceristas.

La creatividad de los científicos y tecnólogos cubanos en función de desarrollar una alternativa tecnológica que permita convertirlos en productores y suministradores de

materias primas de minerales de hierro, pudiera ser la solución más viable para la disposición y uso de dichas colas.

Hasta ahora se han desarrollado varias investigaciones encaminadas a obtener metodologías para el tratamiento de las colas, en el que se destacan algunos autores (Presilla 1969, Ponce 1979, Zamora *et al.* 1981, Turro 2002, *Mavrommatis et al.* 2002, Hernández 2004, Rojas & Turro 2003, Del Toro 2003, Ariza *et al.* 2004, Rodríguez 2004, Baldoquín 2004, Peña 2011, Hernández 2011, entre otros). Las investigaciones fundamentalmente han sido realizadas a las colas obtenidas como resultado del Proceso CARON, debido a que de las tres empresas niquelíferas de la región, dos emplean esta tecnología, y por consiguiente los volúmenes almacenados son mayores; además los contenidos de metales valiosos (níquel y cobalto) en la otra tecnología son muy pequeños por su elevada eficiencia, y contiene determinada cantidad de azufre que reduce la posibilidad de aprovecharlos en la metalurgia del acero.

Nuevas alternativas tecnológicas para el aprovechamiento de los recursos minerales constituyen una gran importancia, de manera tal que permitan un tratamiento integral y posibiliten la sostenibilidad del desarrollo minero de la región.

El beneficio de las colas con el aprovechamiento de la propiedad física de susceptibilidad magnética, constituye una opción para el tratamiento del residuo de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. En tal sentido se han obtenido concentrados con altos contenidos de hierro y cromo a partir de las colas de la empresa “Comandante René Ramos Latourt”, los cuales han obtenido valores comercializables (Leyva *et al.* 2000).

Según lo antes expuesto se declara como **situación problemática**, la existencia de grandes volúmenes de colas generados por la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, que contienen elementos metálicos valiosos y poseen características físicas que no se han tenido en cuenta para su posible aprovechamiento.

Por lo que se define como **problema científico**: el insuficiente conocimiento del comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ante la variación de la intensidad del campo magnético.

El **objeto de investigación** es las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **campo de acción** consiste en el proceso de separación magnética.

Se enuncia como **hipótesis**:

Si se determina el comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” frente a la variación de la intensidad del campo magnético, entonces se podrá proponer una vía para su futuro aprovechamiento.

Por lo que el **objetivo del trabajo** es determinar el comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ante la variación de la intensidad del campo magnético para su futuro aprovechamiento.

Para dar cumplimiento al objetivo general se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

1. Determinar la composición química y granulométrica, así como las propiedades magnéticas de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
2. Aplicar el proceso de separación magnética a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
3. Proponer un esquema tecnológico para el tratamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se plantean las siguientes **tareas de investigación**:

1. Revisión bibliográfica de los antecedentes del tema.
2. Determinación de la composición química y granulométrica de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
3. Determinación de la susceptibilidad magnética a las colas iniciales y a los grupos granulométricos.
4. Realización de ensayos de separación magnética a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

5. Caracterización de los productos de la separación magnética por vía seca.
6. Análisis de los resultados y propuesta de un esquema tecnológico.

**CAPÍTULO 1.**  
**ANTECEDENTES Y**  
**ACTUALIDAD DEL**  
**TEMA**

# **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DEL TEMA**

En la búsqueda de soluciones para el uso racional a las colas del proceso CARON, y eliminar el impacto ambiental que se produce en el territorio de Moa y Nicaro, donde se encuentran ubicadas las empresas metalúrgicas “Comandantes Ernesto Che Guevara” y “René Ramos Latourt” generadoras de grandes volúmenes de residuos, numerosos investigadores han realizado trabajos encaminados a darle una utilización industrial.

## **1.1. Tratamiento de las colas de la tecnología CARON con el fin de su aprovechamiento**

En el ámbito mundial una de las posibles soluciones encontradas para la disminución de los volúmenes de colas, es su empleo en la industria de la construcción; como relleno en la fabricación de carreteras, caminos, terraplenes y ferrocarriles, además como aditivo en la fabricación de cemento, asfalto, concreto y en la manufactura de ladrillos de silicato de calcio o como fuente de material puzolánico; aunque muchas veces su uso se ve limitado por su fineza, alto contenido de impurezas y deslave de metales trazas (*Mineral Processing Wastes* 2006).

Dentro de la metalurgia el estudio del residuo sólido de la tecnología carbonato amoniacal, ha estado dividido en tres ramas fundamentales, como son: procesos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos y beneficio de minerales.

### 1.1.1. Tratamiento de las colas por el método pirometalúrgico

Entre las compañías e investigadores principales que han empleado los procesos pirometalúrgicos para el procesamiento de las colas se encuentran las siguientes:

La *Nacional Lead Company* fue la primera interesada en aprovechar las colas, ya que en el año 1952 se trazó la meta de obtener un concentrado de hierro. En las investigaciones se nodulizaron las colas y se calcinaron a 900 °C, estos nódulos se mezclaron con cisco de coque y carbonato de calcio y se calentaron hasta 1150 °C, se enfriaron, trituraron y se le realizó separación magnética seca, en la que se obtuvo un producto magnético con 71,20 % de hierro total y recuperación del 83,40 %. Similar procedimiento se realizó con mezcla 1:1 de colas y mineral de hierro de baja ley para obtener un producto magnético con 91,10 % de hierro total y recuperación del 73,90 % (Resumen del Taller de Colas 2005).

Luego Presilla (1969) presentó un plan para realizar investigaciones a escala de laboratorio para obtener hierro esponja a partir de las colas de Nicaro. Posteriormente en el Instituto Mejanoobr, se realizaron pruebas de sinterización y peletización al concentrado de hierro, y al comparar los resultados, se concluyó que el método de peletización es poco efectivo en comparación con la sinterización, debido a su baja productividad específica (0,30 t/h) (Resumen del Taller de Colas 2005).

Zamora *et al.* (1981) en su investigación obtienen un enriquecimiento en hierro de las colas de Nicaro, mediante la tostación magnetizante (conversión del óxido no magnético ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en óxido magnético ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )) y la separación magnética húmeda, con el uso de carbón vegetal como agente reductor. En la que se obtuvieron los parámetros tecnológicos más convenientes para continuar la investigación en curso a escala de planta piloto; donde se estudia en específico la variante de efectuar la tostación con carbón vegetal cubano como agente reductor, y el uso de los finos de coque, finos de antracita, la lignita, la turba, y otros de origen vegetal; como el bagazo y el carbón, el cual se obtiene a partir de los recursos forestales propios y presenta la ventaja de no aportar azufre. Entre las conclusiones del trabajo está la

posibilidad de obtener un concentrado con 62 % de hierro, 75 % de rendimiento en peso, 92 % de recuperación y 59 % de desulfuración primaria, cuya utilización para la producción de *pelets* calcinados puede constituir una nueva vía más económica de utilización de los recursos minerales. Solo queda la incógnita de la deforestación que trae consigo.

Un poco más tarde, en 1990, investigadores del Centro de Investigaciones Metalúrgicas de España (CENIM) estudiaron la peletización del concentrado de hierro con 0,50 y 1,00 % de bentonita como aglutinante y se piroconsolidaron a 1300 °C; a los *pelets* verde, seco y piroconsolidados se les efectuaron los ensayos de resistencia pertinentes. Se realizaron 10 ensayos de prerreducción, en lecho estático a baja temperatura (desde 1000 hasta 1250 °C), con el empleo de carbón antracita como reductor. Con la muestra de cola se hicieron ensayos de reducción por lupias en lecho estático a temperatura de 1350 °C, logró obtener un metalizado con granulometría por lo general inferior a 2,00 mm. Es criterio de los especialistas participantes del CENIM que el proceso de obtención de lupias es el más favorable para el procesamiento de las colas de Nicaro (Resumen del Taller de Colas 2005), solo que tiene el inconveniente de que hay que calentarlos hasta elevadas temperaturas, con el consiguiente consumo de energía.

En 1999, investigadores alemanes se propusieron obtener un concentrado de hierro con mejores características que las obtenidas hasta el momento, el estudio se realiza con colas tomadas en la descarga de los alambiques. Primeramente aplican una tostación oxidante de la materia prima, para con posterioridad someterla a un proceso de tostación magnetizante en atmósfera controlada y en condiciones ideales de reducción para un mineral de hierro, con el objetivo de obtener la mayor cantidad de magnetita. La investigación se hace bajo el criterio de que el proceso de reducción en la fábrica de Nicaro se subordina a las condiciones en que se logra la mejor recuperación del níquel y no para obtener magnetita. Pese a realizar el trabajo como se había planificado, los resultados no fueron los esperados, pues los índices tecnológicos alcanzados y la calidad del concentrado de hierro obtenido no fue superior a los obtenidos con las colas normales del proceso.

En otras investigaciones alemanas en el año 2002, se realizaron pruebas de inyección de colas al baño metálico de un horno de inducción de 50,00 kg a escala de laboratorio, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los diferentes elementos. Las pruebas se repitieron a mayor escala en el año 2004 en el horno de arco eléctrico (HAE) de 1,50 toneladas del taller de hierro gris en la Antillana de Acero, en la que se obtuvo un acero que por sus características se encuentra entre las marcas normalmente producidas en Cuba (Resumen del Taller de Colas 2005).

Los investigadores *Mavrommatis et al.* (2002) demuestran que el níquel y el cobalto de las colas de Nicaro, pueden ser reciclados en la producción de acero en alto grado, sobre el 90 %. Las condiciones de equilibrio usadas, así como los cálculos termodinámicos llevados a cabo, indican que la inyección de colas en hornos de arco eléctrico puede ser posible. Lo que traería beneficios para ambos países (Cuba y Alemania), principalmente en la aproximación al desarrollo sostenible en el reciclado de colas en la producción de aceros.

Como se ha podido apreciar, la vía pirometalúrgica ha sido muy utilizada para el posible tratamiento de las colas de Nicaro; sin embargo, su generalización no se ha llevado a cabo precisamente por los elevados costos energéticos que genera.

### **1.1.2. Tratamiento de las colas por el método hidrometalúrgico**

La vía hidrometalúrgica para el tratamiento de minerales es muy empleada a nivel mundial. Por lo que se mencionan una serie de resultados obtenidos a través del método en el estudio de las colas.

Turro (2002) realizó un estudio del hidrotransporte de las colas del proceso CARON de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. En el trabajo realiza una caracterización granulométrica, química y mineralógica de la fase sólida, determina que las fases principales presentes son: la maghemita, la magnetita y el cuarzo. Obtiene una caracterización reológica de sedimentación y de estabilidad de sus hidromezclas en medio amoniacal. Se determinó que las partículas inferiores a los 43  $\mu\text{m}$ , con una composición química muy uniforme están conformadas por varias

fases mineralógicas, en la que sobresale principalmente la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y la maghemita ( $\sigma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). El trabajo no tuvo en cuenta el aprovechamiento de las colas.

Por su parte Del Toro (2003) realiza una revisión teórica y experimental sobre el posible desarrollo de un método o proceso factible para el tratamiento de las colas de la Tecnología Carbonato Amoniacal. El objetivo fundamental de la investigación, es recuperar el cobalto presente en el desecho industrial, cuyo contenido se encuentra en el orden de 0,08 a 0,12 %. Al parecer el  $\text{FeSO}_4$  logra romper la estructura cristalina de las asbolanas, lo que propicia que el cobalto atrapado en su estructura aflore y sea pasado a la solución en forma de sulfato. Como resultado del trabajo se obtuvo que mediante la lixiviación con soluciones acidificadas de hierro 2+ se extrae cerca del 84 % del cobalto presente. Esta investigación fue sólo un paso más para el tratamiento de las colas amoniacaes, no sólo con el objetivo de recuperar el cobalto existente en ella, sino también el manganeso, aluminio, cobre entre otros. En este caso se tiene como limitante, el enorme volumen de masa que hay que remover para extraer el elemento de interés, cuyo contenido es pequeño.

En otros estudios realizados por Ariza *et al.* (2004), se llevó a cabo una lixiviación de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. El trabajo contempla los resultados del estudio realizado a escala de laboratorio, mediante el uso de cuatro ácidos orgánicos (tartárico, oxálico, acético y cítrico). El objetivo fundamental consistió en seleccionar el de mayor capacidad para extraer el níquel y cobalto contenido. El desarrollo de la investigación fue concebido a través de la aplicación de las técnicas de diseño de experimentos factoriales, para estudiar el comportamiento de las variables tiempo, concentración de ácido y relación líquido/sólido. Los mejores resultados se obtuvieron con el ácido cítrico, con el que se lograron extracciones máximas de níquel de 77,40 % y de cobalto de 82,20 %; además de los elementos antes mencionados hubo extracciones en grados apreciables de las impurezas de manganeso, magnesio y hierro, con valores de 77,50; 75,30 y 65,70 % respectivamente. La aplicación de este método se limita por la utilización del ácido cítrico, ya que representa una fuente de alimento.

Con el mismo propósito Baldaquín (2004) estudió la posibilidad de recuperar el cobalto contenido en las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, en las cuales obtuvo elevadas extracciones. Determinó el modelo estadístico y cinético que rige el proceso de lixiviación con mezclas de ácidos orgánicos, cuyos agentes lixiviantes poseen un precio considerable.

Rodríguez (2004) a partir de la lixiviación ácida reductora (con dióxido de azufre y ácido sulfúrico) de las colas de la planta niquelífera “Comandante Ernesto Che Guevara”, se trazó como objetivo principal determinar los parámetros que permiten obtener, con buenos índices de extracción, un licor de sulfato ferroso y de otros metales (níquel y cobalto), para ser utilizado posteriormente en el procesamiento de los nódulos marinos polimetálicos. Como resultado del trabajo se obtuvo, que al lixiviar las colas “amoniacales” en un medio ácido reductor y condiciones atmosféricas, es posible lograr altas extracciones del hierro, níquel y cobalto y obtener un licor de sulfato ferroso con una concentración relativamente alta de hierro 2+ (agente reductor de posible uso en la lixiviación de los nódulos marinos). La investigación se restringe a obtener un reactivo para utilizarlo en otro proceso, y no para extraer por separado algún elemento de interés; lo que lo hace muy costoso y prolongado.

En investigación más reciente, Peña (2011) realizó una lixiviación ácida a presión atmosférica a las colas de la tecnología carbonato amoniacal, con el empleo de ácido sulfúrico; cuya realización se hizo a escala de laboratorio en un reactor de 4,5 L de capacidad. Comprobó que es posible una alta extracción de cobalto de forma selectiva, para temperatura de 95 °C, concentración inicial de sulfato de hierro 2+ de 1 g/L, contenido de sólido de 24 % y concentración inicial de ácido sulfúrico de 40 g/L se obtiene una extracción de cobalto de aproximadamente 85 % en 15 minutos. El modelo estadístico–matemático obtenido permitió analizar que los parámetros utilizados influyen positivamente en la extracción de cobalto de manera descendente en el orden siguiente: temperatura, contenido inicial de sólido, concentración inicial de ácido sulfúrico y concentración inicial de sulfato de hierro 2+. En este trabajo

también se necesita consumir el reactivo para una elevada masa de materia prima, además de su remoción.

Hernández (2011) realizó una lixiviación orgánica de los residuos sólidos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para ello empleó mezclas de ácidos oxálico y tartárico como agente lixivante, se lograron extracciones de cobalto, níquel e hierro de 78; 60 y 35 %, respectivamente. La posterior precipitación y calcinación de las sales metálicas obtenidas a partir del licor de lixiviación, condujo a un producto con contenidos de 1,22 % de níquel, 0,33 % de cobalto y 65,50 % de hierro. Las pruebas de separación magnética húmeda con las colas residuales de la lixiviación muestran una tendencia a enriquecer el hierro en la fracción magnética con valores de hasta 50 %. Al considerar los costos por concepto de consumo de reactivo, sugiere que esta variante puede ser una alternativa viable.

A modo de resumen, se puede decir que la vía hidrometalúrgica ha sido ampliamente utilizada por investigadores e instituciones en el estudio de las colas de la tecnología CARON, justificado por los bajos costos económicos con respecto a otros procesos.

### **1.1.3. Tratamiento de las colas por el método de beneficio de materiales**

En las investigaciones realizadas por la vía del beneficio a las colas de la tecnología CARON, se han propuesto varios métodos, en los cuales se pueden destacar: la flotación, la separación gravimétrica y la magnética; este último ha resultado ser el método más empleado para la obtención de concentrados de hierro y cromo, con el empleo de la vía húmeda a baja intensidad del campo magnético.

Entre las instituciones e investigadores que más han utilizado estos métodos de beneficio se encuentran los que se nombran a continuación:

En el Instituto Mejanoobr se realizaron investigaciones muy amplias con las colas de Nicaro, con el objetivo de caracterizarlas y luego determinar un flujo tecnológico adecuado con vista a la proyección de una planta de beneficio a escala piloto (Herrera 1961). Se determinó que la vía idónea para el beneficio es la separación magnética húmeda a baja intensidad del campo magnético, con la que se obtuvieron

concentrados con 58,10 % de hierro, que según su composición química está apto para la utilización siderúrgica. Debido a esto se recomendó un esquema de beneficio para una prueba de concentración semi-industrial.

El principio del esquema de beneficio propuesto es una separación magnética básica, seguida por operaciones de limpieza del concentrado y control del rechazo para la recuperación de las pérdidas de hierro arrastradas.

También se realizaron pruebas de obtención de *pelets*, las que confirmaron que a partir del concentrado de las colas se pueden obtener *pelets* con características satisfactorias. Sin embargo, hubo problemas en el secado de los mismos, debido a la porosidad interna de las partículas, que provocan una absorción de agua muy grande.

*Ashinkov* (1962) estudió resultados de investigaciones de separación magnética y clasificación de las colas de Nicaro, en el que hace un resumen de los siguientes aspectos: composición granulométrica, características mineralógicas, composición química por clases de tamaño y el mineral inicial; experimentos de clasificación de las colas con magnetización preliminar, experimentos de separación magnética con un tubo separador y experimentos de separación magnética en una banda separadora. En el trabajo se concluye que:

Mediante el beneficio magnético de las colas de Nicaro (tanto las frescas como las viejas) pueden obtenerse concentrados con contenidos de hierro entre 58 y 59 % y relación Cr/100 partes de hierro entre 1,60 y 1,80.

El concentrado de mayor calidad no puede obtenerse por beneficio mecánico debido a las particularidades mineralógicas de las colas.

Los resultados confirman los índices obtenidos por el Instituto Mejanoobr en el beneficio magnético de las colas.

En el trabajo de Herrera (1963) se presentan resultados del análisis químico realizado a colas de Nicaro previamente desmagnetizadas y sin desmagnetizar. Se concluye que la mejor separación del hierro en la fracción magnética se obtiene a

una intensidad de campo magnético de 800 gauss tanto para las colas desmagnetizadas como para las colas sin desmagnetizar.

En el Informe (1981) realizan un análisis mineralógico a las mezclas de colas tomada del dique de la empresa “René Ramos Latourt” y la producción corriente de la misma, y pruebas de separación magnética a ambas muestras, con el objetivo de determinar los índices de beneficio y luego producir concentrado para las pruebas de sinterización. Se aplicó la separación magnética, filtración y sinterización de los concentrados según esquemas de beneficio previstos para la siderúrgica integrada. Los resultados arrojaron una concentración del hierro en un rango desde 55,90 hasta 57,00 % y de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  desde 1,80 hasta 2,00 %, apto para las pruebas de sinterización. Se determinó que la presencia de hidrocarburos en las colas de cabeza ejerce influencia negativa en la estabilidad de los procesos de separación (filtración) así como en los índices tecnológicos correspondientes.

Peña (1986) analizó diferentes métodos de estudio en la aplicación de un esquema para la obtención de un concentrado más rico en hierro a partir de las colas de Nicaro. El estudio se realiza a través de:

Variación en el esquema de separación magnética.

Utilización de la flotación.

Como resultado se obtiene que la separación magnética es el método más apropiado para el beneficio de las colas; solo que el análisis no contempla su generalización. Por el método de flotación no se puede obtener un concentrado final con altos contenidos de hierro.

Jones (1988) obtuvo un concentrado de cromita a partir del rechazo industrial de Nicaro. Para ello se utilizó la metodología del buró de investigación de California pero a escala de laboratorio. Se definen las particularidades principales de la tecnología a estudiar, la que contempló como clasificación previa, separación magnética, clasificación preparatoria y concentración gravitacional, a la luz de los resultados

obtenidos se mostró la posibilidad de obtener concentrado de cromita con no menos del 36,00 % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

En el mismo año López (1988) propone un esquema de beneficio para las colas de Nicaro, en el que se combinan la separación magnética por vía húmeda con la sedimentación, a través de las cuales se obtiene un concentrado de hierro de 55,7 % con un rendimiento de 63,6 %. Define que los factores que influyen en la separación magnética son: velocidad de rotación del tambor, intensidad del campo magnético, densidad de la pulpa y altura del baño. Se plantea además que una deslamación previa y posterior a la separación magnética, permite incrementar el contenido de hierro en el concentrado.

*Kriboi* (1992) realizó una amplia investigación que incluye la determinación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las muestras iniciales de las colas de Nicaro, en la cual utilizó a escala de laboratorio los procesos de enriquecimiento de separación magnética húmeda a baja, media y alta intensidad, concentración gravitacional, deslamación y la combinación entre ellos.

La separación magnética a baja intensidad mostró índices de beneficio similares a los obtenidos a nivel de planta en el Centro de Investigación Siderúrgica (CIS), e inferiores a los logrados a escala de laboratorio en el Instituto Mejanobr de Leningrado, aún cuando en el último se utiliza un esquema menos complicado. Los resultados de la concentración de la cromoespinela igualmente son inferiores a los obtenidos por el CIS.

Como resultado, en el CIS se han obtenido concentrados de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  de un 40 a 43 % a partir de las colas de Nicaro, mediante un esquema de beneficio propuesto por Leyva *et al.* (2000); cuyo producto puede ser utilizado en los fines siguientes: conformación de briquetas para la obtención de ferrocromo de carga; como relleno refractario para moldes y machos en fundición; y en ACINOX Las Tunas como sustituto parcial de la arena de circonio en los cierres de correderas de las cazuelas.

Casi nula son las investigaciones realizadas a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” por el beneficio de minerales; puede relacionarse el trabajo de

Loyola *et al.* (2011), analizan el comportamiento de los diferentes elementos presentes en tres clases de tamaño cuando se aplica una intensidad del campo magnético de 40,33 kA/m. El trabajo estuvo restringido solamente para una intensidad del campo magnético.

Del análisis antes realizado se ha llegado a las conclusiones siguientes:

El método de flotación no es recomendado por los bajos contenidos que se obtienen en el concentrado final.

Con la utilización de los procesos pirometalúrgicos para el tratamiento de las colas, el consumo de energía eléctrica, combustible y otros aditivos necesarios es muy elevado, lo que lo encarece notablemente.

No existe un estudio integral que relacione la beneficiabilidad y el comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” por el método de separación magnética.

## **1.2. Trabajos de separación magnética**

Por el método de separación magnética se han realizado muchos trabajos, dedicados fundamentalmente a la concentración de uno o más elementos en un producto determinado. En el mundo, el método se aplica esencialmente a aquellos minerales que contienen hierro, ya que es el elemento que define la susceptibilidad magnética, y más aún en su combinación con el oxígeno ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). A continuación se muestran algunas investigaciones en las que se aprovecha tal propiedad física.

En los trabajos dedicados a la preparación mecánica de la laterita (Lago & Valikov 1991, Falcon *et al.* 1992, Rojas & Beyris 1994 y Sovol 1994), están presentes los métodos clásicos de investigación del beneficio de minerales, aplicados más tarde por Coello *et al.* (1998); como regla se estudian una o más propiedades de separación, bajo los conceptos de las curvas de beneficiabilidad o el contraste de las propiedades físicas.

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

- 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 de varios componentes útiles.

Coello *et al.* (1998) estudiaron la distribución fraccional de los elementos existentes en los escombros lateríticos de Moa. Con la combinación del tamaño de las partículas y la susceptibilidad magnética, obtuvieron modelos que definen el comportamiento de los principales elementos en cada uno de los productos, es decir, que en caso de realizar la operación de beneficio a dichos materiales, se puede definir como quedan distribuidos sus diferentes componentes. Para ello concluyeron que el cobalto puede ser recuperado en uno de los productos obtenidos, ya que su concentración está en el rango de las especificaciones tecnológicas.

También fueron estudiados los escombros lateríticos del yacimiento Pinares de Mayarí por Ferreiro *et al.* (2007), en el que se valora la posibilidad de obtener un concentrado de hierro a partir de la fracción granulométrica +0,83 mm (con contenido de hierro inicial de 52,4 %). Para ello a la fracción estudiada se le aplicó un proceso de tostación magnetizante y separación magnética húmeda a baja intensidad del campo magnético (800 gauss). Como resultado se obtuvo un concentrado con contenido de hierro de 60 %. El resultado estuvo a costa del consiguiente consumo de energía para lograr la magnetización del escombros.

La recuperación del níquel a partir de minerales lateríticos con bajos contenidos del metal fue estudiado en Japón por Jungah *et al.* (2010). Como procedimiento se utilizó la calcinación y luego la separación magnética por vía húmeda. Debido a que el mineral contiene níquel y hierro, la calcinación de lateritas es eficaz en la alteración de la estructura cristalina de las especies de hierro, y por lo tanto sus propiedades

magnéticas, que a su vez permiten la concentración selectiva del níquel por separación magnética. Los resultados experimentales indicaron, que para llevar a cabo el proceso de forma eficiente, es importante controlar cuidadosamente: la temperatura de calcinación, la densidad de la pulpa y la fuerza del campo magnético aplicado. Como resultado obtuvieron la recuperación del 48 % del níquel inicial, con un incremento de su contenido desde 1,5 hasta 2,9 %, lo que se logró con la calcinación del mineral a 500 °C durante 1 h. En lo que se contempla además el consumo elevado de energía para la calcinación.

La separación magnética ha sido empleada para otros metales, por ejemplo: en Rumanía, *Mihai* (2009) presentó un método para separar las pequeñas partículas de metales no ferrosos a partir de mezclas de desechos de dos componentes metálicos no ferrosos, con el uso de un nuevo tipo dinámico de corrientes parásitas, con un separador de imanes permanentes. Cuyo método consta de un tambor horizontal rotatorio cubierto con imanes permanentes, orientados alternativamente N-S y S-N. El proceso de separación se lleva a cabo en dos etapas, primero las partículas fuertemente magnéticas son separadas en la parte superior del tambor y, a continuación las menos magnéticas son separadas en la parte inferior. Como resultado se obtuvieron dos productos, mezclas de Cu-Pb y de Cu-Al.

### **1.2.1. Magnetización de los minerales**

Una de las vías que se utilizan para facilitar la separación magnética de los minerales, es precisamente llevar a cabo su magnetización, ya sea a través de una tostación magnetizante, como lo realizó *Ashinkov* (1962) para las colas de Nicaro, o con otros métodos como los que se relacionan a continuación:

La magnetización de minerales de hierro por microondas fue estudiada por *Znamenáčková et al.* (2004). Los que modificaron las propiedades magnéticas de los componentes minerales de la siderita, en el que se logró un incremento en la eficiencia de la separación. El pretratamiento se realizó en un horno de microondas con una potencia máxima de 900 W a un mineral débilmente magnético (25,1 % de hierro, 9,6 % de SiO<sub>2</sub>). Se realizó a 100 g de muestras de mineral de hierro espático

de tamaño de partícula entre 0,5 y 1 mm de un yacimiento de *Nizna Slana* en Eslovaquia. Después de 10 minutos de calentamiento, se notó un cambio esencial en las propiedades magnéticas de las muestras, y luego de 15 minutos un rápido aumento de su valor, lo que representa la descomposición intensiva de la siderita. Los cambios en las propiedades magnéticas fueron confirmados por la medición de la susceptibilidad y por análisis químicos, y de difracción de rayos X, con la confirmación de la formación de nuevas fases minerales fuertemente magnéticas. El resultado de energía dispersiva de rayos X (EDX) mostró el carácter de óxidos de la fase que consiste en óxidos complejos de hierro y en metal; y de los resultados de los análisis químicos, el hierro total resultó ser el 45,40 %, y el hierro metálico el 7,10 %, además del 15,50 % de SiO<sub>2</sub>. Después del tratamiento por microondas, las muestras fueron sometidas a la separación en el campo magnético con la inducción máxima de 0,17 T, donde en la muestra calentada hasta 15 minutos la recuperación fue del 97,6 % de hierro.

*Waters et al. (2008)* estudiaron el efecto de la temperatura sobre las propiedades magnéticas de la pirita. Confirman que un calentamiento hasta 800 y después de 900 °C incrementa la magnetización. El rango desde 800 hasta 900 se debe a los cambios inducidos por la oxidación de la pirita. Como resultado se obtuvo un incremento de la recuperación desde 25 % (antes del calentamiento) hasta 90 % en la separación magnética por vía húmeda, después de haber sido calentada hasta 500 °C.

En estudios realizados entre universidades iraníes, *Barani et al. (2010)* determinaron el efecto del calentamiento por radiación a través de microondas sobre la magnetización de un mineral de hierro, tanto para porciones magnéticas como para las paramagnéticas. Para ello se tomaron cuatro muestras, a tres las sometieron al calentamiento en un horno de microondas modo múltiple con una frecuencia de 2,45 GHz, y una potencia de 1100 W, y las mantuvieron dentro del equipo 30; 60 y 120 s respectivamente. Tanto a las muestras tratadas como a la no tratada, se determinó la magnetización con un magnetómetro de muestra vibrante. Los resultados mostraron que el calentamiento por microondas incrementa la

susceptibilidad magnética a las fracciones ferromagnéticas (en un tiempo de 60 s desde 0,0687 hasta 0,3879 m<sup>3</sup>/kg); mientras que en 120 s (ha llegado la fusión) se redujo hasta 0,1894 m<sup>3</sup>/kg. Por su parte a las partículas paramagnéticas se redujo la susceptibilidad desde 0,0111 m<sup>3</sup>/kg hasta cero. En el trabajo se confirma que la radiación de microondas tiene un efecto significativo sobre las propiedades magnéticas del mineral de hierro. Sin embargo, existe una condición limitada, la radiación excesiva tiene un efecto negativo y reduce la susceptibilidad magnética.

Se concluye que la separación magnética puede ser aplicable a cualquiera de los minerales de hierro; y que para lograr mejores índices en el proceso, un método eficaz es su magnetización previa.

### **1.3. Algunas características de las colas de la tecnología CARON**

En la búsqueda de soluciones al tratamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, muchos investigadores la han caracterizado desde diferentes ópticas. A continuación se reflejan algunos aspectos cualitativos y cuantitativos que corroboran esta afirmación.

#### **1.3.1. Composición granulométrica**

La composición granulométrica de las colas ha sido estudiada por varios autores (Turro 2002, Rojas & Turro 2003, Peña 2011 y Palmero 2011). En la tabla 1 aparece la composición granulométrica, el contenido y la distribución por clases de tamaño.

Como se muestra en la tabla, se obtuvieron las fracciones granulométricas siguientes:  $f_1$  (+0,175 mm);  $f_2$  (-0,175 +0,147 mm);  $f_3$  (-0,147 +0,074 mm);  $f_4$  (-0,074 +0,044 mm) y  $f_5$  (-0,044 mm).

Con respecto a la salida en por ciento en peso se pueden observar tres grupos granulométricos principales:

- el primero formado por la fracción granulométrica más fina ( $f_5$ ), menor de 0,044 mm, que representa alrededor del 60,00 % del total;

- el segundo agrupa las clases granulométricas  $f_1$ ,  $f_3$  y  $f_4$  que constituye alrededor de un 37,40 % en peso;
- y el tercer grupo lo integra la clase granulométrica  $f_2$ , algo gruesa, con cerca del 2,60 %.

Tales resultados permiten concluir que las colas emanadas del proceso CARON son de granulometría esencialmente fina, lo que coincide con los resultados obtenidos por Ponce (1979).

Tabla 1. Composición granulométrica de las colas (Turro 2002).

<b>Clases de tamaño, mm</b>	<b>Masa, kg</b>	<b>Salida, %</b>	<b>Acumulativa, %</b>
+0,175	0,21	10,40	10,40
-0,175+0,147	0,05	2,60	13,00
-0,147+0,074	0,30	15,00	28,00
-0,074+0,044	0,24	12,00	40,00
-0,044+0	1,20	60,00	100,00
Total	2,00	100,00	-

### 1.3.2. Composición química

Las comparaciones en cuanto a la composición química realizada por Hernández (2011) a muestras tomadas de diferentes puntos de la presa de colas y entre colas frescas y viejas, muestran que es posible homogenizarlas para conformar una sola muestra representativa, debido a que los rangos de variabilidad son estrechos, solo se notan determinadas fluctuaciones de forma puntual en los valores de  $\text{SiO}_2$ , Fe, Mg, Mn, Al y Cr. Como resultado del análisis espectral cualitativo se determinó que las colas están constituidas por Fe, Si, Al, Mg, Cr, Mn, Ni, Co, Zn, Na, V, Cu, Cd, Ti, Mo, P, Bi, K, Os, Ir, Pd y Sb; en la mayoría de los casos se encuentran en pequeñas cantidades (Bi, Co, Cd, Ti, Mo, y P), en el orden las centésimas (K) y en el de las décimas (Na, S, y C).

(Ponce 1979, Ponce *et al.* 1986, Turro 2002, Peña 2011, Palmero 2011 y Hernández 2011; entre otros) determinaron que los contenidos de sus principales elementos constitutivos varían entre los rangos que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Composición química promedio de las colas de la ECG.

<b>Elementos</b>	<b>Contenidos, %</b>	<b>Elementos</b>	<b>Contenidos, %</b>
<b>Ni</b>	0,34 ÷ 0,41	<b>SiO<sub>2</sub></b>	5,35 ÷ 19,49
<b>Co</b>	0,07 ÷ 0,09	<b>Na</b>	0,02
<b>Fe</b>	40,00 ÷ 47,00	<b>V</b>	0,02
<b>Zn</b>	0,03	<b>Mn</b>	0,56 ÷ 1,50
<b>Cu</b>	0,01	<b>Al</b>	2,32 ÷ 5,30
<b>Mg</b>	3,57 ÷ 7,55	<b>Ca</b>	0,10 ÷ 0,35
<b>Cr</b>	0,83 ÷ 3,40	<b>C</b>	0,84

Se puede concluir que las colas están constituidas fundamentalmente por hierro, y que contiene todavía porcentos considerables de níquel y cobalto.

### **1.3.3. Composición mineralógica**

Rojas & Turro (2003) realizaron análisis mediante técnicas de difracción de rayos-X a diez muestras de colas de dos etapas del proceso (lixiviación y recuperación de amoníaco) de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, con el objetivo de determinar su composición mineralógica. Se demostró que no existen diferencias sustanciales en la composición de las colas de ambas etapas, y se infiere la formación de maghemita en lugar de o conjuntamente con la magnetita, la que constituye la fase de hierro fundamental de las colas de Nicaro (Ponce 1979). Por su parte, Peña (2011) y Hernández (2011) confirmaron tales resultados. Por lo que las principales fases presentes en las colas del proceso Caron se pueden resumir en la tabla 3.

Tabla 3. Composición mineralógica de las colas del proceso CARON (Ponce 1979).

Fases	Fórmulas
Fayalita	$(\text{Fe,Mg})_2(\text{SiO}_4)$
Maghemita	$\sigma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Magnesiocromita	$(\text{Mg,Fe})\text{Cr}_2\text{O}_3$
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Cuarzo	$\text{SiO}_2$

#### 1.3.4. Otras propiedades de las colas

Las colas constituyen un material de color negro muy magnético y brillo semimetálico. Los óxidos de hierro magnetita-maghemita son las fases minerales principales que las componen, con alrededor del 80 % del total (*Mineral Processing Wastes* 2006).

La porosidad, densidad y gravedad específica han sido estudiadas de manera independiente por López (1988), Peña (2011), Fernández (1979) entre otros. Los que definieron que la porosidad está en el orden del 42,50 %, con una humedad molecular de 42,40 %; la densidad específica varía en un rango de 2900 hasta 3850 kg/m<sup>3</sup>; la gravedad específica se encuentra en el rango de 2,63 a 3,85 t/m<sup>3</sup> y su peso volumétrico entre 1,30 y 1,46 t/m<sup>3</sup>. Dichos resultados reflejan que además de ser un material fino también es poroso, por lo que se incrementa su susceptibilidad magnética.

#### 1.4. Fundamentos teóricos de la separación magnética

El método magnético de enriquecimiento de los minerales está basado en la utilización de la variedad de las propiedades magnéticas de los componentes del mineral o material que se somete a la separación; se realiza en separadores magnéticos. La particularidad característica es la existencia de un campo magnético en su zona de trabajo. Al moverse el mineral o material a través del campo magnético del separador, bajo la influencia de la atracción magnética, las partículas

con distintas propiedades magnéticas se desplazan por diferentes trayectorias, lo que permite separar las magnéticas en un producto, y las amagnéticas en otro.

#### 1.4.1. Esencia del método de separación magnética

Para la separación de las partículas magnéticas y amagnéticas, la fuerza magnética de atracción  $f_{mag}$  (figura 1), que actúa sobre las partículas magnéticas debe superar a la resultante de todas las fuerzas mecánicas  $\sum f_{mec}$  (incluye también las fuerzas de cohesión y resistencia del medio); y la fuerza magnética  $f'_{mag}$  que actúa sobre las partículas menos magnéticas o amagnéticas, debe ser menor que las fuerzas mecánicas  $\sum f'_{mec}$  que obran sobre ellas, es decir, en el campo magnético del separador se deben mantener las condiciones siguientes:

$$f_{mag} > \sum f_{mec}$$

$$f'_{mag} < \sum f'_{mec}$$

Dentro de las fuerzas mecánicas, también se puede mencionar: el peso de las partículas, la fuerza higroscópica del agua (en caso de que se realice el proceso por vía húmeda), la densidad de las partículas, el tamaño, entre otras. La desigualdad de dichas fuerzas y la magnética es la que permite la separación de las partículas. Conocido que la fuerza magnética se determina por la susceptibilidad magnética ( $X$ ) de los minerales y la intensidad del campo ( $H$ ), entonces la ecuación quedaría de la manera siguiente:

$$F_{mag} = X \cdot H \quad \text{grad} \cdot H \quad 10^5 \text{ dyn}$$

Por la ecuación se deduce que ambos parámetros ( $X$  y  $H$ ) son proporcionales a la fuerza magnética, por lo que al aumentar la susceptibilidad magnética y la intensidad del campo hay mayor fuerza magnética.

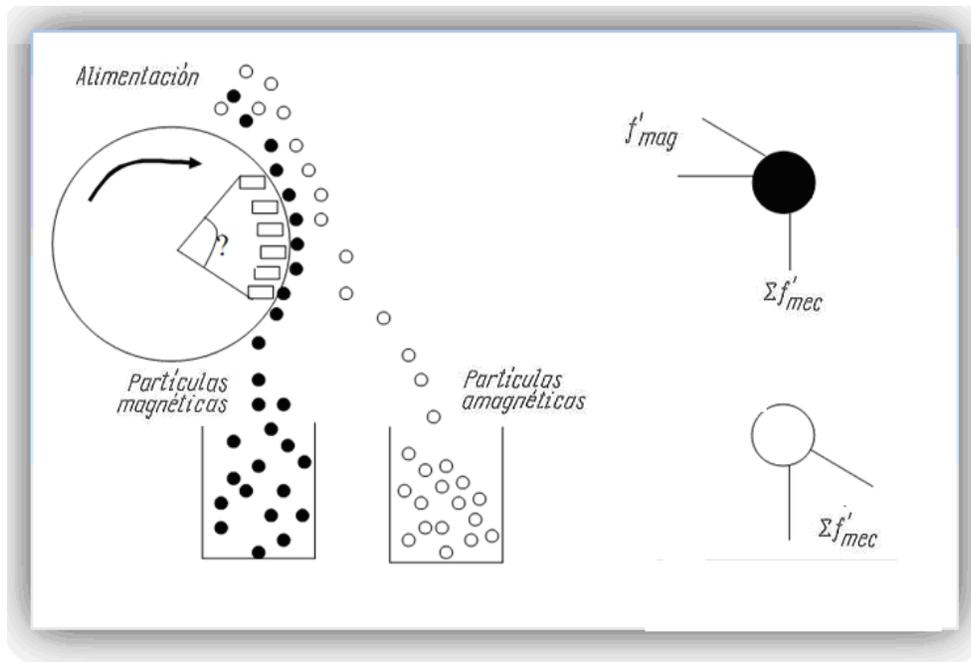


Figura 1. Esquema de separación magnética a baja intensidad del campo.

#### 1.4.2. Separación a baja intensidad del campo magnético

El campo magnético es un estado especial de la materia, y se revela alrededor de los conductores con corriente eléctrica o alrededor de los imanes permanentes. En el último caso el campo magnético está condicionado por las corrientes eléctricas elementales que existen en el imán, que puede ser regulada según la intensidad del campo requerida.

La separación magnética a baja intensidad del campo, es el proceso que se utiliza para separar fundamentalmente especies ferromagnéticas o paramagnéticas (minerales de magnetita) de las especies amagnéticas.

#### Conclusiones parciales

- ✓ La mayoría de las investigaciones realizadas sobre las colas de la tecnología CARON, han estado centradas a las colas de Nicaro. Siendo estudiadas casi únicamente las de la ECG por la vertiente hidrometalúrgica. Por lo que no existe un estudio profundo que relacione la beneficiabilidad y el comportamiento de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" por el método de separación magnética.

- ✓ Resultados de muchos investigadores reflejan que la separación magnética de baja intensidad es el método de beneficio más adecuado para el tratamiento de las colas de la tecnología Carbonato Amoniacal.
- ✓ Las colas de la tecnología CARON están constituidas fundamentalmente por minerales fuertemente magnéticos; con diferencias en la composición mineralógica entre las colas de Nicaro y las de Moa.

# **CAPÍTULO 2.**

## **MATERIALES Y**

## **MÉTODOS**

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

El desarrollo de toda investigación necesita de herramientas para alcanzar los resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos (Ramírez 2002), es por eso que en el presente capítulo se describen los métodos y las técnicas empleadas en el estudio de las colas con el propósito de su futuro aprovechamiento.

### **2.1. Diseño experimental**

El propósito fundamental de la investigación es determinar el comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” al variar la intensidad del campo magnético para su futuro aprovechamiento, en función de la variación de la intensidad del campo magnético. Se toma como base las posibilidades que brinda el método de separación en correspondencia con las propiedades de los materiales a los cuales se les realiza la separación magnética, todo en función de lograr un tratamiento al residual para su aprovechamiento más integral.

La metodología seguida en la investigación estuvo basada en las experiencias de los trabajos realizados para las colas de Nicaro, mencionados en el capítulo 1, principalmente los de López (1988) y *Kriboi* (1992). El estudio experimental se llevó a cabo bajo el esquema de la figura 2. Toda la experimentación se realizó a una corrida original y a dos réplicas para corroborar la veracidad de los resultados.

En la figura se observa que las colas (tomadas directamente de la presa por métodos validados) fueron sometidas a un secado preliminar para facilitar su manipulación; una rigurosa homogeneización según los métodos que se mencionan más adelante; una etapa de elutriación para eliminar partículas micronésimas que entorpecen la

separación magnética; una separación granulométrica que permite realizar una valoración fraccional más amplia de los resultados; y por último la separación magnética con la variación de la intensidad del campo.

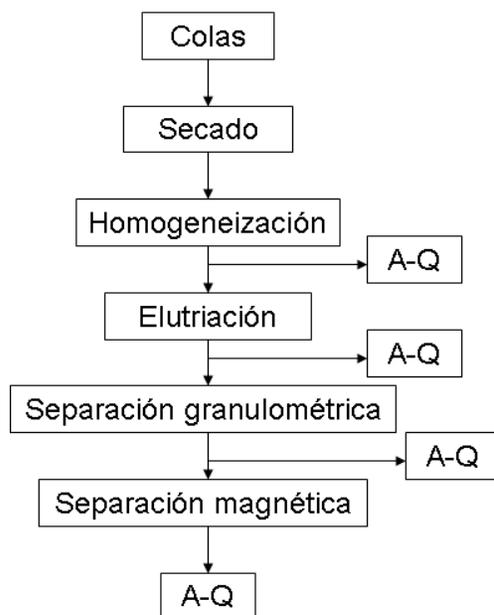


Figura 2. Esquema de flujo general para el tratamiento de las colas.

Tanto la preparación de la muestra (secado y homogeneización) como los restantes procesos (elutriación, separación granulométrica y magnética), fueron realizados en el Laboratorio de Beneficio de Materiales del Departamento de Metalurgia, ubicado en el Instituto Superior Mineros Metalúrgico de Moa. Las técnicas analíticas aplicadas para la caracterización química de las colas se realizaron en el Laboratorio de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba” en Moa, Cuba.

## 2.2. Toma y preparación de la muestra

Para realizar el estudio se tomó una muestra representativa de las colas de la tecnología Carbonato Amoniaco de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para su selección se utilizó el método de redes y puntos, aplicado a un sector de la presa de colas correspondiente al período 1987-1997. Las muestras fueron sometidas a una etapa de secado preliminar en una estufa a la temperatura de 100 °C, para evitar que la humedad provoque el aumento de la fuerza de adhesión mutua de las partículas finas, y lograr una buena homogeneización de la

materia prima por el método del Anillo y el Cono, como se muestra en la figura 3. La masa de cada muestra utilizada en el elutriador se prefijó de 250 g sobre la base de la capacidad del equipo; el pesaje se realizó en una balanza digital. Las clases de tamaño de interés obtenidas, fueron sometidas a un secado térmico igualmente al inicial (100 °C), ya que la humedad del mineral influye negativamente en el proceso de separación magnética por vía seca, debido al fenómeno físico de la adherencia entre las partículas.

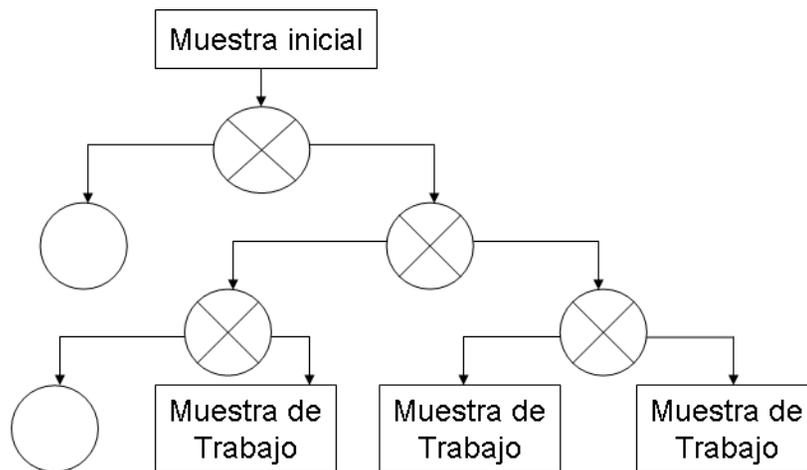


Figura 3. Procedimiento de homogeneización y cuarteo.

### 2.2.1. Características de la materia prima utilizada

El material utilizado es una pulpa de color negro que constituye el desecho de la planta de Lixiviación y Lavado de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, la que se somete a destilación para recuperar el  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  que contiene. Posee una densidad de 1600 a 1700 g/L (Peña, 2011).

El sólido contenido en estas colas está constituido por mineral reducido, cuya densidad real es de 3,80 t/m<sup>3</sup>. Posee un predominio de las partículas finas, ya que el 60 % de ellas está por debajo de los 44  $\mu\text{m}$ ; y una porosidad de 42,50 %, lo que le da la propiedad elevada de susceptibilidad magnética, debido a que la porosidad se logra precisamente en la formación de la Magnetita en los procesos tecnológicos de las Plantas de Reducción y Lixiviación.

La composición química promedio (en %) del material es la siguiente:

Ni = 0,36; Co = 0,09; Fe = 43,09; Cu = 0,01; Zn = 0,03; Mn = 0,64; Mg = 4,06; Cr = 3,04; Al = 8,00 y SiO<sub>2</sub> = 15,82.

Y su composición mineralógica cualitativa y cuantitativa (en %) dadas por Rojas & Turro (2003) está constituida por las siguientes fases:

*Fayalita* [(Fe,Mg)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)] = 11,84; *Maghemita* [σ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] = 37,64; *Cromo-spinelas* [(Mg,Fe)Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] = 6,92; *Magnetita* [Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>] = 42,67 y *Cuarzo* [SiO<sub>2</sub>] = 0,90.

### 2.3. Método de elutriación

El método se basa fundamentalmente en eliminar las partículas microneśimas que poseen las colas, ya que entorpecen el proceso de separación magnética, es decir, tienen la propiedad de adherirse a las partículas con mayor tamaño, que a la postre contaminan el producto final.

La operación se fundamenta en hacer pasar un flujo de agua constante ascendente a través de un tubo cilíndrico vertical por el cual descienden las partículas diseminadas del material (con concentración admisible de 50 g/L); es decir, la integración de las Leyes de Stokes y del Gasto Volumétrico. Para ello tiene que cumplirse que los tiempos de retención del agua y de las partículas cuyo diámetro se desea eliminar se igualen; por lo que para una misma altura del elutriador, la velocidad de sedimentación de las partículas ( $W_p$ ), determinada por la Ley de Stokes (ecuación 2.1), se iguala a la velocidad del agua ( $W_a$ ), dada por la Ley del Gasto Volumétrico (ecuación 2.2).

**Ley de Stokes:**

$$W_p = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_p - \rho_a)}{18 \cdot \mu}; m/s \quad 2.1$$

**Ley del Gasto Volumétrico:**

$$V = W_a \cdot F; m^3/s \quad 2.2$$

donde:

$d$ : diámetro de la partícula, m;

$\rho_p$  y  $\rho_a$ : densidades de las partículas sólidas y del agua,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\mu$ : coeficiente de viscosidad dinámica del agua, Pa·s;

$F$ : superficie por donde se mueve el flujo,  $\text{m}^2$ .

Si se considera que  $W_p = W_a$ , entonces la ecuación para determinar el gasto de agua que debe pasar para arrastrar un tamaño de partícula determinado, se deriva de la integración de las ecuaciones 2.1 y 2.3, como se muestra en la ecuación 2.3.

$$V = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_p - \rho_a)}{18 \cdot \mu} \cdot F \quad 2.3$$

### 2.3.1. Características del elutriador

Para el proceso se utilizó un elutriador criollo ubicado en el Laboratorio de Beneficio del ISMM, con una instalación como la que se muestra en la figura 4. El que posee las siguientes características:

Diámetro: 0,102 m; Alto: 0,8 m; Volumen: 5 L; Concentración de sólido admisible: 50 g/L.

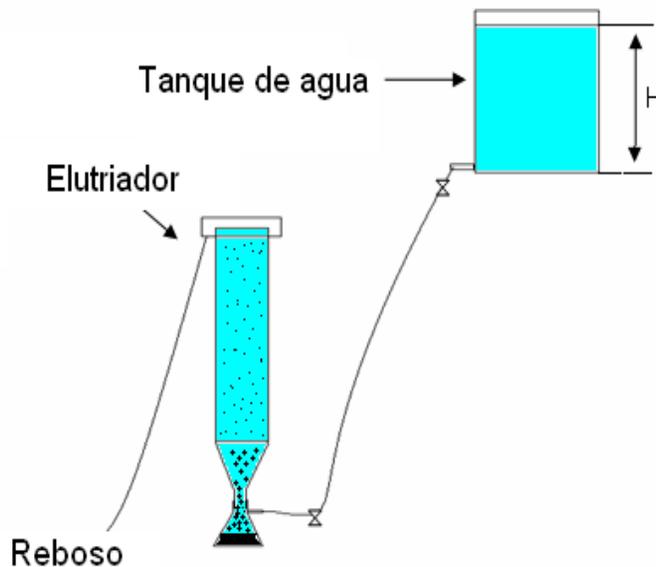


Figura 4. Esquema del proceso de elutriación.

## 2.4. Método de separación granulométrica

Resulta de vital importancia realizar la caracterización granulométrica de las colas, debido a que constituye uno de los eslabones fundamentales en el trabajo; aunque ya ha sido determinada por otros autores, por ejemplo Rojas & Turro (2003).

La separación se realizó por vía húmeda para lograr una mayor efectividad del cribado de las clases estrechas. Primeramente se determinó la composición granulométrica con una serie de tamices seleccionados por la escala de Taylor (resultado de la división del mayor tamaño por la raíz de 2); realizado en el cuarto de preparación de muestras del CEDINIQ, con el uso de una tamizadora digital de laboratorio mostrada en la figura 5. El rango de tamices son los siguientes: 0,200; 0,150; 0,075; 0,053 y 0,038 mm.



Figura 5. Tamizadora digital modelo R.X.-29.

Como segunda operación, y para simplificar la experimentación, se dividió la muestra en tres grupos granulométricos fundamentales, de granulometría fina, media y gruesa. Para ello se seleccionaron los tamices 0,200 y 0,045 mm.

En la figura 6 se muestra el esquema de trabajo utilizado para la separación por grupos de tamaños, a los que se realiza además análisis químico.

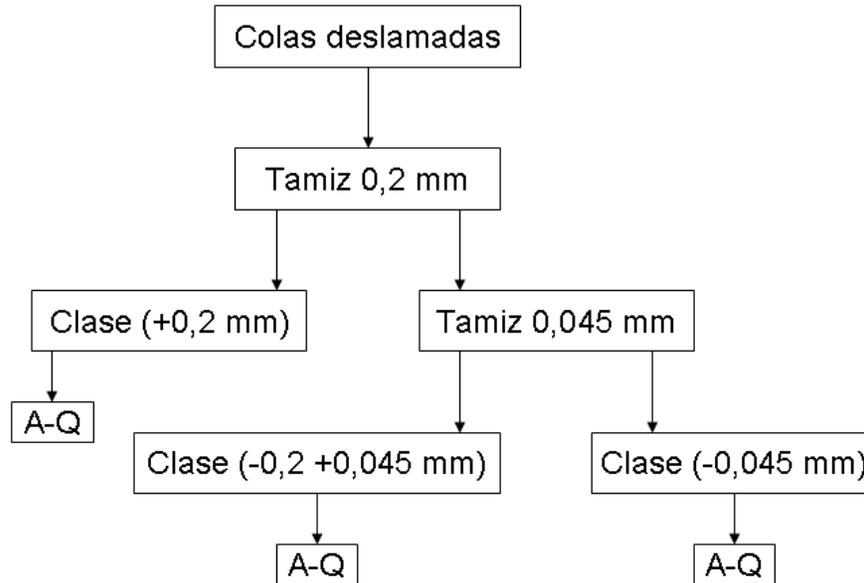


Figura 6. Esquema de flujo para el análisis granulométrico.

## 2.5. Metodología de separación magnética

En el estudio magnético se realizaron varios análisis. Primeramente se determinó la susceptibilidad magnética a las colas iniciales y a cada una de las clases de tamaño, con el objetivo de determinar en que rango de intensidad se debe aplicar el campo magnético. Luego se aplicó la separación magnética a cada clase de tamaño con variación de la intensidad del campo.

### 2.5.1. Susceptibilidad magnética de las colas

La determinación de la susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) por unidad de volumen, es un método sensitivo para detectar la presencia de cantidades traza de material magnético en las rocas y minerales. Tiene relación con el predominio de minerales ferromagnéticos (magnetita o pirrotina monoclinica) (Clark 1999).

El estudio de la susceptibilidad magnética se realizó sobre la base de la clasificación magnética dada por Dercach (1981) en unidades del SI ( $\times 10^{-5}$ ), la que plantea lo siguiente:

$\chi > 3,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$  (necesidad de utilizar una intensidad del campo magnético hasta 120 kA/m); minerales fuertemente magnéticos ó ferromagnéticos.

Entre los límites de  $7,5 \times 10^{-6} \geq \chi \geq 1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$  (necesidad de utilizar una intensidad del campo magnético de 800 a 1600 kA/m); minerales débilmente magnéticos ó paramagnéticos.

$\chi < 1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ ; minerales amagnéticos.

#### 2.5.1.1. Características del equipo de susceptibilidad magnética

La determinación de la susceptibilidad magnética de las colas se realizó con un *Kappameter* digital KT-9 modelo SAIC® Exploranium como el que se muestra en la figura 7.



Figura 7. Equipo de análisis de susceptibilidad magnética.

El equipo se utiliza para la medición de la susceptibilidad magnética real a rocas y minerales en estado sólido, con la posibilidad de conexión a PC a través de software de instalación para su operación remota; posee las siguientes características:

Rango de Medición: desde  $-0,99 \cdot 10^{-3}$  hasta  $999 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ;

Sensibilidad:  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ ;

Fuente de Alimentación: Batería única alcalina de 9 V, IEC Standard, tipo 6F22;

Frecuencia de operación: 10 kHz;

Temperatura de operación: desde  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Longitud: 187 mm;

Diámetro: 65 mm;

Peso: 0,35 kg (incluyendo la batería).

### 2.5.2. Procedimiento de separación magnética

El proceso de separación magnética permite separar partículas fuertemente magnéticas de otras débilmente magnéticas, cuando existe una notable diferencia de la susceptibilidad entre ellas (Dercach 1981). A las colas analizadas se les aplicó el método de separación por vía seca, en un rango de la intensidad de corriente desde 0,05 hasta 0,15 A, con variación en una escala de 0,05 A como se muestra en la figura 8. A cada clase de tamaño, tanto para la muestra original como para las dos réplicas se les aplicó una intensidad del campo magnético de 0,05 A (21,03 kA/m), 0,10 A (40,33 kA/m) y 0,15 A (59,03 kA/m), como resultado se obtienen productos magnéticos (PM) y productos no magnéticos (PNM), a los que se realizó análisis químico.

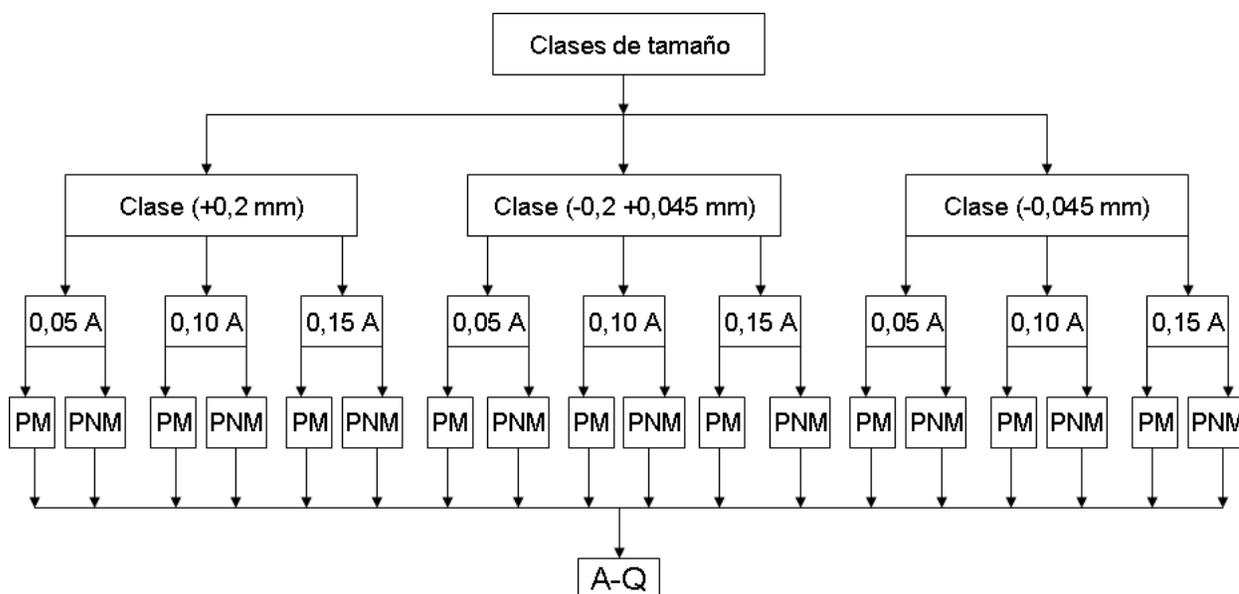
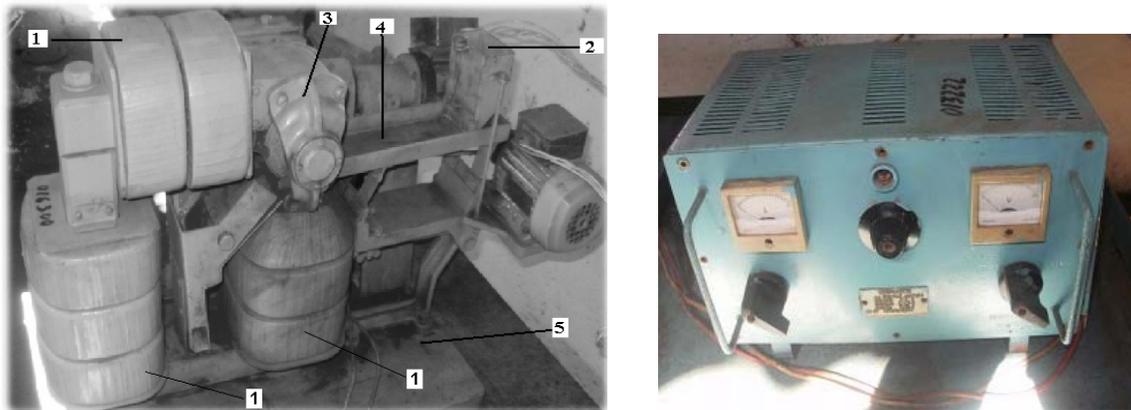


Figura 8. Esquema de flujo para el análisis magnético.

#### 2.5.2.1. Descripción de la instalación para la separación magnética

Para el estudio de la separación magnética de las colas, se utilizó un separador magnético por vía seca modelo ЭБС 138 Т (figura 9a), acoplado a una fuente de

corriente (figura 9b), dicho equipo está instalado en el Laboratorio de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico.



a b  
 Figura 9. Equipamiento de separación magnética.  
 a) separador magnético ЭБС 138 T; b) fuente de corriente

La descripción técnica del equipo se basa en las especificaciones del diseño.

Forma del diseño

El separador ЭБС 138T cuenta con un sistema electromagnético (1), un alimentador (2), un rodillo receptor (3), una canal transportadora vibratoria (4) y una base (5) como se muestra en la figura anterior.

Objetivo y especificaciones.

El separador se utiliza para la separación magnética en seco de minerales con componentes magnéticos y no magnéticos.

PARÁMETROS PRINCIPALES	VALORES
Tamaño máximo del mineral separado, mm,	2,0
Diámetro del rodillo, mm,	100
Longitud del rodillo en operación, mm,	88
Velocidad del rodillo, min <sup>-1</sup> ,	60

Valor de la energía para el motor, kW:

Para el rodillo 0,18

Para el alimentador 0,06

Dimensiones, mm;

Longitud; 1000

Ancho; 480

Alto; 570

Masa, kg; 190

## 2.6. Caracterización química

La caracterización química es de gran importancia, ya que permite determinar la distribución de cada elemento al combinar las dos propiedades físicas (tamaño de partícula y susceptibilidad magnética). Los análisis químicos fueron realizados a las muestras de cabezas, a cada fracción de tamaño derivada del análisis granulométrico, y a los productos obtenidos en la separación magnética. Para ello se empleó el método de fluorescencia de rayos X (FRX).

### ***Fundamentos del método de Fluorescencia de rayos X***

Consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento y la intensidad de la fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento de la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad, y mediante la resolución de un sistema de ecuaciones se calculan las concentraciones de los diferentes elementos en relación a una serie de muestras patrones con las cuales inicialmente se calibró el equipo.

Las mediciones fueron realizadas en un difractor de rayos X marca Phillips PW, ubicado en el laboratorio analítico de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba”.

## 2.7. Otros equipos utilizados en la investigación

A continuación se muestra la descripción de otros equipos auxiliares y el fundamento de su utilización.

### Estufa

El secado de las muestras iniciales y de cada una de las clases de tamaño obtenidas, se realizó en una estufa de control digital modelo DH6-9146A, ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico del ISMM, la misma se muestra en la figura 10.



Figura 10. Estufa utilizada para el secado de las muestras.

### Balanza

Como técnica para contabilizar la cantidad de material inicial y los productos obtenidos, se utilizó una balanza digital modelo Sartorius BS 124S mostrada en la figura 11, con una capacidad máxima de 120 g y una desviación de 1 mg.



Figura 11. Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.

### **Conclusiones parciales**

- ✓ La muestra de colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” seleccionada para el estudio se considera representativa con respecto a su volumen total.
- ✓ Las técnicas analíticas empleadas fueron aplicadas en instalaciones y equipos que garantizan la confiabilidad de los resultados.

**CAPÍTULO 3.**  
**ANÁLISIS Y**  
**DISCUSIÓN DE LOS**  
**RESULTADOS**

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

En el estudio de las colas del proceso Carbonato Amoniacal de Moa, reviste gran importancia la aplicación de los métodos de beneficio, debido a que aportaría la información necesaria sobre el comportamiento de los diferentes elementos, en este caso cuando se aplica la intensidad de un campo magnético variable; y con ello la definición para su posible aprovechamiento.

### **3.1. Características de las colas**

Se realizó sobre la base de tres propiedades fundamentales: composición química, composición granulométrica y susceptibilidad magnética; las que permiten valorar los procedimientos y alternativas tecnológicas para su tratamiento. A continuación se detallan los resultados obtenidos experimentalmente.

#### **3.1.1. Análisis químico**

Como en toda investigación metalúrgica, se debe tener conocimiento de las características químicas del material objeto de estudio, para evaluar cualitativa y cuantitativamente su comportamiento ante un proceso determinado. Por lo que surge la necesidad de realizar análisis químico a las colas estudiadas, que luego reflejará en los posteriores procesos de beneficio el comportamiento de cada elemento contenido en el material. El análisis químico fue realizado por Fluorescencia de Rayos X, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química inicial de las colas.

<b>Elementos</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Fe</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>
Contenido, %	0,35	0,06	43,59	3,55	0,64	5,39	2,84	0,02	0,01	9,99

En la tabla se observa que los elementos metálicos que aparecen en mayores cantidades son: Fe, SiO<sub>2</sub>, Al, Mg, Cr, y en menor cuantía Mn, Ni, Co, Zn, y Cu; resultados similares fueron obtenidos en las investigaciones de Rojas & Turro (2003), Hernández (2011) y Peña (2011). En tal sentido, se puede considerar las colas como un mineral de hierro que contiene más del 40 % de dicho elemento; por tanto es una reserva potencial para los productores de acero. De igual manera contienen cantidades apreciables de níquel y cobalto, dado por la ineficiencia tecnológica de la planta que los procesan; lo que deja una brecha a estudiar para su posible recuperación.

### 3.1.2. Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la tabla 5, donde se aprecia que la clase menor de 0,038 mm representa más del 50 % de la masa total del sólido.

Tabla 5. Composición granulométrica de las colas.

<b>Clases de tamaño, mm</b>	<b>Masa, g</b>	<b>Salida, %</b>	<b>Salida acumulativa según cernido, %</b>
+0,200	67,09	13,41	100,00
-0,200 +0,150	20,47	4,09	86,59
-0,150 +0,075	30,84	6,17	82,50
-0,075 +0,053	49,52	9,90	76,33
-0,053 +0,038	76,67	15,35	66,43
-0,038	255,41	51,08	51,08
Total	500,00	100,00	-

Como se observa en el análisis granulométrico, la salida de la clase -0,075 mm representa el 76,33 % de todo el material, lo que evidencia también una distribución de las partículas finas en todo el espectro granulométrico de las colas estudiadas; tal aspecto corrobora los resultados alcanzados por Turro (2002), Hernández (2011) y Peña (2011).

En correspondencia con las salidas acumulativas de la tabla 5, se confeccionó la figura 13, en la que se refleja la distribución de tamaño según cernido; además se puede apreciar que el diámetro por donde pasa el 80 % del material ( $D_{80}$ ) coincide con el tamaño de las partículas 0,12 mm.

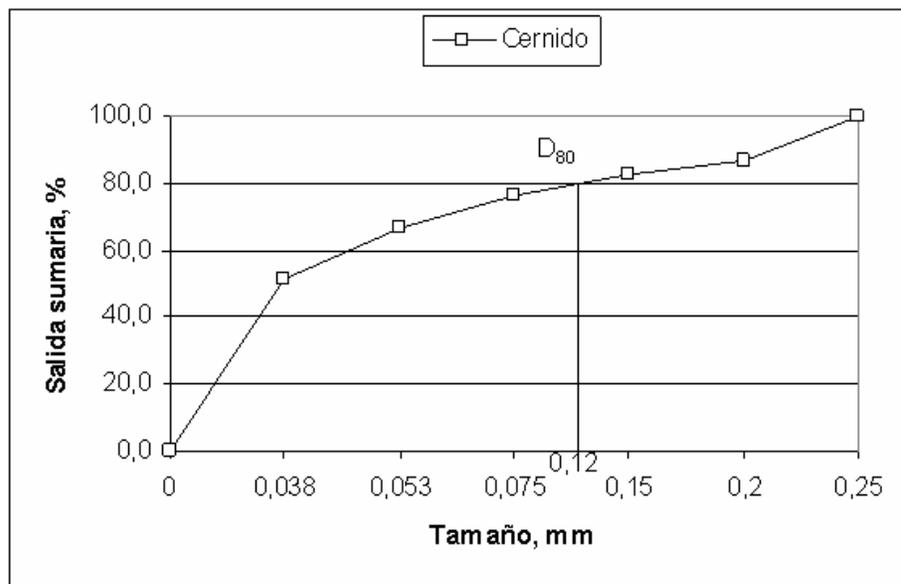


Figura 13. Característica de tamaño acumulativa según el cernido.

El comportamiento de la distribución de tamaño fina, se debe a que el mineral se somete a una molienda intensa en la tecnología hasta garantizar que el 80 % del material sea menor que 0,075 mm, para facilitar las reacciones químicas que se llevan a cabo en los procesos siguientes.

A partir de la distribución de tamaño analizada, se decidió dividir las muestras de colas en tres clases: gruesa (+0,2 mm), media (-0,2 +0,045 mm) y fina (-0,045 mm), para realizar la separación magnética. De manera tal que se pueda analizar la influencia del campo magnético en diferentes grupos granulométricos.

### **3.2. Operación de elutriación**

Como resultado del análisis granulométrico, se pudo concluir que las colas tienen en su composición un elevado contenido de partículas ultrafinas, dentro de las que se encuentran las denominadas lamas; las que entorpecen el proceso de separación magnética, debido a que se adhieren a las de mayor tamaño, independientemente de sus características magnéticas; de manera tal que pueden afectar los resultados finales.

De acuerdo a lo planteado por Dercach (1981), para favorecer el enriquecimiento de los productos de la separación magnética, es necesario eliminar las lamas presentes en los materiales; es por ello que se aplicó tal operación inicial a las colas. En el que se hizo pasar un flujo de agua ascendente con un gasto de 69,79 mL/min (obtenido con el uso de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3), con el propósito de eliminar las partículas menores de 10  $\mu\text{m}$ . Para el cálculo se tuvieron en cuenta una serie de datos que se muestran a continuación:

densidad y viscosidad del agua a 28 °C = 996,40  $\text{kg/m}^3$  y  $843,20 \cdot 10^{-6}$  Pa·s respectivamente (Pavlov 1981);

densidad media del sólido = 3200  $\text{kg/m}^3$  (Peña 2011);

diámetro del elutriador = 0,102 m.

Como resultado, se logró separar el 9,66 % del material, sin considerar el error que pudo haberse cometido al trabajar con una densidad media de las partículas; el resultado confirma que el material está constituido por partículas muy finas, que severamente entorpecen el proceso de separación magnética.

### **3.3. Análisis de la separación granulométrica**

#### **3.3.1. Análisis de la salida según el tamaño de las partículas**

Después de definir los grupos granulométricos a realizarles la separación magnética, y haber eliminado aproximadamente el 10 % de su masa total con la elutriación, se

determinó la cantidad que representa cada fracción, que permite contabilizar los productos magnéticos y no magnéticos.

En la figura 14 se observa que las partículas finas con respecto a la masa producto de la elutriación representan un 50,20 %, las medias un 35,53 % y las gruesas un 14,27 %, dichos grupos fueron sometidos a la separación magnética.

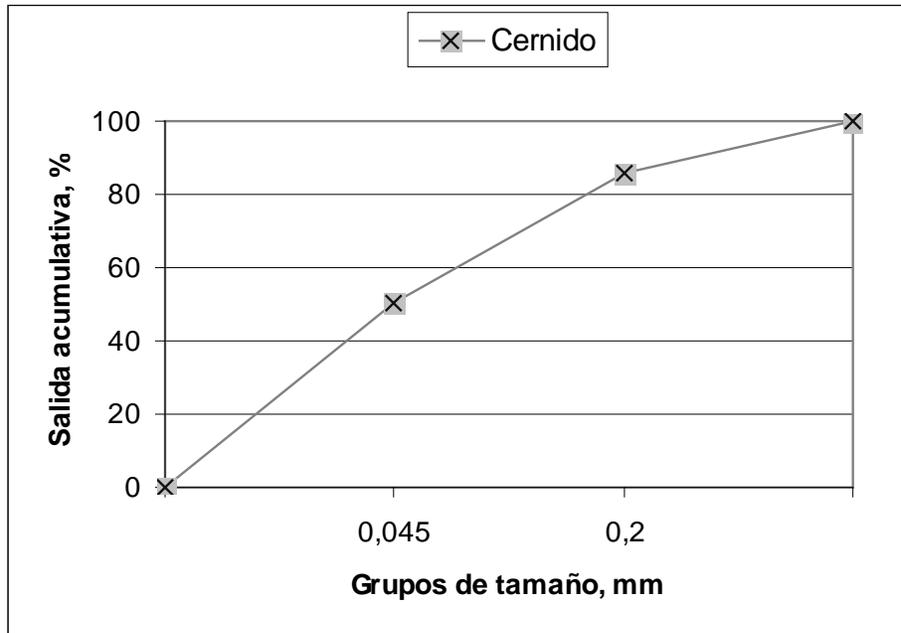


Figura 14. Contenidos de los grupos de tamaño según el cernido.

### 3.3.2. Análisis de contenidos según el tamaño de partículas

La figura 15 muestra la distribución del hierro, en la que se observa la tendencia a concentrarse en la menor clase de tamaño con promedio de 50,84 %, con una diferencia de más de 5 % con respecto a las clases media y gruesa. Dicho comportamiento se puede atribuir a que en los minerales que dan origen a estas colas, el hierro está en su mayor concentración en las limonitas (grupo de mena fundamental), principalmente como fase de goethita que puede llegar hasta un 69 % (Laverov 1985, Ostroumov *et al.* 1987, Rojas 2001, entre otros), y su relación con respecto a la serpentina (el otro grupo de mena) es de 3 partes por 1 del último; a ello se le suma con mayor influencia la mejor movilidad del primer grupo con respecto al segundo (Coello *et al.* 2008).

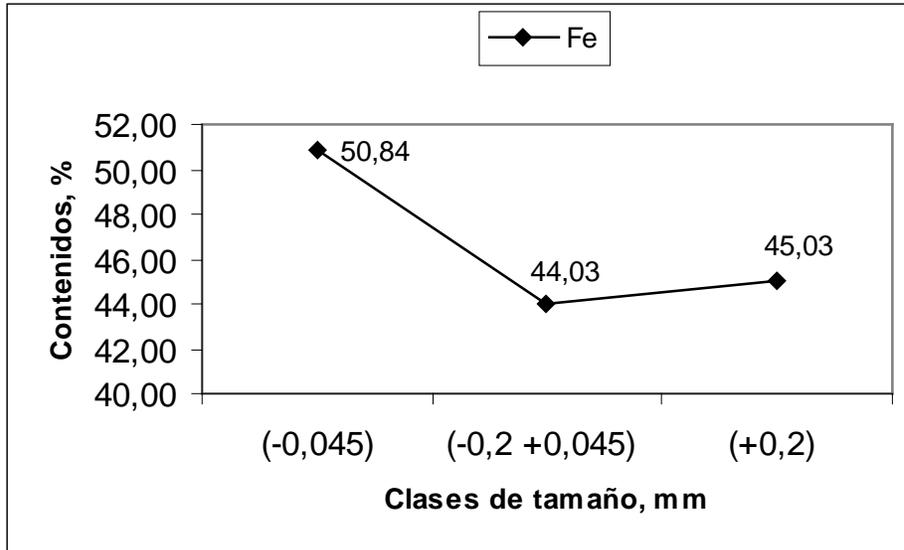


Figura 15. Contenidos de hierro por fracción granulométrica.

El níquel presenta un comportamiento contrario al hierro, en el que se observa una tendencia a incrementar su contenido hacia las clases media y gruesa, como se muestra en la figura 16.

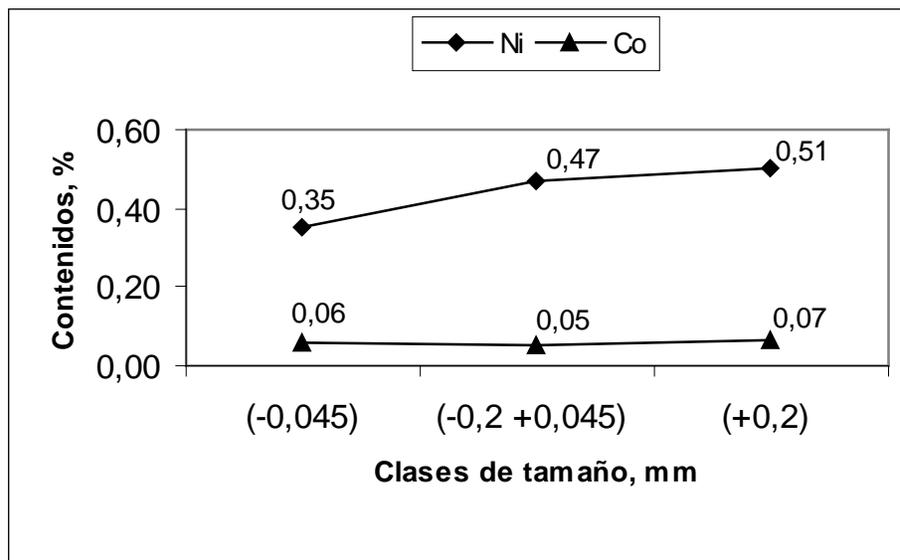


Figura 16. Contenidos de níquel y cobalto por fracción granulométrica.

En la figura se observa que el níquel alcanza su máximo contenido de 0,51 % en la fracción más gruesa, mientras que en la más fina es de 0,35 %. Si se parte del análisis de la movilidad de los minerales limonita y serpentina, parte del níquel

presente en la serpentina no logró reducirse, ya que como está presente en un grano de mayor tamaño (Coello *et al.* 2008), la transformación físico-química en el horno de reducción no se pudo concretar completamente, debido a las condiciones tecnológicas de operaciones, el empeoramiento del proceso de difusión del reactivo y el tiempo de retención insuficiente para que ocurra la descomposición total del mineral en el rango de temperaturas del horno (Chang 1999). El cobalto por su parte posee un comportamiento estable entre 0,05 y 0,07 %, con su mayor contenido en la clase de tamaño gruesa.

El silicio y el magnesio poseen la misma tendencia que el níquel (figura 17) a incrementarse hacia las fracciones gruesas, con una disminución de su contenido en la medida que se reduce el tamaño de las partículas; lo que confirma la hipótesis de que el níquel concentrado en la clase mayor, está asociado a los minerales silicatados de magnesio (serpentiníticos) que prácticamente no sufrieron transformación en el proceso tecnológico por su pequeña superficie de contacto.

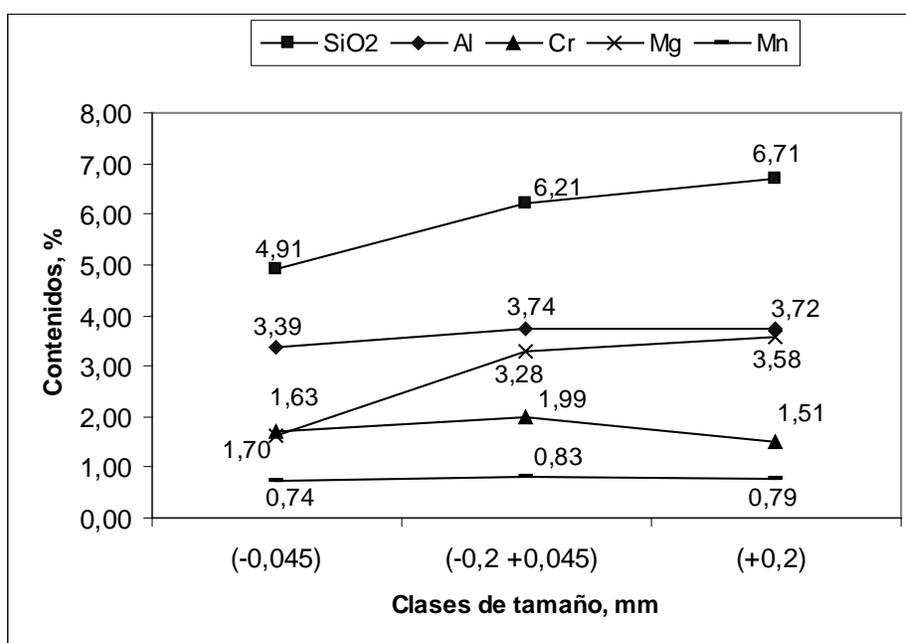


Figura 17. Contenidos de SiO<sub>2</sub>, Al, Cr, Mg y Mn por fracción granulométrica.

El aluminio, cromo y manganeso se comportan de forma homogénea en el espectro granulométrico analizado como se observa en la figura 17, aunque se concentran en

mayor proporción en la clase media, donde se manifiesta una ligera tendencia a disminuir su contenido en la fracción más fina, lo cual corrobora los resultados obtenidos por Peña (2011).

En la figura 18 se observa el comportamiento del cinc y el cobre en los tres grupos granulométricos. En la que se observa una tendencia al incremento del contenido de cobre con el aumento de las clases de tamaño, hasta lograr concentraciones de 0,058 %. El cinc por su parte tiende a concentrarse en la clase intermedia.

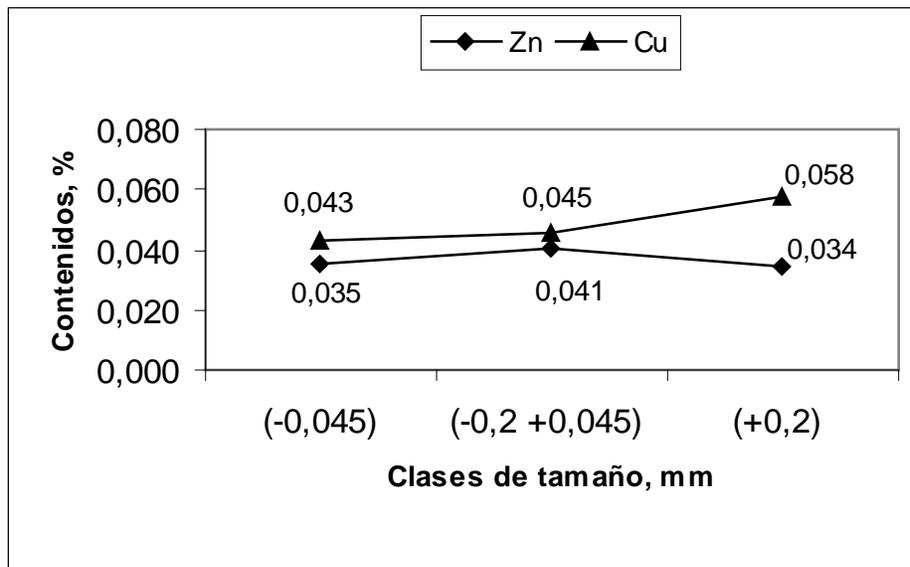


Figura 18. Contenidos de Zn y Cu por fracción granulométrica.

A modo de resumen, con la separación por tamaño se puede concentrar el hierro en la menor clase hasta 50,84 %, y el níquel en la mayor hasta 0,51 %.

### 3.4. Análisis del comportamiento magnético

Al analizar la composición química de las colas, se pudo considerar este residuo como un mineral de hierro que necesita beneficiarse con vista a ser utilizado. Para ello, se realizó una separación magnética a cada grupo de tamaño definido y con la variación de la intensidad del campo, con vista a conocer el comportamiento de los elementos metálicos presentes.

### 3.4.1. Resultados de la susceptibilidad magnética

Después de determinar la susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) a las muestras de colas y a cada uno de los grupos granulométricos estudiados, se definió la intensidad del campo magnético al que se debe someter el material. Como resultado del ensayo, se pudo observar que las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” posee una susceptibilidad magnética de  $59 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ , cuyo valor significa que se encuentran dentro de los materiales “ferromagnéticos” (Dercach 1981). Su valor varía cuando se analiza por clases de tamaño (figura 19), con un incremento hacia las fracciones más finas; lo que se debe a que el hierro como elemento definitorio de la propiedad física analizada se concentra hacia las clases de menor tamaño (ver figura 15).

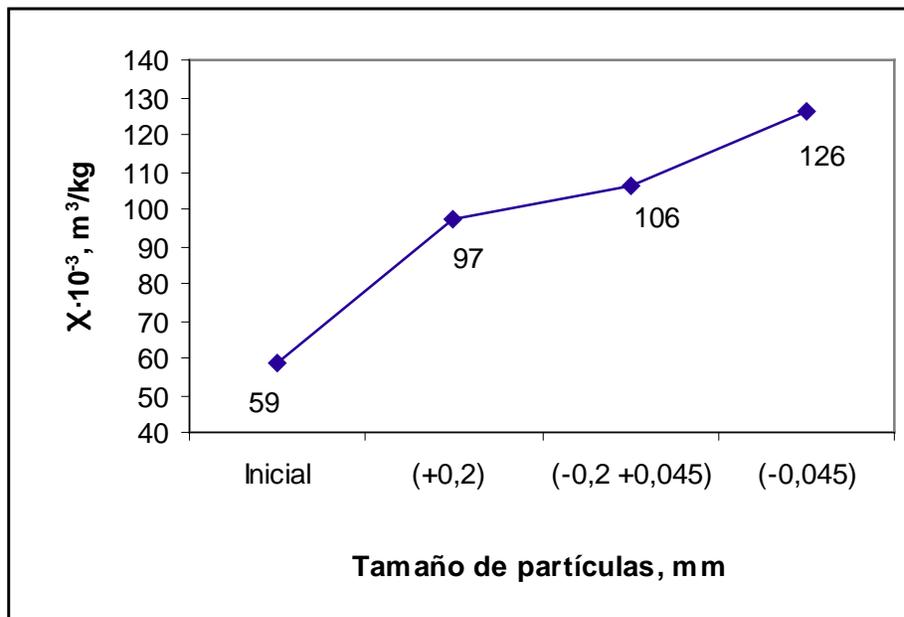


Figura 19. Susceptibilidad magnética de las colas.

Se puede concluir que la separación magnética a las colas debe realizarse a baja intensidad del campo, hasta 120 kA/m, que es lo establecido para los materiales fuertemente magnéticos (Dercach 1981).

### 3.4.2. Resultados de la separación magnética

Para conocer el comportamiento magnético de las colas, se alimentaron al separador muestras de 120 g de cada grupo de tamaño (+0,2; -0,2 +0,045 y -0,045 mm) y a cada intensidad del campo (0,05; 0,10 y 0,15 A) según el esquema de la figura 8. Como resultado se obtuvieron productos magnéticos y no magnéticos, a los que se les realizó análisis químico.

En la figura 20 se observa el comportamiento del níquel, magnesio y silicio en los productos magnéticos y no magnéticos. El resultado obtenido refleja una tendencia a concentrarlos en el producto no magnético a medida que se incrementa el tamaño de las partículas (ver valores en el anexo 1), con una insignificante influencia del campo magnético creado; ya que para cada clase de tamaño y con el incremento del campo, los contenidos de los elementos de la figura solo varían de forma inapreciable. En la menor clase de tamaño, existe un comportamiento casi constante, tanto para los PM como para los PNM; como son partículas muy finas, durante el proceso de separación magnética seca aparece la adhesión de unas sobre las otras, con la formación de cadenas colgantes constituidas tanto por partículas magnéticas como no magnéticas (floculación magnética), que a la postre pueden alojarse en el PM o en el PNM (Dercach 1981): en la clase se obtienen promedios de 0,35 % para el níquel, 1,13 % para el magnesio y 5,01 % para el silicio.

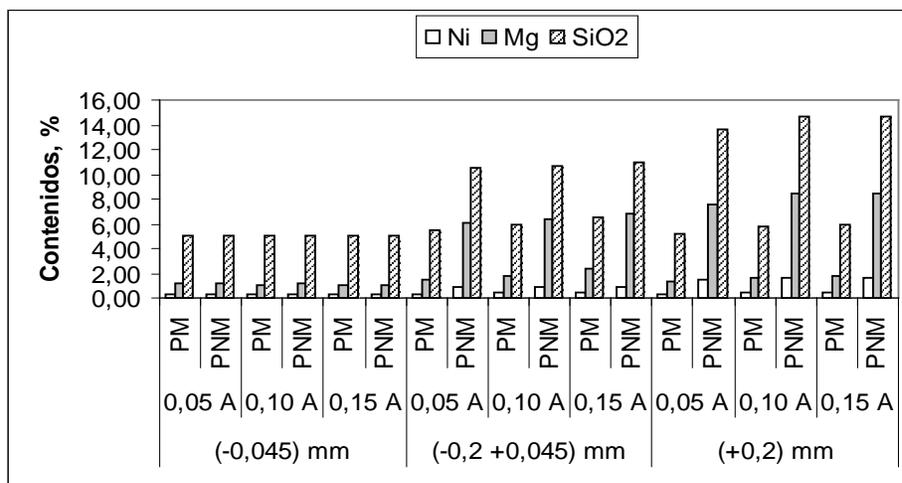


Figura 20. Comportamiento del níquel, magnesio y silicio en la separación magnética.

A partir de la clase media se observa una notable tendencia a la concentración de los metales, lo que se muestra más intenso para la clase gruesa. Tal comportamiento guarda relación con lo analizado en el acápite 3.3.2.

El níquel por ejemplo llega a concentrarse hasta 0,87 % como promedio en el PNM de la clase media, con una insignificante influencia de la variación de la intensidad del campo. Para la clase gruesa su concentración es mayor, hasta valores por encima de 1,50 %, en la que si hay una influencia considerable de la intensidad del campo a medida que se incrementa, hasta alcanzar valores de 1,64 % para 0,15 A.

Desde el punto de vista mineralógico, el níquel también está presente en la serpentina, la que en el proceso de molienda queda con mayor tamaño y por tanto no logra su transformación físico-química total en la reducción, lo que ocasiona pérdidas que a la postre se depositan como colas. Además en la descomposición térmica de la serpentina se forman compuestos amorfos  $[Mg_2(Si_2O_6)]$ , en cuyo interior queda atrapado el níquel, y no es posible su recuperación (Chang 1999). Por cuanto la susceptibilidad magnética de estos minerales es pequeña, entonces su concentración es hacia el PNM.

Por tanto, si se desea recuperar el níquel presente en las colas, entonces es recomendable utilizar un tamiz de 0,045 mm, con el cual se obtiene una clase por encima de este tamaño con un rendimiento de 49,80 %, y puede lograrse la obtención de contenidos del metal con especificaciones industriales de 1,23 % de Ni.

Por su parte, el hierro manifiesta un comportamiento contrario al níquel, magnesio y silicio. En la figura 21 se observa como se concentra en los productos de las menores clases de tamaño; también guarda relación con el análisis del acápite 3.3.2, ya que su predominio es en las partículas finas.

Al aplicar el campo magnético a las clases intermedia y gruesa, se refleja que para una intensidad de corriente de 0,05 A se puede obtener más de 50 % de hierro, con una disminución hacia los campos mayores (anexo 1); significa que como el hierro posee una elevada susceptibilidad magnética, necesita pequeños campos para su separación; por consiguiente si se incrementa el campo, entonces pueden ser

arrastradas otras partículas con menor susceptibilidad, lo que reduce la concentración del hierro en el producto magnético. Por tanto, para estas clases basta con aplicar un campo de 0,05 A para lograr las mayores concentraciones del hierro.

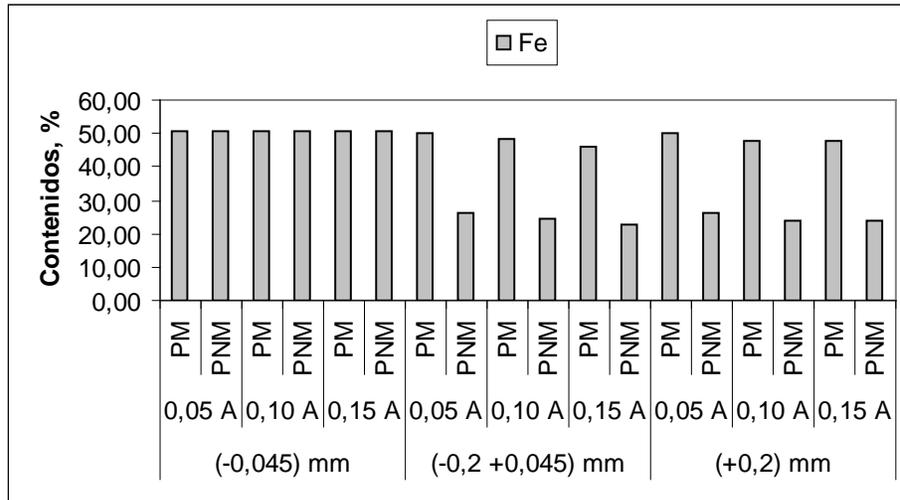


Figura 21. Comportamiento del hierro en la separación magnética.

Un comportamiento estable se manifiesta en la menor clase de tamaño, en la que se obtiene como promedio 50,83 % de hierro entre los PM y los PNM; lo que tiene su explicación en el fenómeno de floculación magnética al igual que el níquel, silicio y magnesio.

Como resultado, es afirmativo que el hierro puede ser concentrado por encima de 50 % en el producto magnético de las clases media y gruesa, solo con la aplicación de un campo magnético de 0,05 A. Sin embargo, en las partículas finas no es posible incrementar su concentración por el método de separación magnética por vía seca, ya que se obtienen concentraciones parecidas a las iniciales para la clase en cuestión.

Por su parte el cobalto y manganeso manifiestan un comportamiento similar, debido a que precisamente las asbolanas (fase principal de manganeso) es la principal portadora de cobalto. Por cuanto la recuperación del cobalto en la tecnología no supera el 40 %, entonces gran parte ha quedado enredado en la red cristalina de la fase de manganeso.

Al igual que los demás elementos analizados, para la clase -0,045 mm existe un comportamiento prácticamente invariable, con promedios para el cobalto y manganeso de 0,06 y 0,75 % respectivamente (figura 22); también se relaciona con el fenómeno de floculación magnética. Ya para las clases media y gruesa se nota una irregularidad, en la que los dos se concentran en todos los PM, con su mayor contenido en la clase +0,2 mm e intensidad de corriente de 0,1 A, con valores de 0,08 % de cobalto y 1,03 % de manganeso.

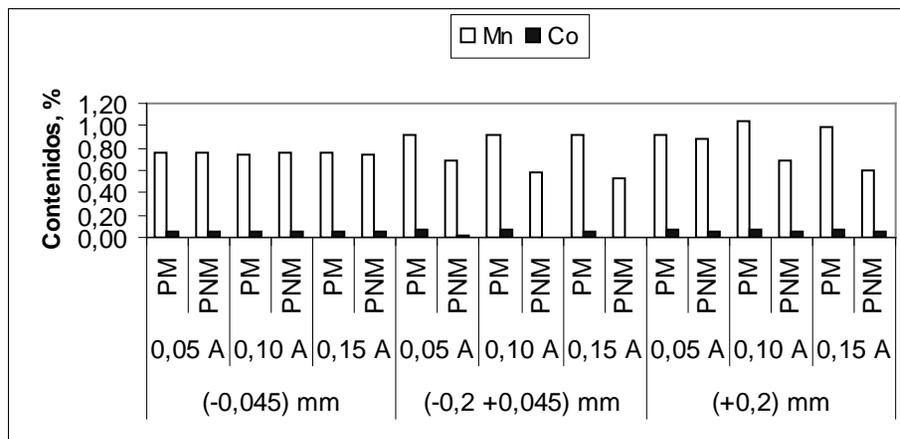


Figura 22. Comportamiento del cobalto y manganeso en la separación magnética.

El cromo y aluminio manifiestan una tendencia a concentrarse en los productos no magnéticos (dado por su baja susceptibilidad magnética) de la clase de tamaño intermedia (figura 23), en la que sus mayores contenidos de 4,84 y 5,08 % respectivamente, se obtienen cuando se aplica la mayor intensidad del campo. Se puede resaltar que el cromo se enriquece en un 2 % con respecto a su concentración en las colas iniciales.

En la clase -0,045 mm existe un comportamiento prácticamente invariable, que se corresponde con lo analizado anteriormente, con promedios para el cromo de 1,74 % y para el aluminio de 3,42 %.

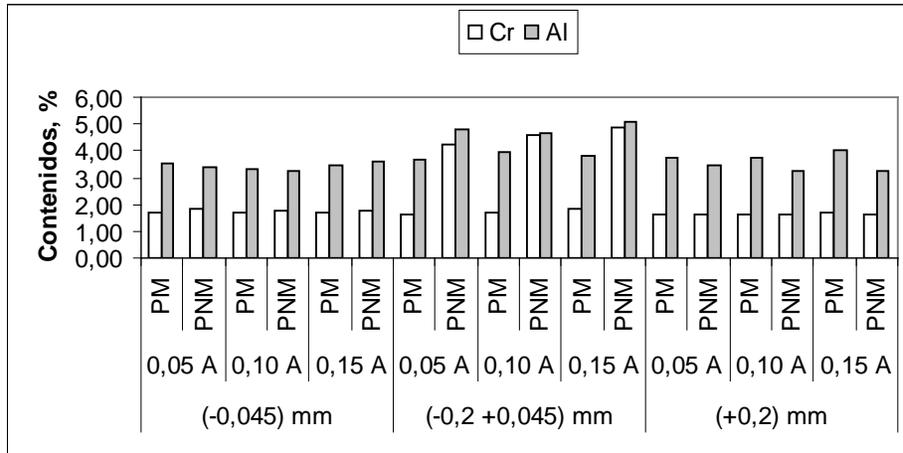


Figura 23. Comportamiento del cromo y aluminio en la separación magnética.

Una importancia especial debe prestársele al cinc, ya que su concentración original en las colas es de 0,02 %, sin embargo, después de aplicar los métodos de beneficio utilizados se logra concentrar hasta 0,13 % en el PNM de la clase media a partir de 0,1 A como se muestra en la figura 24.

Por su parte el cobre adquiere su mayor concentración en el PNM de la clase gruesa, también a 0,15 A. Ambos elementos muestran una tendencia a enriquecerse con el aumento de la intensidad del campo, en la clase media el cinc y en la gruesa el cobre, el último con su máximo contenido de 0,07 %. Sus comportamientos en la menor clase de tamaño, es análogo a la del resto de los elementos analizados.

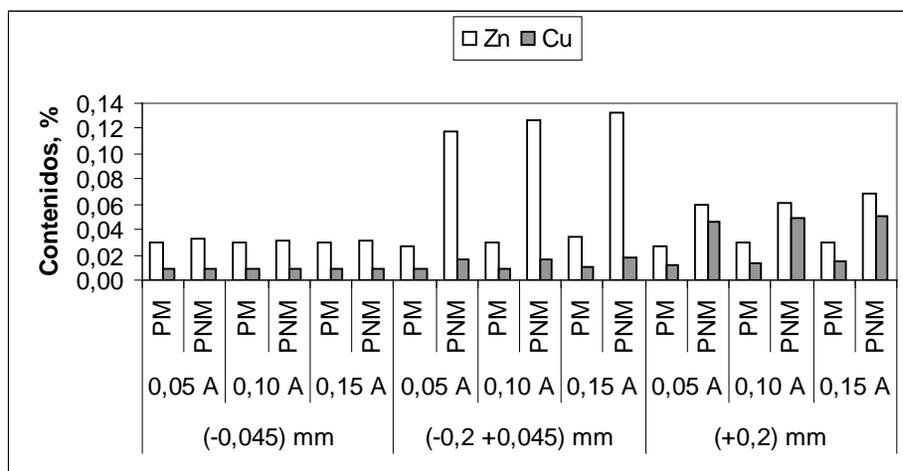


Figura 24. Comportamiento del cinc y el cobre en la separación magnética.

Se puede resumir que la aplicación de un campo magnético variable a las clases de tamaños media y gruesa, influye sobre la concentración de los elementos que las constituyen en diferentes productos (magnético o no magnético); no siendo así para la menor granulometría analizada.

### 3.5. Análisis de las salidas según los campos magnéticos aplicados

Gran importancia reviste el conocimiento de las salidas en la separación magnética, ya que permite visualizar la objetividad del aprovechamiento de cualquiera de los productos. En la figura 25 se observa una tendencia a aumentar la masa de los productos magnéticos, y a disminuir la de los no magnéticos en la medida que se incrementa la intensidad del campo en cada clase de tamaño.

Como se observa en la figura, existe un predominio del producto magnético, el que constituye un alto porcentaje con respecto a la masa inicial; de la misma manera, la fracción no magnética representa un porcentaje más bajo, lo que da la medida de la elevada cantidad de hierro que está presente en cada clase de tamaño, que por consiguiente eleva la susceptibilidad magnética de las muestras. La diferencia de las salidas entre cada clase de tamaño, tiene que ver fundamentalmente con la variación del contenido de hierro, ver figura 15.

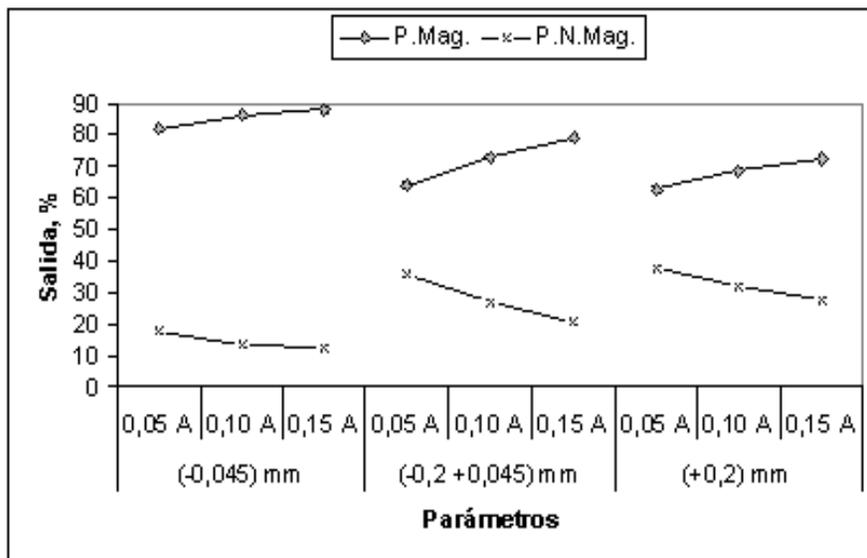


Figura 25. Comportamiento de las salidas según la variación de la intensidad del campo magnético.

El comportamiento es más acentuado en la clase de tamaño fina, en el que disminuye desde 18 % para 0,05 A hasta 12 % para 0,15 A en el producto no magnético (ver valores en el anexo 2); esto significa que la aplicación de un campo magnético a dicha clase pudiera ser no viable técnicamente; más aún si el comportamiento de la mayoría de los metales es parecido para cada salida; por ejemplo el hierro, mantiene concentraciones entre 50 y 51 % tanto para los productos magnéticos como no magnéticos, además su concentración inicial en la clase de tamaño es de 50,84 %. Tales resultados concuerdan con los mostrados por Dercach (1981), “los que reflejan que en el enriquecimiento de la magnetita, en las clases menores de 30  $\mu\text{m}$  se incrementa la salida magnética con respecto a otras clases, pero el contenido de hierro disminuye debido a la formación de flóculos magnéticos que arrastran partículas no magnéticas”; es decir, para dicho tamaño de partículas no es viable su beneficio por separación magnética.

Una particular importancia debe prestárseles a los productos no magnéticos de las clases media y gruesa, debido a que en ellos se manifiesta una elevada concentración del níquel para cualquier intensidad del campo; por tanto, su estudio reviste un interés particular con vista a su posible aprovechamiento; más aún cuando en dichos productos, las salidas representan más del 21 % y hasta 36 % y 28 % y hasta 38 % para 0,15 y 0,05 A en las clases media y gruesa respectivamente.

En el caso del hierro, si se analizan las figura 21 y 25, y el anexo 1, se puede concluir que a medida que aumenta la intensidad del campo magnético en las clases gruesa y media, aumenta la masa en las fracciones magnéticas, pero disminuye el contenido de hierro, debido a que también para esos productos pasan materiales no magnéticos; por tanto, para concentrar el hierro hasta 50 % se debe aplicar una intensidad del campo de 0,05 A a las clases media y gruesa, las que representan una salida de 36 y 38 % respectivamente.

### **3.6. Propuesta de un esquema para el tratamiento de las colas**

Una vez terminado el estudio magnético a las tres clases de tamaño de las colas, y analizado el comportamiento de los elementos en cada uno de los productos, se llegó a la conclusión que es posible concentrar el níquel con promedio de 1,23 % en

el producto no magnético de la clase de tamaño mayor de 0,045 mm, lo que se logra si se aplica un campo de 0,10 A. En la figura 26 se muestra el flujo tecnológico propuesto.

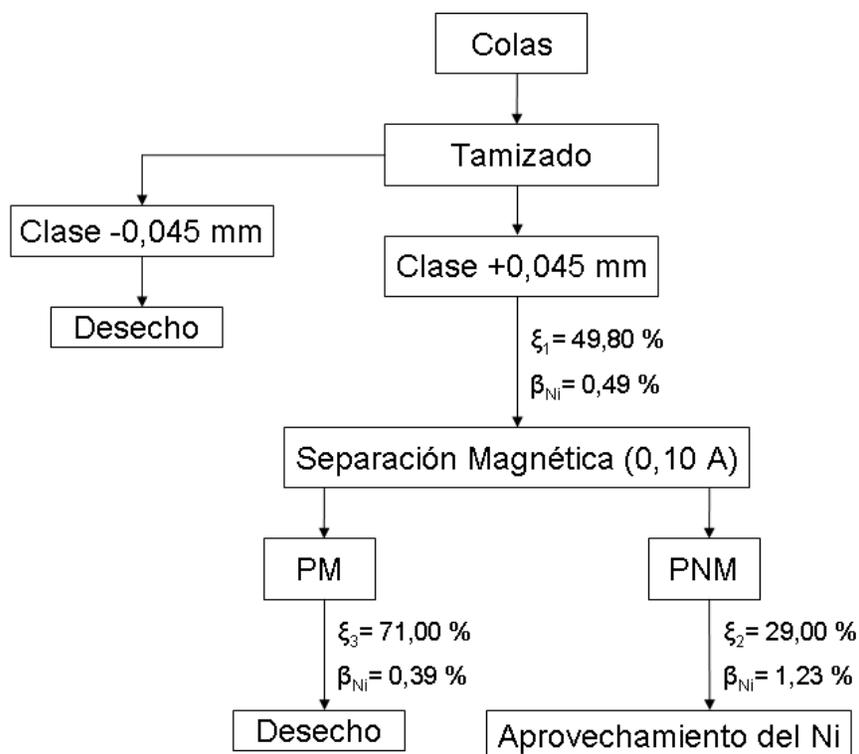


Figura 26. Esquema propuesto para el aprovechamiento del níquel.

En la figura se observa que las colas se somete primeramente a un tamizado en un tamiz de 0,045 mm, cuya clase mayor representa una salida ( $\xi_1$ ) del 49,80 %, en la que se ve un incremento en el contenido de níquel con respecto al inicial desde 0,35 % hasta 0,49 %. Posteriormente a la clase +0,045 mm se le aplica un campo magnético de 0,10 A, en la que el producto no magnético representa una salida ( $\xi_2$ ) de 29,00 %, con contenido de níquel de 1,23 %, apto para ser aprovechado por la tecnología.

Una particularidad de la propuesta con respecto a lo realizado en el trabajo, es que no es necesario aplicar el proceso de elutriación como operación inicial, ya que la clase de tamaño fina no puede ser sometida a la separación magnética, por lo que representa un desecho.

Como propuesta tecnológica, se considera que el producto final puede sustituir parcialmente al material alimentado a la planta de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” antes de la operación de molienda; y de esta forma se logra un mejor aprovechamiento de los recursos naturales. De manera tal que el 13,04 % de las colas puede ser realimentada al proceso tecnológico para recuperar el níquel, con lo que se reduciría el porcentaje de mineral serpentinitico (ya que se considera que el níquel pertenece a dichos minerales) extraído de la mina, y se incrementa el tiempo de explotación de tales yacimientos.

### **3.7. Análisis preliminar del impacto ambiental**

La planta de níquel de Punta Gorda “Comandante Ernesto Che Guevara”, durante más de dos décadas de explotación ha provocado un gran impacto sobre el medio ambiente. Desde sus inicios ha impescindido de un elevado consumo de energía y de reactivos, que en el transcurso del proceso generan gases y residuos sólidos, los que afectan directamente al medio ambiente.

Uno de los desechos generados que afectan al medio ambiente son las denominadas colas. Las que constituyen un permanente foco de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, con el incremento de la concentración de una serie de elementos por encima de los valores admisibles para el agua potable, los suelos y el aire, en el que resulta ser el hombre su mayor receptor. Tales residuos se agigantan cada día con el avance de la explotación de los yacimientos.

El estudio realizado ha demostrado la posibilidad de proponer vías para recuperar algunos elementos. Pudo constatarse que a partir de la separación magnética se puede concentrar, por ejemplo: el níquel en el producto no magnético de las clases de tamaño media y gruesa, y el hierro también para estas clases de tamaño en el producto magnético.

Si se analiza en la propuesta hecha para la recuperación del níquel, figura 26, el producto no magnético pudiera reincorporarse al proceso tecnológico para la recuperación y aprovechamiento del metal. Tal aprovechamiento reduciría el impacto

ambiental en el área del depósito de colas, ya que se reduciría el volumen del material depositado.

Por otro lado, si se realimenta al proceso tecnológico el producto donde se concentra el níquel, que representa el 13,04 % del total de colas, se reduce la masa alimentada desde la mina, con la consiguiente disminución del impacto ambiental en el laboreo minero; además contribuye al uso racional de los recursos naturales.

### **Conclusiones parciales**

- ✓ El valor de la susceptibilidad magnética de las colas se incrementa con la disminución del tamaño de las partículas, y en todos los casos se confirma el carácter ferromagnético.
- ✓ Se comprobó que predominan las partículas finas, representadas por el 76,33 % las menores de 0,075 mm.
- ✓ La separación magnética manifiesta un comportamiento uniforme de todos los elementos para cualquier intensidad del campo en la clase de tamaño fina, tanto en los PM como en los PNM. En la clase media se concentran el Ni, Cr, Al y Zn en los PNM para 0,15 A, con valores de 0,88; 4,84; 5,08 y 0,13 % respectivamente. En la clase gruesa se evidencia la mayor concentración del Ni, Mg, SiO<sub>2</sub> y Cu en los PNM, con un ligero incremento con la intensidad del campo, y sus mayores valores de 1,64; 8,43; 14,72 y 0,05 % respectivamente. El hierro se concentra en el producto magnético a 0,05 A en las clases media y gruesa con valores en el orden del 50 %.
- ✓ Se demostró que es posible concentrar el níquel hasta 1,23 % en el PNM de la clase de tamaño +0,045 mm a partir de un esquema propuesto.

# **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

Las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se comportan de la manera siguiente:

- ✓ Granulométricamente predominan las partículas finas menores de 0,045 mm (50,20 %), donde se concentra el hierro hasta 50,84 %; en las medias se concentran el Al, Cr, Mn y Zn; y en las gruesas el Ni, Co, Mg, Cu y SiO<sub>2</sub>.
- ✓ Son minerales ferromagnéticos y su susceptibilidad magnética se incrementa con la reducción del tamaño de las partículas.
- ✓ En la clase media se concentran el cromo, aluminio y cinc en el producto no magnético para 0,15 A, y el hierro en el producto magnético a 0,05 A; en la gruesa se evidencian las mayores concentraciones de Ni, Mg, SiO<sub>2</sub> y Cu en el producto no magnético para cualquier intensidad del campo, y el hierro en el producto magnético a 0,05 A. En la clase de tamaño fina la variación de la intensidad del campo magnético no surte efecto sobre la concentración de los elementos.

# **RECOMENDACIONES**

## RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar la separación magnética a las colas estudiadas por vía húmeda.
- ✓ Realizar el análisis mineralógico a la muestra de cabeza y las obtenidas durante el proceso, que permita comprender mejor la distribución de los contenidos.
- ✓ Continuar el estudio del proceso de beneficio del hierro hasta obtener una materia prima potencial para la industria siderúrgica.
- ✓ Valorar la posible aplicación por parte de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” del esquema tecnológico propuesto para el aprovechamiento del níquel.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ariza, S.; Salazar, Y.; Capote, N. & Breffe, J.. 2004: Lixiviación química de colas producto del proceso carbonato amoniacal con ácidos orgánicos. Revista Tecnología Química, Vol. XXIV, No. 3.
2. Ashinkov, R.. 1962: Beneficio de las colas de Nicaro por separación magnética. [Informe técnico] (en Ruso). Biblioteca D´SIT. 62 p.
3. Baldoquín, Y. M.. 2004: Lixiviación orgánica de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa para la recuperación de cobalto. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Trabajo de Diploma] 57 p.
4. *Barani, K.; Javad Koleini, S.M. & Rezaei, B.. 2010: Magnetic properties of an iron ore sample after microwave heating. (Resumen). Separation and Purification Technology. Volume 76, Issue 3: 331-336.*
5. Chang A.. 1999: "Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato–amoniacal". Revista Minería & Geología, Vol. XVI, No 1: 76-82.
6. Clark, D.A.. 1999: *Magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exploration and magnetic interpretation. Exploration Geophysics. Volume 30: 5-26.*
7. Coello A. L., Menendez, J. M. & Laborde, R.. 2008: *Grindability of lateritic nickel ore in Cuba, Powder Technology 182: 113-115.*
8. Coello, A. L.; Beyris, P. E.; Hernández, A. & Ramírez, B.. 1998: Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombro laterítico. Revista Minería & Geología, XV(1).

9. Del Toro, A.. 2003: Consideraciones sobre la posible recuperación del cobalto contenido en las colas de la tecnología carbonato amoniacal. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Trabajo de Diploma] 65 p.
10. Dercach, V. G.. 1981: Métodos especiales de enriquecimiento de minerales. Traducido del ruso, VNESHORGIZDAT, MOSCÚ, 419 p.
11. Falcon, J.; Hernández, A. & Carthy, G.. 1992: Beneficio de minerales lateríticos. Utilización de perspectivas, monografía, ISMM, Moa.
12. Fernández, J. A.. 1979: Datos aportados sobre las colas de la empresa "René Ramos Latour". [Informe técnico].
13. Ferreiro, Y., Leyva, O., Sánchez, A. & Figueredo, O.. 2007: Obtención de un concentrado de hierro a partir de los escombros lateríticos del yacimiento Pinares de Mayarí. Revista Trimestral. No 3.
14. Hernández, A.. 2004: *Níckel and cobalt recovery from the tailings of the níckel industry* "Ernesto Che Guevara", Cuba.
15. Hernández, C. M.. 2011: Recuperación de Níquel, Cobalto y Hierro a partir del residuo sólido de la empresa "Ernesto Che Guevara". Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis de Maestría] 65 p.
16. Herrera V., 1961: Comentarios sobre el informe del Instituto Mejanoobr sobre el proyecto para la utilización de las colas de Nicaro como mineral de hierro. Biblioteca D´SIT, 2 p.
17. Herrera V., 1963: Análisis completo de las colas viejas y frescas de la Planta de Nicaro. [Informe Técnico], Biblioteca D´SIT, 2 p.
18. Informe, T.. 1981: Estudio sobre el beneficio de colas de la fábrica de Nicaro y la sinterización de concentrados férreos. Instituto Mejanoobr, Leningrado.

19. Jones, D. G.. 1988: Estudio preliminar de la obtención del concentrado de cromo a partir de las colas de Nicaro. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Trabajo de Diploma] 71 p.
20. Jungah, K.; Gjergj, D.; Hideaki, T.; Katsunori, O.; Seiji, M. & Toyohisa, F.. 2010: *Calcination of low-grade laterite for concentration of Ni by magnetic separation.* (Resumen). *Minerals Engineering. Volume 23, Issue 4:* 282-288.
21. Kriboi, R.. 1992: Elaboración de una tecnología de enriquecimiento de los residuos que contienen hierro de los complejos minero-metalúrgicos de Nicaro y Moa. [Informe técnico].
22. Lago, L. & Valikov, Y.. 1991: Disminución de los principales consumidores de ácido en lixiviación. Seminario Internacional sobre tecnología de lixiviación ácida de los minerales lateríticos, Moa, noviembre.
23. Laverov N. P.. 1985: Yacimientos de minerales metálicos de Cuba. Moscú, 245 p.
24. Leyva, E.; Fernández, M.; Santiesteban, E. & Rodríguez, J. E.. 2000: Investigaciones preliminares con el concentrado de cromita obtenido de las colas de Nicaro. Revista Ciencia Holguín N° 2.
25. López, H.. 1988: Optimización del esquema de beneficio de las colas de Nicaro con fines siderúrgicos. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Trabajo de Diploma].
26. Loyola, O.; Beyris, P.; Palacios, A. & Palmero, A.. 2011: Comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ante la intensidad de un campo magnético. “1ra Conferencia Científica Internacional de la UNISS”, YAYABOCIENCIAS´ 2011. Memorias [CD-ROOM], Santi Spíritus, Cuba, 28-30 de noviembre.
27. Mavrommatis, K.; Hernández, A.; Zaragoza, R. & Leyva, E.. 2002: Aproximación sostenible al reciclado de colas de la producción metalúrgica en Cuba en el ciclo de producción de acero en horno de arco eléctrico. Memoria del evento Metánica.

28. Mihai, L.. 2009: *Separation of small nonferrous particles using a two successive steps eddy-current separator with permanent magnets*. (Resumen). *International Journal of Mineral Processing*. Volume 93, Issue 2: 172-178.
29. *Mineral Processing Wastes*, 2006: *Material Description*.  
<http://www.tfrc.gov/hnr20/recycle/waste/mwst1.htm>
30. Ostroumov, M.N.; Blanco, J. & Rojas, A. 1987: Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlántico de la mina Moa. *Revista Minería & Geología*, 5(1): 3-20.
31. Palmero, A.. 2011: Comportamiento de las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara” ante la intensidad de un campo magnético. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Trabajo de Diploma] 45 p.
32. Pavlov, K.F.. 1981: Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Editorial MIR, 340 p.
33. Peña, E. G.. 2011: Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis de maestría] 72 p.
34. Peña, J. G.. 1986: Estudio del esquema de beneficio de las colas de Nicaro. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Trabajo de Diploma] 40 p.
35. Ponce, N.. 1979: Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro. *Revista La Minería en Cuba (Biblioteca RRL)*: 7 p.
36. Ponce, N.; Altarriba, I. & Carrillo, D.. 1986: Composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Moa. *Revista Tecnológica -Serie Geológica-*, 16(2): 66-75.
37. Presilla, D.. 1969: Producción de hierro esponja y arrabio en Cuba. [Informe técnico] 14 p.

38. Ramírez, B. S.. 2002: Estudio de la distribución fraccional de las arenas del placer de Playa Mejías. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis de Maestría] 62 p.
39. Resumen del Taller de Colas. 2005: Análisis de información científico técnica sobre el procesamiento de las colas de mineral. Moa, Biblioteca CEDINIQ, 35 p.
40. Rodríguez, M. P.. 2004: Lixiviación ácida reductora (con  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de las colas de la Planta niquelífera de Punta Gorda, CEINIQ (Cuba). [Informe Técnico] 22 p.
41. Rojas, A. & Turro, A.. 2003: Composición mineralógica de las colas del proceso CARON en Moa, Holguín, Cuba. Revista Minería & Geología, Vol 18 No 3-4: 21-28.
42. Rojas, A. & Beyris, P.. 1994: Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria Pedro Soto Alba. Revista Minería & Geología, Vol. 11(1).
43. Rojas, A. L., 2001: Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. Revista Minería & Geología, Vol. XVIII, Nos. 3-4: 21-31.
44. Sovol, S. I..1994: Composición de las lateritas de Moa y su influencia sobre el proceso de lixiviación de minerales por ácido sulfúrico en autoclaves. Revista Tecnológica, No 5 y 6.
45. Turro, A.. 2002: Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas] 154 p.
46. Waters, K.E.; Rowson, N.A.; Greenwood, R.W. & Williams, A.J.. 2008: *The effect of heat treatment on the magnetic properties of pyrite.* (Resumen). *Minerals Engineering Volume 21, Issue 9: 679-682.*

47. Zamora, J.; Véliz, J. & Gilm, J.. 1981: Tostación magnetizante de colas de Moa con carbón vegetal como agente reductor. Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME): 16 p.
48. Znamenáčková, I.; Lovás, M.; Mockovčiaková, A.; Jakabský, Š. & Briančin, J.. 2004: *Modification of magnetic properties of siderite ore by microwave energy.* (Resumen). *Separation and Purification Technology* Volume 43, Issue 2: 169-174.

**ANEXOS**

## ANEXOS

Anexo 1: Composición química de los productos de la separación magnética.

Clases de tamaño, mm	Intensidad del campo, A	Productos	Composición química, %									
			Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	SiO <sub>2</sub>	Zn	Cu	Al
-0,045	0,05	PM	0,35	0,06	50,90	0,75	1,23	1,72	5,09	0,03	0,01	3,56
		PNM	0,35	0,06	50,78	0,76	1,16	1,81	5,06	0,03	0,01	3,39
	0,10	PM	0,34	0,06	50,80	0,75	1,10	1,71	4,98	0,03	0,01	3,29
		PNM	0,35	0,06	50,79	0,76	1,11	1,77	5,00	0,03	0,01	3,25
	0,15	PM	0,34	0,06	50,92	0,75	1,09	1,71	4,97	0,03	0,01	3,43
		PNM	0,35	0,06	50,79	0,75	1,11	1,74	4,98	0,03	0,01	3,59
-0,2 +0,045	0,05	PM	0,35	0,07	50,33	0,92	1,49	1,62	5,50	0,03	0,01	3,68
		PNM	0,87	0,02	26,30	0,68	6,07	4,21	10,56	0,12	0,02	4,83
	0,10	PM	0,40	0,06	48,50	0,92	1,82	1,71	5,90	0,03	0,01	3,95
		PNM	0,87	0,01	24,28	0,58	6,44	4,62	10,72	0,13	0,02	4,66
	0,15	PM	0,47	0,06	45,76	0,92	2,32	1,86	6,58	0,03	0,01	3,83
		PNM	0,88	0,01	23,00	0,53	6,89	4,84	11,02	0,13	0,02	5,08
+0,2	0,05	PM	0,32	0,07	50,01	0,92	1,33	1,65	5,23	0,03	0,01	3,73
		PNM	1,51	0,06	26,26	0,89	7,60	1,60	13,63	0,06	0,05	3,44
	0,10	PM	0,39	0,08	47,92	1,03	1,70	1,65	5,79	0,03	0,01	3,75
		PNM	1,62	0,05	23,83	0,68	8,43	1,65	14,61	0,06	0,05	3,26
	0,15	PM	0,41	0,08	47,86	0,99	1,78	1,66	5,91	0,03	0,01	4,05
		PNM	1,64	0,05	24,03	0,59	8,43	1,59	14,72	0,07	0,05	3,23

Anexo 2: Comportamiento de las salidas productos de la separación magnética.

<b>Clases de tamaño, mm</b>	<b>Intensidad del campo, A</b>	<b>Salida Magnética, %</b>	<b>Salida no Magnética, %</b>
-0,045	0,05	82	18
	0,10	87	13
	0,15	88	12
-0,2 +0,045	0,05	64	36
	0,10	73	27
	0,15	79	21
+0,2	0,05	62	38
	0,10	69	31
	0,15	72	28