



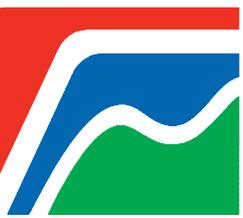
Metalurgia y materiales
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

**BENEFICIO EN MESAS DE
CONCENTRACIÓN DE LAS COLAS DE
LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA**

**Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en
Metalurgia y Materiales**

Ronal Del Pino Batista

MOA, 2016





Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia – Química

BENEFICIO EN MESAS DE CONCENTRACIÓN DE LAS COLAS DE LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

**Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en
Metalurgia y Materiales**

Autor: Ronal Del Pino Batista

Tutores: Prof. Aux., Ing. María C. Ramírez Pérez, Dr.C

MOA, 2016

Dedicatoria:

- **A mi madre: Su ejemplo, me ha dado energía y su dedicación, motivos para amarla.**

- **A Yoannet, mi compañera, amiga y confidente.**

- **A mi familia por su preocupación y apoyo en los cinco años de la carrera.**

- **A mi pequeña Yoana, mi razón de ser.**

Agradecimientos

- **A mis padres por darme su apoyo y sabiduría.**

- **A Yoannet, mi amor por su apoyo incondicional.**

- **A mi hermano y hermanas.**

- **A mis tutores Pedro E. Beyris Mazar y María C. Ramírez Pérez, por su apoyo y paciencia.**

- **A mis suegros por aceptarme como un miembro de su familia.**

- **A todos los profesores del departamento por haber contribuido a mi formación como ingeniero metalúrgico.**

- **A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en mi formación, preparación y culminación de esta TESIS.**

A todos mi más sincero agradecimientos. .

RESUMEN

En el tratamiento de los minerales lateríticos con la tecnología carbonato amoniacal, la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, vierte grandes volúmenes de colas al medio ambiente, con altas concentraciones de especies metálicas valiosas que pueden ser recuperadas por diferentes vías. El presente trabajo tiene como propósito determinar el comportamiento del beneficio en la mesa de concentración al variar los parámetros: flujo de agua y ángulo de inclinación, para la posible recuperación de especies metálicas presentes en las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Por lo que el diseño de experimento que se aplica es el Factorial completo a tres niveles (mínimo, medio y máximo), donde las variables independientes son el flujo de agua y el ángulo de inclinación.

La composición química de las colas y de los productos obtenidos en la experimentación se determinó a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X.

Con los resultados obtenidos se concluye que, las mejores recuperaciones (entre 44,576 % y 47,220 %) de las especies metálicas se logran en el concentrado, con el menor flujo de agua (0,16 L/s) y el mayor ángulo de inclinación (6 grados). No obstante, estos resultados no justifican la aplicación del método de beneficio para la recuperación de las especies metálicas contenidas en estos residuales.

Palabras clave:

Mesa de concentración, colas, especies metálicas, comportamiento, beneficio, recuperaciones.

ABSTRACT

In the treatment of the lateritic minerals with ammoniacal carbonate technology, the company "Ernesto Che Guevara Commander" pours big volumes of residue to the environment, with high concentrations of metallic valuable sorts that they can be recovered by different ways. The present work has the purpose to determine the behavior of the benefit at the table of concentration when varying parameters: flow of water and tilt angle, for the possible recuperation of metallic sorts present in the residue company "Ernesto Che Guevara Commander". For that reason the design of experiment that it is applied is the complete Factorial to three levels (minimum, mediate and maximum), where independent variables are the flow of water and the tilt angle. The chemical composition of the residue of the products obtained in experimentation was determined through the technique of X rays Fluorescence. With the results obtained the conclusions are: the best recuperations (between 44,576 % and 47,220 %) of the metallic sorts turn out well in the concentrate, with the minor flow of water (0,16 L/s) and the biggest tilt angle (6 grades). Nevertheless, these results do not justify the residual application of the method of benefit to the recuperation of the metallic sorts contained in these residues.

Key words:

Table concentrations, residue, metallic sorts, behavior, benefit, recuperations.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 Fundamentos teóricos de la separación de las partículas	5
1.2 Generalidades de la concentración gravimétrica	8
1.2.1 Equipos empleados en la separación gravitacional	10
1.2.2 Esencia del método de separación gravimétrica en mesas de concentración.	12
1.2.3 Aspectos teóricos sobre las mesas de concentración.	16
1.3 Estado de arte sobre el tratamiento de las colas de la Tecnología Carbonato Amoniacal.....	20
1.3.1 Tratamiento de las colas por el método pirometalúrgico.....	27
1.3.2 Tratamiento de las colas por el método hidrometalúrgico.....	29
1.3.3 Tratamiento de las colas por el método de beneficio de materiales .	31
1.3.4 Tratamiento de las colas por métodos gravitacionales	34
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	38
2.1 Métodos empleados en la investigación	38
2.2 Selección y preparación de las muestras.....	39
2.3 Caracterización química.....	42
2.3.1 Fundamentos del método de Fluorescencia de rayos X.	42
2.4 Caracterización granulométrica.....	43
2.5 Diseño de experimento	45
2.6 Metodología para determinar el flujo de agua	46
2.7 Metodología para determinar el ángulo de inclinación.	46
2.8 Metodología de separación en mesas de concentración.	47
2.8.1 Características de la mesa de concentración	47
2.8.2 Procedimiento de separación	48
2.8.3 Indicadores tecnológicos.	49
2.9 Otros equipos utilizados en la investigación	49
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	52
3.1 Características de las colas	52
3.1.1 Características químicas.....	52
3.1.2 Características granulométricas	53

3.2 Resultados de los ensayos en la mesa de concentración. Composición química de los productos obtenidos.....	54
3.3 Principales indicadores tecnológicos	57
3.3.1 Salida de los productos.....	57
3.3.2 Recuperación de las especies metálicas en los productos.....	59
3.4 Análisis estadístico de los experimentos.....	63
3.4.1 Efectos principales y superficie de respuesta estimada de los elementos en el concentrado.....	63
3.4.2 Efectos principales y superficie de respuesta estimada de los elementos en el producto medio.....	66
CONCLUSIONES FINALES.....	70
RECOMENDACIONES.	71
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las mayores reservas de minerales lateríticos las poseen Australia, Nueva Caledonia, Filipinas e Indonesia, además de Cuba, país que ocupa un lugar cimero en las reservas mundiales de este mineral, con un estimado de 1 500 millones de toneladas de níquel.

Estos yacimientos lateríticos en Cuba se encuentran ubicados fundamentalmente en el nordeste de la provincia de Holguín, donde actualmente operan las dos industrias metalúrgicas que se dedican a su procesamiento; una con la tecnología ácida a presión, la empresa “Pedro Soto Alba Moa nickel S.A” y la otra con la tecnología Carbonato Amoniacal (proceso CARON), la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” la que logra extracciones de níquel de un 86 % y hasta un 30 % de cobalto. En esta empresa, gran parte de las especies metálicas quedan en los sólidos no lixiviados del proceso, las colas, las que son vertidas en una presa próxima a dicha fábrica. Además, en el municipio existe un proyecto en ejecución para la producción de Ferroníquel (FeNi), que empleará mezclas de limonita y serpentina, y emanará grandes volúmenes de escorias.

En aras de incrementar los niveles de eficiencia en el proceso productivo, se han desarrollado diferentes investigaciones (Reid, 1984; Chang y Bobkovski, 1993; Mora, 2008; Lamoru, 2010; Araque, 2012 y otros) que van, desde el análisis de la calidad de la materia prima suministrada al proceso metalúrgico, hasta la caracterización de los residuos sólidos no lixiviados o colas del proceso.

Si la composición química y mineralógica del mineral que ingresa al proceso es determinante en la calidad del producto final, el conocimiento de la composición sustancial de las colas obtenidas es un elemento para considerar, que puede incluso contribuir a incrementar la eficiencia del mismo mediante la modificación de ciertos parámetros operacionales; además, permite trazar líneas perspectivas para el uso del recurso.

Es considerado por varios especialistas que el proceso minero futuro de la región de Moa estará vinculado a la explotación de los minerales almacenados en las presas de colas, ya que la actual explotación de los minerales lateríticos tiene un tiempo de vida limitado y constituyen recursos no renovables (Correa, 2013).

Las grandes acumulaciones de residuales ocasionan un serio desequilibrio en los ecosistemas de la región. Las colas están consideradas como una mena compleja multicomponente, constituidas fundamentalmente por hierro, silicio, aluminio, magnesio, cromo y en menor cantidad níquel, bismuto, cobalto, cadmio, titanio y molibdeno (Garbey, 2005; Loyola, 2012). Son de fina granulometría, lo que se atribuye a que el mineral que se procesa en la planta de níquel es previamente molido hasta 80 % de las partículas menores de 0,074 mm.

En el tratamiento de las colas se han desarrollado muchas las investigaciones y dentro de los investigadores que más se destacan se encuentran: Ponce 1979; Zamora et al. 1981; Turro 2002; Mavrommatis et al. 2002; Rojas & Turro 2003; García 2011; Hernández 2012, los que dirigieron sus trabajos fundamentalmente, a los procesos de separación magnética y lixiviación.

Para el Grupo Empresarial Cubaníquel, la generación de colas por las industrias del territorio, con alto contenido de hierro y otros metales pesados por más de 50 años, constituye uno de los principales problemas de mayor impacto ambiental; por ser una fuente de contaminación que afecta la erosión de los suelos, la flora y la fauna terrestre, las zonas costeras aledañas a los depósitos y a 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 época de sequía.

La creatividad de los científicos y tecnólogos cubanos en función de desarrollar alternativas tecnológicas que aminoren estas grandes acumulaciones de residuales y por ende, que mitiguen el deterioro ambiental, constituye una

necesidad imperiosa para la disposición y uso de estos residuales sólidos de las industrias del níquel en Cuba.

Un aspecto importante a considerar, es que las nuevas alternativas tecnológicas cuenten con infraestructuras especializadas, sobre la base de los procesos convencionales, para lograr un tratamiento sostenible de los residuales, de manera tal que permitan un tratamiento integral y posibiliten la sostenibilidad del desarrollo minero de la región.

El beneficio de las colas, a partir de las propiedades físicas y químicas de éstas, constituye una opción para el tratamiento de estos residuos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. En tal sentido se plantea 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 tratamiento.

Por lo que se define como **problema científico**: el insuficiente conocimiento del comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” con la variación del flujo de agua y ángulo de inclinación en las mesas de concentración.

El **objeto de estudio** es el beneficio en mesas de concentración de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **campo de acción** consiste en el proceso de separación gravimétrica en mesas de concentración.

Se enuncia como **hipótesis**:

Si se determina el comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, con la variación del flujo de agua y ángulo de inclinación en las mesas de concentración, entonces se podrá proponer una vía eficiente para su futuro aprovechamiento.

Por lo que el **objetivo del trabajo** es determinar el comportamiento del beneficio en la mesa de concentración al variar los parámetros: flujo de agua y

ángulo de inclinación, para la posible recuperación de especies metálicas presentes en las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

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

1. Determinar la composición química y granulométrica de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
2. Realizar los ensayos del beneficio en las mesas de concentración.
3. Determinar los indicadores tecnológicos del proceso de beneficio.

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

1. Revisión bibliográfica de los antecedentes del tema.
2. Toma y preparación de las muestras.
3. Determinación de la composición química y granulométrica de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
4. Diseño de experimentos.
5. Realización de ensayos de separación gravimétrica en mesas de concentración según diseño de experimentos.
6. Análisis y discusión de los resultados.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realiza el análisis bibliográfico de las investigaciones relacionadas con los métodos de beneficio y específicamente de la separación gravimétrica de las colas de la tecnología carbonato amoniaca. Además, se exponen las generalidades referentes al proceso de estudio.

1.1 Fundamentos teóricos de la separación de las partículas

Al sedimentar una partícula en un líquido, sobre ella actúa la fuerza de gravedad dirigida hacia abajo, la fuerza de empuje dirigida hacia arriba y la fuerza de resistencia del líquido. El valor de la velocidad límite de sedimentación depende del diámetro de la partícula y de su densidad. Los granos de igual masa de un mismo material sedimentan en las mismas condiciones a diferentes velocidades de sedimentación debido a la variedad de su forma (Fomenko 1980).

Las partículas sólidas en un medio fluido en reposo tienden a sedimentar por acción de la fuerza de gravedad, cuando caen en un medio extenso y sin considerar la acción de otras fuerzas que no sea la resistencia del medio, las mismas alcanzan una velocidad máxima, a la que se le denomina velocidad límite de caída libre, que depende de su tamaño, densidad y de otras propiedades del fluido.

En general, los métodos de separación por gravedad se agrupan en tres categorías principales:

a) Separación por medios densos

Las partículas se sumergen en un baño que contiene un fluido de densidad intermedia, de tal manera que algunas partículas floten y otras se hundan. Los medios densos usados son: líquidos orgánicos, solución de sales en agua y suspensiones de sólidos de granulometría fina en agua. En un medio denso la separación es posible con menas en la que los minerales estén regularmente

unidos. Si los minerales valiosos están finamente diseminados, no se puede desarrollar una diferencia apropiada de densidad entre las partículas trituradas por aplicación de chancado grueso. La separación en medios densos se divide en dos métodos básicos de separación: estáticos y dinámicos.

Separación estática:

La separación estática se caracteriza por el uso de aparatos concentradores con recipientes de varias formas, donde la separación se realiza en un medio relativamente tranquilo bajo la influencia de simples fuerzas gravitacionales. La única fuerza actuante es la fuerza de gravitacional. La separación se realiza en estanques, tambores, vasos, conos. Los separadores de cono son ideales para el tratamiento de carbón grueso americano. Los de tambor son adecuados para carbones europeos. Teóricamente cualquier tamaño de partícula puede ser tratado por medio denso. Prácticamente, en la separación estática se trabaja en un rango granulométrico de 150 mm (6 pulgadas) a 6 mm (1/4 pulgadas), pudiéndose tratar tamaños de hasta 14 pulgadas.

Separación dinámica:

La separación dinámica se caracteriza por el uso de separadores que emplean fuerzas centrífugas, las cuales pueden ser hasta 20 veces mayores que la fuerza de gravedad que actúa en la separación estática. En esta el tamaño máximo que se puede tratar varía de 50 mm (2 pulgadas) hasta 18 mm (3/4 pulgadas), siendo el mínimo de 0,5 mm (28 mallas) a 0,2 mm (65 mallas). Los equipos más importantes son los ciclones, no obstante existen otros equipos importantes como el Dyna-Whirpool y el separador Vorsyl.

b) Separación por corrientes verticales

Se aprovechan las diferencias entre velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas;

c) Separación en corrientes superficiales de agua o “clasificación en lámina delgada”, como es el caso de las mesas concentradoras y los separadores de espiral.

Cuando precipitan varias partículas, a la resistencia del medio se suman otras fuerzas que obstaculizan la sedimentación, al fenómeno se le denomina régimen de caída contrariada. El grado de contrariedad y la disminución de la velocidad se encuentran en dependencia directa de la concentración de las partículas que se hunden. En el caso de las lamas del orden de varios micrones, el peso y la velocidad de caída resultan más pequeños que las fuerzas superficiales y las interacciones pueden mantenerlas en suspensión. El movimiento de una partícula dentro de un fluido depende no solamente de su densidad relativa, sino también de su tamaño. Cuando se combina una mezcla de partículas pequeñas y otras más grandes, ocurre que estas últimas para precipitar tienen que vencer no solo la resistencia del líquido sino también desplazar a otras que poseen menor velocidad de caída. Por lo que en una suspensión que contiene mayor cantidad de partículas pequeñas que grandes el proceso de sedimentación demora más, y se debe, a que las partículas más pequeñas tienden a mantenerse en suspensión retardando el proceso. Por lo tanto, la eficiencia de los procesos de separación gravimétrica aumenta con el tamaño de las partículas. Las partículas pequeñas en las cuales su movimiento es dominado principalmente por la fricción superficial, responden relativamente mal a los métodos de concentración gravimétrica. Sin embargo, los avances conseguidos en los últimos años en nuevos diseños de equipos (concentradores centrífugos), los cuales aprovechan la fuerza centrífuga para la separación del concentrado y las colas, han permitido el tratamiento de partículas finas con una considerable eficiencia. En la práctica, es necesario un estrecho control del tamaño de la alimentación a los equipos gravimétricos, para reducir el efecto del tamaño y hacer que el movimiento relativo de las partículas dependa de la densidad de ellas.

Si la concentración del material es de elementos metálicos pesados como hierro y manganeso, entonces el proceso de sedimentación es rápido (Otero *et al.* 2009). Por otra parte si la densidad del material es inferior a la del fluido en el cual se alimenta, se elevan flotando en el seno del líquido, mientras si es más densa se hunden.

En la figura siguiente se muestra cómo el fluido se mueve en dirección contraria a la velocidad de sedimentación de las partículas.

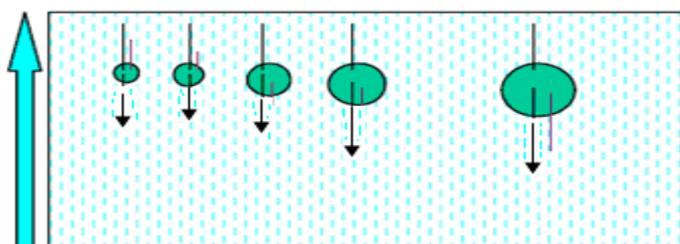


Figura 1.1 Movimiento de partículas respecto al fluido.

Existen algunos factores a considerar en la separación de las partículas, tal es el caso de la viscosidad, en la cual existe una dependencia directa entre tamaño de partícula y su concentración. Los flujos laminares en partículas pequeñas, así como su velocidad de desplazamiento (en este caso la viscosidad del fluido), constituyen un factor importante como parte de la resistencia del flujo, si es turbulento, así como su velocidad de desplazamiento, entonces se forman remolinos o torbellinos que le ofrecen una gran resistencia al flujo, en este caso la viscosidad del fluido se desprecia. La temperatura es otro factor a considerar, al aumentar existe una relación proporcional a la velocidad de sedimentación (Brown 1980).

1.2 Generalidades de la concentración gravimétrica

La separación o concentración gravimétrica es un método simple, de alta capacidad, sin reactivos peligrosos, de bajo costo y de gran eficacia, para separar minerales pesados de gran valor de la carga bruta, lo cual explica su amplio uso en la pequeña minería. Se utiliza para la separación de minerales

de diferentes densidades utilizando la fuerza de gravedad y, últimamente, las tecnologías modernas aprovechan también la fuerza centrífuga para la separación de los minerales.

La diferencia en densidad entre el mineral valioso y las gangas se utiliza para alcanzar su recuperación. La separación se lleva a cabo en los diversos movimientos de las partículas, bajo la influencia de la fuerza de gravedad y de otras en un medio fluido, por lo general agua o aire. Una característica de todos los métodos de concentración gravimétrica es que las partículas tienen que ser separadas por la dinámica del flujo, para lograr la formación de capas de minerales livianos y pesados. Disponible en: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2.htm>.

En este tipo de separación se generan dos o tres productos: el concentrado, el producto medio y en algunos casos las colas. Para una separación efectiva en este tipo de concentración es fundamental que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga. A partir del llamado criterio de concentración, se tendrá una idea sobre el tipo de separación posible.

El criterio de concentración utilizado en la separación gravimétrica es el siguiente:

$$k = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} \quad (1.1)$$

Donde:

D_h : es la densidad relativa del mineral pesado.

D_l : es la densidad relativa del mineral liviano.

D_f : es la densidad relativa del medio fluido.

En términos generales, cuando el cociente es mayor que 2,5, la separación gravimétrica es relativamente fácil. A medida que el cociente disminuye, la eficiencia de la separación disminuye; valores menores que 1,25 indicarían que la concentración por gravedad, por lo general, no sería posible comercialmente.

1.2.1 Equipos empleados en la separación gravitacional

En los procesos de concentración gravitacional se utilizan una serie de equipos muy eficientes para el tratamiento de diversos minerales, los que se basan en la densidad de la materia prima para su procesamiento. A continuación se describe el principio de funcionamiento y partes fundamentales de algunos de ellos.

Mesas de concentración

El beneficio en las mesas de concentración es un proceso de separación de minerales de acuerdo a su densidad en un flujo de agua, el cual fluye en una superficie con obstáculos, sometidos a movimiento de avances y retrocesos. Se utiliza para el enriquecimiento de las clases finas. El proceso de separación se efectúa con un chorro de agua que corre en forma de una capa fina por un plano inclinado.

Las mesas pueden ser móviles e inmóviles. Las inmóviles se utilizan para el tratamiento de minerales auríferos en las fábricas de extracción de oro y en otras plantas de enriquecimiento de minerales. Las móviles son de cinta, circulares y vibrantes. Las vibrantes adquieren el uso más amplio en el beneficio de diversos minerales, en el cual se concentran por gravedad el mineral de granulometría fina.

En las mesas modernas la dirección de oscilación del piso es perpendicular a la del movimiento del flujo de agua, a consecuencia de ello, el material se dispone en el piso en forma de abanico y puede ser dividida en la cantidad necesaria de productos (Priester 1991).

Concentradores centrífugos

Los concentradores centrífugos constituyen la principal invención realizada a las técnicas de concentración gravimétrica de oro. En un periodo muy corto ocupan gran aceptación para la recuperación en minas grandes; con sistematicidad se emplean en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar exceso de procesamiento, se emplean también antes del proceso de

cianuración o flotación para recuperar material grueso. Existen muchas aplicaciones en plantas industriales y en la minería aurífera aluvial.

Otra aplicación especial para los concentradores centrífugos es la recuperación del oro como un producto secundario, por ejemplo en canteras de grava. Todos los concentradores centrífugos operan con el mismo principio: básicamente, un recipiente que rota, efectúa la separación gravitacional de la carga en un campo centrífugo. Los tipos de concentradores centrífugos más utilizados se basan en el mismo principio pero difieren en su diseño técnico. Se encuentran los concentradores Knelson, Knudsen y Falcón, así como algunos de fabricación brasileña. Disponible en: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-6.htm>.

Hidrociclones

Los hidrociclones se emplean en las plantas de minería como clasificadores en ciclos de trituración y molienda. Los índices tecnológicos compiten con los clasificadores mecánicos y en muchos casos los superan. La energía consumida por la bomba hace que se encarezca el proceso.

Constan de una parte cónica y una cámara cilíndrica en la cual existe una entrada tangencial para la suspensión de la alimentación. La parte superior presenta un tubo para la salida de la suspensión diluida y en la parte inferior existe un ducto de salida para la suspensión concentrada. El conducto de alimentación se denomina inlet, el tubo de salida de la suspensión diluida se denomina vortex y el orificio de salida del concentrado se denomina apex.

La suspensión es bombeada a presión y entra a través del tubo de alimentación, generándose un movimiento de tipo espiral descendente debido a la forma del equipo y la acción de la fuerza de gravedad. Este movimiento produce una zona de muy baja presión a lo largo del eje del equipo, por lo que se desarrolla un núcleo de aire en ese lugar. A medida que la sección transversal disminuye en la parte cónica, se superpone una corriente interior que genera un flujo neto ascendente también de tipo espiral a lo largo del eje central del equipo, lo que permite al flujo encontrar en su camino el vortex que actúa como rebalse (Fomenko 1980).

Clasificador de espiral

Consiste en un tanque inclinado en el cual uno o dos espirales giran despacio y libremente sin tocar los costados o el fondo del caja. La máquina realiza una clasificación de los sólidos de acuerdo con el tamaño y/o la gravedad específica a través de los diferentes promedios de decantación de las partículas en suspensión en la cuba. Es de mecanismo simple, fuerte, fácil de mantener para las operaciones continuas de decantación de agua, así como finas partículas en suspensión llamadas reboso y simultáneamente drenar y transportar las partículas gruesas denominadas hundido o arenas fuera del clasificador.

La alimentación es a través de un conducto y en algunos casos por ambos lados del tambor, el reboso es descargado por la parte más baja que recibe el nombre de rebosadero ajustable. En diversos equipos los puntos de alimentación y descarga están cambiados. Los sólidos más pesados o gruesos decantan en el fondo y en las máquinas simples avanzan por la acción de la espira a lo largo de la parte más baja. En el caso de máquinas dobles, las espirales operan una hacia la otra y la arena es transportada hacia arriba (Fomenko 1980).

1.2.2 Esencia del método de separación gravimétrica en mesas de concentración.

Las mesas concentradoras son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. Aquí se habla principalmente de los tipos con movimiento longitudinal vibratorio, donde las partículas de mineral se diferencian formando bandas en abanico (cejas), según su peso específico y la granulometría. Otros tipos de mesas (mesas de banda, mesas basculantes, mesas de paño sin fin, mesas redondas, etc.) son raramente usadas en la pequeña minería.

La mesa con movimiento longitudinal vibratorio (mesa vibradora) está muy difundida principalmente en la minería del estaño, wolframio y oro.

Existen de diferentes tipos y marcas. En la minería aurífera se usan especialmente los tipos Wilfley y Deister. Las diferencias entre unas y otras son mínimas, principalmente en el mecanismo del cabezal, la geometría del tablero y el tipo de enriflado. Para el último paso de limpieza de concentrados, antes de la fundición directa, se encuentra en algunas minas también mesas tipo "Gemini".

De acuerdo a su modelo y tamaño, las mesas se utilizan para concentrar minerales finos y ultrafinos con una capacidad hasta un máximo de 1,5 t/h por unidad.

Las mesas vibratoras permiten una amplia variación en sus parámetros operativos y, de esta forma, se pueden adaptar al material de alimentación correspondiente. Debido a que el proceso de concentración se lleva a cabo a la vista sobre el tablero de la mesa, cualquier cambio en los parámetros (inclinación longitudinal y transversal, cantidad de agua, etc.) resulta en cambios en el comportamiento del material, que pueden ser visualizados inmediatamente. Se pueden tomar muestras directamente durante la operación, utilizando bateas para oro, por ejemplo. Por lo tanto, la optimización de esta operación se lleva a cabo de una manera simple y puede ser realizada por operadores aprendices.

Debido a la distribución del material en forma de un abanico sobre la tabla de la mesa, se puede obtener bandas específicas de mineral de una manera selectiva, algo que no ocurre en las espirales, donde las bandas se sobreponen parcialmente unas sobre otras. De esta manera, se puede separar, al realizar la regulación correspondiente, un concentrado de alta riqueza. Esto implica, por otro lado, que es muy fácil obtener el concentrado de alta ley cuando se utilizan las mesas para la fase de limpieza de los minerales.

La efectividad de todas las mesas depende de la homogeneidad del material de alimentación y de la densidad de pulpa, particularmente de la densidad ya que cualquier fluctuación altera las condiciones de transporte del agua hacia afuera de la corriente.

La combinación del movimiento de la mesa y la corriente de agua permite separar las partículas sólidas en tres clases. El movimiento de la mesa (la sacudida) es predominante sobre la corriente de agua para las partículas gruesas y densas que por su peso se ubican en el fondo de las ranuras. En tanto la corriente de agua predomina sobre la sacudida para las partículas finas a las que arrastra perpendicularmente al eje longitudinal de la mesa. Así, esta combinación de movimientos permite separar las partículas en tres clases, las que se reciben en recipientes dispuestos al borde de la mesa. La mesa tiene una ligera inclinación respecto al plano horizontal de 2,5°. La parte más elevada se encuentra del lado del distribuidor de agua. Los listones de madera se encuentran espaciados a unos 30 mm. La altura de los listones va disminuyendo desde la parte más elevada a la inferior. La altura de los listones mayores es de 15 mm.

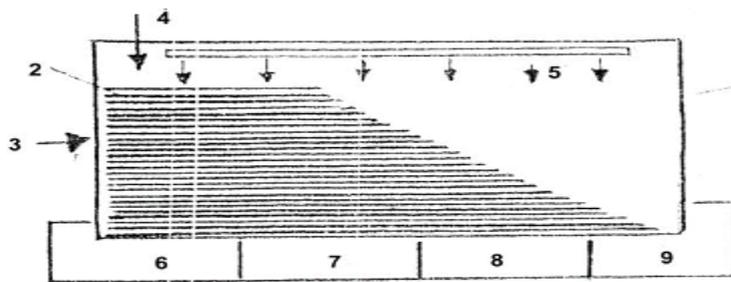


Figura 1.2 Esquema del diseño de la mesa de concentración.

2. Listones 3. Sentido del vaivén de la mesa 4. Suspensión 5. Agua de barrido 6. Materiales finos y livianos 7. Materiales medios y livianos 8. Materiales medios y densos 9. Materiales gruesos y densos.

Ventajas:

- ✓ descarga continua de productos
- ✓ permite obtener toda una gama de productos (concentrados, mixtos, colas)
- ✓ comportamiento visible del material sobre el tablero.
- ✓ costo relativamente bajo (de producción local).
- ✓ gran flexibilidad.

- ✓ manejo y supervisión relativamente simple (t/h).
- ✓ posibilidad de recuperar otros minerales valiosos acompañantes.
- ✓ alta seguridad en las condiciones de trabajo.
- ✓ buena recuperación y un alto índice de enriquecimiento, poco uso de agua y energía.
- ✓ posibilidad de su producción en países en desarrollo.

Desventajas:

- ✓ Precio relativamente alto (en relación a su capacidad).
- ✓ requiere alimentación constante (si no, la posición de las cejas varían demasiado sobre el tablero).
- ✓ requiere supervisión continua.
- ✓ requiere motor.

Variables de operación:

- ✓ granulometría de la alimentación
- ✓ longitud de golpe (amplitud)
- ✓ frecuencia de golpe
- ✓ inclinación de la mesa
- ✓ cantidad de agua de lavado
- ✓ posición de los cortadores de productos.

Posibilidades de aplicación:

Principalmente se puede usar en la minería aurífera filoniana (vetas), para la recuperación de oro fino y muchas veces para la recuperación de piritas auríferas como subproducto comerciable. Este último constituye además un contaminante cuando se descarta en las colas a los ríos y lagunas; su separación o recuperación significa una valiosa contribución a los propósitos de mitigación de este impacto ambiental y un ingreso adicional.

Las mesas sirven también para enriquecer preconcentrados gravimétricos obtenidos por otros equipos (canaletas, espirales, etc.) y para producir concentrados de alta ley que en algunos casos se pueden fundir directamente.

1.2.3 Aspectos teóricos sobre las mesas de concentración.

Las mesas de sacudidas se difundieron ampliamente para la concentración por gravedad del material con granulometría fina.

En las mesas de concentración modernas la dirección de la oscilación del piso es perpendicular a la del movimiento del flujo del agua. A consecuencia de ello, el material se dispone en el piso en forma de abanico y puede ser dividido en la cantidad necesaria de productos.

Las primeras mesas de sacudidas (Rittinher) aparecieron en la mitad del siglo pasado. Sin embargo, ellas se distinguían por un pequeño rendimiento y eficacia reducida de funcionamiento y a consecuencia de esto no pudieron competir con las mesas inmóviles de acción periódica que se usaban entonces ampliamente. Sólo con la aparición de la mesa de Wilfley, las mesas de sacudidas se granjearon la aprobación general.

El posterior desarrollo de la estructura de las mesas de sacudidas llevó a la aparición de la mesa de Daster con pisos diagonales. Esta mesa tenía la superficie activa mayor que la mesa de Wilfley y mejores índices cualitativos del enriquecimiento.

En el período de 1918 a 1920 se empezó a aplicar la mesa de Daster-Awerstrom con los pisos de tres tipos: para los fangos de mineral, para arenas, para la concentración primaria. Los primeros dos pisos se distinguen entre sí por el tamaño y la cantidad de ondulaciones. El balanceo de esta mesa se realiza en la dirección de la diagonal corta del piso.

De las estructuras soviéticas obtuvo difusión la mesa de concentración (CK-1), que consta del piso, el bastidor, el mecanismo del giro del piso, el mecanismo

impulsor los rodillos de apoyo, de los canalones distribuidor del agua y alimentador.

Sobre la superficie del piso de aluminio se pegan por encima las ondulaciones de goma y por abajo, chapas de goma. Para aumentar el plazo de servicio del piso éste se cubre por arriba de una capa fina de cola. En el bastidor de funcionamientos están fijados soportes a los que se une el piso por medio de anillos. El giro del piso se produce mediante un volante, una transmisión por tornillo sin fin y un árbol, en el cual se fijan las palancas que se apoyan en las chapas de goma del piso. En la parte delantera del bastidor hay un agujero para el apoyo del tirante del mecanismo de impulsión, y en la parte trasera, un agujero para el gancho de la varilla del muelle.

En ángulo de inclinación transversal del piso se establece en dependencia de la densidad y la grosura de la mena: para el material menudo de 4 - 6°, para el más grueso de 6 - 10°.

La regulación del número de carreras del piso se realiza por medio del cambio de polea en el electromotor.

El piso recibe el movimiento de vaivén del mecanismo de impulsión, el balancín del cual está unido con el bastidor por medio de un cabezal móvil, una horquilla y una varilla. El cabezal móvil, al regular el valor de la carrera del piso se mueve por la ranura del balancín hacia arriba y abajo con ayuda de un tornillo especial. El movimiento inverso al piso se realiza a cuenta del muelle, dispuesto bajo la mesa y unido con el piso.

El canalón para la alimentación de la pulpa y el agua, suspendido sobre el piso, está dividido en dos partes.

El material que entra se separa según la densidad en el chorro corriente de agua durante el movimiento de vaivén del piso de la mesa. El movimiento del piso asegura el mullido ininterrumpido de la mezcla de granos minerales y su movimiento longitudinal. Los granos pesados se sedimentan gradualmente en la superficie del piso, se desplazan por los canalones de las ondulaciones al

extremo de descarga del piso, en tanto que los granos más ligeros se llevan con el chorro de agua y se salen al canalón, que está situado en el lado largo.

La partícula mineral que se encuentra en estado de reposo relativo en el piso de la mesa que se mueve con velocidad variable, empieza a moverse por él sólo cuando la fuerza de inercia ($F_i = m \cdot a$) de la partícula venza la de rozamiento ($F_r = G \cdot f$), es decir cuando:

$$F_i \geq F_r$$
$$m \cdot a \geq G \cdot f \quad (1.2)$$

Donde:

m : es la masa de la partícula (g)

a : es la aceleración de la partícula (m/s²)

G : es peso de la partícula

f : es el coeficiente de rozamiento

Puesto que la partícula está sumergida en el agua, en la ecuación 1.2 es necesario sustituir el peso del cuerpo en el agua G_0 . La aceleración crítica de la fuerza de inercia a_0 , con la que la partícula empieza a moverse sobre la superficie de la mesa será:

$$a_0 = \frac{G_0}{m} \cdot f \quad (1.3)$$

Tomando:

$$G_0 = \frac{\pi d^3}{6} \cdot (\delta - 1000) \cdot g$$

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \delta$$

Y sustituyendo esos valores en la expresión 1.3, se obtiene:

$$a_0 = \frac{\delta - 1000}{\delta} \cdot gf = g_0f \quad (1.4)$$

Donde:

δ ; : Densidad

La aceleración crítica de la partícula depende de dos factores: del coeficiente de rozamiento y de la densidad; es tanto mayor cuanto mayor sea la densidad.

Bajo la acción del mecanismo de oscilación el piso de la mesa se mueve con aceleración variable. Las partículas de diferente densidad, que están en el piso, se moverán no simultáneamente y a velocidades iniciales diferentes.

Los movimientos de oscilación del piso provocan turbulencias adicionales en el flujo corriente. Si en las esclusas de relleno profundo, en las subesclusas y en las mesas inmóviles las fracciones más pesadas del material en enriquecimiento se sedimentan en la escombrera, es decir, inmediatamente después de los listones y la ondulaciones, en las mesas de sacudidas las fracciones más pesadas, precipitadas en la escombrera, se mueven por la corriente del flujo hasta la pared de la siguiente ondulación.

El esquema de separación en la mesa de concentración se muestra en la figura 1.3

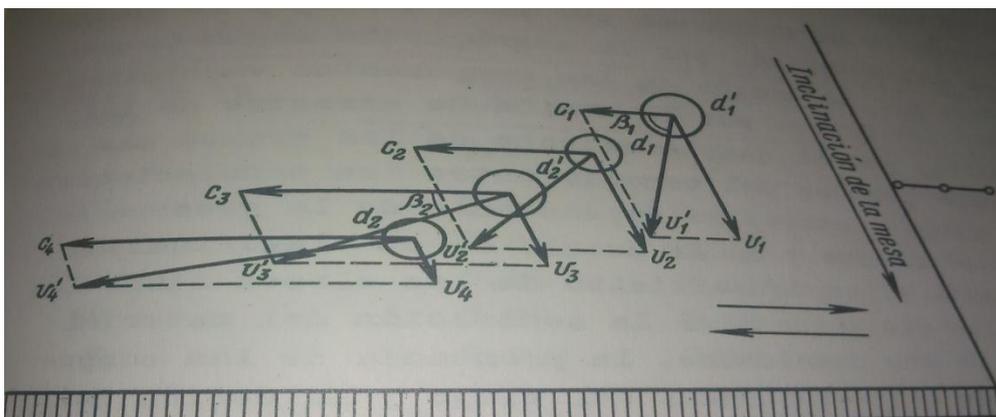


Figura 1.3 Esquema de separación en la mesa de concentración.

El proceso de separación de las partículas minerales depende no sólo del valor de la velocidad resultante, sino también del ángulo β

En la capa inferior se concentran los granos pequeños del mineral pesado, sobre ellos los más gruesos d'_2 de la misma densidad. Los granos de la ganga (durante enriquecimiento de los minerales) se distribuyen en las capas superiores de modo análogo a los granos de los materiales pesados, es decir, los granos pequeños d_1 estarán bajo los gruesos d'_1 . Los granos d'_1 y d_1 situados en las capas superiores se arrastrarán con el agua en sentido de la inclinación con las velocidades v_1 y v_2 , cuyo valor es mayor que v_3 y v_4 de los minerales pesados.

Bajo la acción de las sacudidas del piso en dirección perpendicular a su inclinación, el movimiento de los granos pesados dispuestos en las capas inferiores se realizará a velocidades mayores (c_4 y c_3) que las de los granos de las capas superiores (c_2 y c_1). Las velocidades de los granos superiores en la dirección de la oscilación de la mesa serán tanto menores cuanto más arriba se dispongan esos granos.

La composición de las velocidades c y v da las velocidades resultantes v'_1 , v'_2 , v'_3 , v'_4 que determinan la dirección de la trayectoria de los granos sobre la superficie de la mesa.

Las sacudidas del piso provocan en el flujo que corre oblicuamente componentes verticales de la velocidad un poco mayores que en los flujos de las masas inmóviles. Debido a eso, en las mesas de sacudidas se suspenden los granos más gruesos y, por consiguiente, la capacidad de esas mesas de captar los granos pequeños es menor que la de las mesas inmóviles.

1.3 Estado de arte sobre el tratamiento de las colas de la Tecnología Carbonato Amoniacal.

Varios investigadores del territorio han realizado estudios referentes a las colas de la tecnología carbonato amoniacal.

Ponce (1979) estudia la mineralogía y composición sustancial de las colas de Nicaro, emplea difracción de rayos X, microscopía óptica y ensayos térmicos, donde determina las fases mineralógicas siguientes: magnetita, hematita, cromita, andalucita. El mismo investigador en el año 1986 estudia la granulometría de los residuos sólidos de este proceso en el depósito de Moa. En el trabajo no se expone una tecnología para el tratamiento de las colas.

García & col (1984) ensayan las características físicas y químicas de las colas de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, la muestra se toma directamente del producto de rechazo de la planta de recuperación de amoníaco, se determina por análisis espectral cualitativo la composición elemental de las colas, donde la misma está constituida fundamentalmente por hierro, silicio, aluminio, magnesio, cromo, en menor cantidad existe níquel y pequeñas cantidades de bismuto, cobalto, cadmio, titanio, molibdeno y fósforo. A pesar de todo no se determinó la mineralogía del residual.

Peña (1986) estudia la granulometría de las colas de Nicaro para la obtención de un concentrado más rico de hierro, analiza diferentes métodos de estudio, como la variación en el esquema de separación magnética y utilización de la flotación. Llega a la conclusión de que la separación magnética es el método más apropiado para el beneficio de las colas, mientras que por el método de flotación no se puede obtener un concentrado final con altos contenidos de hierro. Se considera realizar un análisis mineralógico para el estudio de las diferentes fases del hierro y obtener mejores resultados en la concentración.

Diez años después, Samalea (1996) determina la composición química a las colas de Nicaro a partir de lo planteado por diversos investigadores, emplea como agente reductor para la lixiviación el SO_2 y el H_2SO_3 , donde obtiene altas extracciones de cobalto, superiores al 90 %, pero existe el inconveniente de la necesidad de producir el gas reductor, el cual encarece el proceso.

Turro (2002) realizó un estudio sobre el hidrotransporte de las colas del proceso CARON de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. En el trabajo caracterizó las propiedades granulométrica, química y mineralógica de

la fase sólida, y resultó que las fases principales presentes fueron: la maghemita, la magnetita y el cuarzo. Por otra parte, se obtuvo una caracterización reológica de sedimentación y de estabilidad a partir de sus hidromezclas en medio amoniacal. Se determinó que las partículas inferiores a los 43 μm , con una composición química muy uniforme están conformadas por varias fases mineralógicas, en las que sobresalen principalmente la magnetita (Fe_3O_4) y la maghemita ($\sigma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Los resultados obtenidos aportan como base de datos para las posteriores investigaciones, pero no se llegó a plantear una adecuada metodología para la recuperación de los elementos de interés contenidos en las colas estudiadas.

Rojas (2003) realiza una caracterización mineralógica de las colas de la tecnología CARON, en Moa, donde encuentra la existencia de las fases cromoespinelas: Mg cromita ($\text{Mg, Fe}(\text{Cr}_2\text{O}_3)$), donathita ($(\text{Fe, Mg})(\text{Cr, Fe})_2\text{O}_4$) y trevorita ($\text{Ni, Fe}_2\text{O}_4$) y como fases mineralógicas secundarias Cuarzo (SiO_2) y silicatos de Fe y Mg de la serie del Olivino, Forsterita-Fe ($\text{Mg, Fe})_2(\text{SiO}_4)$.

En ese mismo año Rojas & Turro (2003) analizan la composición mineralógica, química y granulométrica de las colas del proceso CARON de Moa, ambos toman muestras de las plantas de lixiviación y recuperación de amoníaco, los cuales llegan a la conclusión de que las colas obtenidas presentan tres grupos granulométricos principales: uno predominante, constituido por la fracción menor de 0,044 mm; otro que agrupa las clases granulométricas (+0,175 mm); (-0,147+0,074 mm) y (-0,074+0,044 mm) y la clase granulométrica algo gruesa (0,175+0,147 mm). Los óxidos de hierro maghemita y/o magnetita constituyen las fases mineralógicas principales y además no existen diferencias notables en cuanto a la composición química de las colas en ambas plantas. Pero no aportan una tecnología para el tratamiento de estos residuos.

Medrano (2007) efectúa un estudio físico y químico a las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", en el análisis químico se obtienen resultados similares a los obtenidos por García & col (1984) en las colas de Nicaro. El análisis picnométrico realizado refleja que esta posee un 42,5 % de poros y una humedad molecular capilar de 42,4 %. Concluye que el contenido

del hierro aumenta con la disminución del tamaño de las partículas, mientras que para el cromo los mayores contenidos están entre 0,125 y 0,030 mm, los contenidos de óxido de aluminio presentan una regularidad bien definida y se encuentran alrededor del 3 %. A pesar de los buenos resultados se considera que se debe realizar un estudio mineralógico para conocer las fases presentes en estos desechos y los elementos que las componen.

García (2011) realiza una investigación con las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, donde los resultados del análisis químico son muy parecidos a los realizados por García & col, (1984) y Medrano, (2007), encuentra además la existencia del manganeso entre los minerales que más se reportan. Emplea para la lixiviación como agente reductor el FeSO_4 . La desventaja de la investigación es que no realizan ningún proceso previo para concentrar metales.

Loyola *et al.* (2011) determina la composición química a una muestra inicial de colas y a los productos de la separación magnética en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, analizan la susceptibilidad magnética. Concluyen que las colas presentan un contenido de 0,36 % de níquel, 0,091 % de cobalto y 43,93 % de hierro, emplean tres tipos de análisis químico, fluorescencia de rayos X, fotometría por absorción atómica y espectrofotometría de emisión por plasma (ICP).

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).

Las colas constituyen el desecho industrial de la planta de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” y está compuesto fundamentalmente por hierro, níquel,

cobalto, aluminio, magnesio, silicio y otros, que si se logran recuperar resuelve un gran problema a la sociedad, desde el punto de vista económico, social y ambiental, además de constituir una fuente de materia prima para la industria nacional, en la obtención de subproductos que a la vez se empleen en algunas de las ramas de la economía. Las colas de la tecnología CARON son depositadas en la presa de colas, estos residuales no son utilizados por no contar con una tecnología capaz de procesarlas, además se vierten anualmente alrededor de 7 millones de toneladas (García 2011).

La demanda creciente de los minerales de hierro en el mercado abre una posible alternativa para la utilización del residual; en la cual es considerada la posibilidad de obtener un concentrado de hierro a partir del mismo, porque representa aproximadamente el 45 % del volumen total. Después del enriquecimiento en los contenidos de hierro, níquel, cobalto y cromo, las colas pueden ser comercializadas como un nuevo producto con alto valor agregado para los consumidores de minerales de hierro, que lo convierten en un producto codiciado por los aceristas.

Dentro de la metalurgia el estudio del residuo sólido de la tecnología carbonato amoniacal, se encuentra dividido en tres ramas fundamentales, como son: procesos de beneficio de minerales, pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, en la presente indagación científica se hace énfasis en los métodos de beneficio, con especificidad en la concentración gravimétrica.

Las primeras referencias de trabajos realizados con el objetivo de aprovechar las colas en forma de concentrado de hierro aparecen en 1952 por la National Lead Company; en las investigaciones se realiza una nodulación de las colas y se calcinan a 900 °C, los nódulos se mezclan con cisco de coque y carbonato de calcio, se calientan hasta 1150 °C, se enfrían, trituran y se realiza la separación magnética seca, donde se obtiene un producto magnético con 71,2 % de hierro y recuperación del 83,4 %. Similar procedimiento se realiza con mezcla 1:1 de colas y mineral de hierro de baja ley para obtener un producto magnético con 91,1 % de hierro total y recuperación del 73,9 % (Kowalski

1953). Pero tiene como inconveniente que es un proceso altamente consumidor de energía.

Los estudios con mayor grado de profundidad y sistematicidad efectuados a las colas se realizaron en el Instituto Mejanobr de Leningrado, los cuales se inician en 1961 y su objetivo principal es la determinación de las características de concentración de una muestra de la planta de Nicaro, para determinar un flujo de beneficio adecuado con vistas a la proyección de una planta de beneficio a escala piloto para la producción de concentrado de hierro. En las investigaciones realizadas se encuentran la presencia de hidrocarburos en las colas; lo que afecta notablemente el proceso de beneficio por el método de flotación, por lo que con la aplicación de este método no se logran resultados significativos, obteniéndose un 46 % de concentrados de hierro, en el producto final. Luego se determina que la vía idónea para el beneficio del residual es la separación magnética húmeda a baja intensidad del campo magnético. Obteniéndose en la experimentación un concentrado con 58,1 % de hierro, que según su composición química es apto para la utilización siderúrgica, se recomendó además un esquema de beneficio para una prueba de concentración semi-industrial (Herrera 1961).

En el 2005 se realiza un Resumen del Taller de Colas, donde se analiza la información científico técnica sobre el procesamiento de las colas de mineral, los resultados que se muestran a continuación fueron tomados de este taller.

Durante 1970 en la República Democrática de Corea se desarrollan investigaciones para determinar la posibilidad de obtención de acero a partir de colas de Nicaro, donde se emplea 3 000 t de colas con 40 % de hierro y se obtiene un concentrado entre 53 y 55 % de hierro por separación magnética húmeda a baja intensidad, por el esquema Peletización-Proceso Krupp-Renn, se logran lupias con 92,5 % de hierro; 0,86 % de cromo y 0,56 % de níquel. Posteriormente se obtiene un acero semialeado entre 1,94 y 2,38 % de carbono, 0,72 y 0,92 % de cromo y entre 0,61 y 0,70 % de níquel, por el procedimiento de convertidor de oxígeno. Los resultados son atractivos pero los procesos pirometalúrgicos incluidos en el esquema estudiado para el

aprovechamiento de los residuales incrementan los costos del proceso, debido a los altos consumos energéticos que traen aparejado estas operaciones.

Otro estudio relacionado con el tema lo realiza Nippon Steel Corporation en 1977, donde se confirman las fases mineralógicas en la materia prima determinada en investigaciones precedentes, el análisis se realiza por difracción de rayos X, y determinan que las colas se encuentran formadas por magnetita, cromita, forsterita, andalucita y fase desconocida. El examen al microscopio revela la presencia de las llamadas pseudopartículas, en las cuales la magnetita o la cromita forman el núcleo rodeada por partículas finas de ganga que se adhieren.

En los años del 1979 al 1981 se realiza en el Instituto Mejanobr de Leningrado y el SIME en Cuba, pruebas de separación magnética de la mezcla de colas tomadas del depósito y la producción corriente en la planta de Nicaro, con el objetivo de determinar los índices de beneficio y luego producir concentrado para las pruebas de sinterización. Se aplica la filtración y sinterización a los concentrados obtenidos. Se obtienen concentrados entre 55,9 y 57,0 % de hierro y entre 1,8 y 2,0 % de cromita adecuado para las pruebas de sinterización. Sin embargo, como desventaja se demostró la presencia de hidrocarburos en las mezclas cola tomadas para la investigación, lo cual ejerce influencia negativa en la estabilidad de los procesos de separación y filtración, así como en los índices tecnológicos correspondientes.

En Alemania en el año 2002 se realizan pruebas de inyección de colas al baño metálico de un horno de inducción de 50 kg a escala de laboratorio, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los diferentes elementos. Las pruebas se repiten a escala mayor en el año 2004 en el horno de arco eléctrico de 1,5 t 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. La desventaja de la investigación es que se añade colas sin un previo tratamiento.

Sobre la base de los resultados obtenidos en las investigaciones analizadas se puede concluir que el procedimiento más utilizado para la concentración del hierro y cromo en las colas de la tecnología carbonato amoniacal es la separación magnética húmeda a baja intensidad de campo magnético; las cuales logran alcanzar concentrados con valores entre 50 y 60 % de hierro.

1.3.1 Tratamiento de las colas por el método pirometalúrgico

Varias compañías e investigadores han empleado los procesos pirometalúrgicos para el procesamiento de las colas. Las investigaciones que se hacen referencia a continuación fueron tomadas del Resumen del Taller de Colas realizado en el CEDINIQ en 2005.

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 %.

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).

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 (Fe_2O_3) en óxido magnético (Fe_3O_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 prereducción, 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, solo que tiene el inconveniente de que hay que calentarlos hasta elevadas temperaturas, con el consiguiente consumo de energía.

Mavrommatis et al. en el 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.

1.3.2 Tratamiento de las colas por el método hidrometalúrgico

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.

García en el 2011 realizó la lixiviación ácida con empleo de ácido sulfúrico a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Obtuvo una extracción de cobalto mayor que 89,3 % en 15 minutos antes de realizar el experimento, determinó la composición química promedio de las colas a través del método de Fluorescencia de Rayos X (FRX) obtuvo que el contenido níquel en la colas es 0,38 % y cobalto es 0,08 % pero no realiza ningún proceso previo para concentrar los metales contenidos en las colas.

Alexander en 2013 estudió sobre la lixiviación ácida de la colas de la empresa René Ramos Latour” con el empleo de una muestra del concentrado magnético. Para el análisis granulométrico por vía húmeda, se emplearon los tamices de 0,149, 0,074 y 0,044 mm. Se llegó a determinar la composición química de la fracción magnética y se caracterizó el concentrado magnético de las colas lixiviadas, el 88,25 % presentó un diámetro promedio de partícula inferior a 0,06 mm. Se lixivió el concentrado magnético de las colas, para el

cual se obtuvo la extracción de níquel entre 20,2 % y 45,4 % y el cobalto alcanzó valores entre 24,2 % y 47,0 %.

En el 2014 Urgelles investigó sobre la lixiviación ácida de las colas de la tecnología carbonato amoniacal donde obtuvo un modelo cinético. Para la preparación de las muestras se empleó el método de tamizar por vía húmeda. Resultó que la extracción del cobalto fue de 50 % con la granulometría menor de 0,044 mm, mientras que las partículas de tamaño mayor de 0,044 mm presentaron una recuperación 39,3 % en 15 minutos. Pero no obtuvo mayor extracción del cobalto para las condiciones establecidas.

1.3.3 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 Latour 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 Cr₂O₃ 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 la variación en el esquema de separación magnética y la 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 & Carthy (1988) obtuvieron 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 Cr₂O₃.

En el mismo año López & Carthy (1988) proponen 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 %. En el mismo definen que los factores que influyen en la separación magnética están: 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.

Palmero (2011) realizó una investigación sobre la cola de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” mediante la separación magnética por vía seca en un separador ЭБС138-T. En la cual se determinó la composición química de la muestra inicial y a los productos a través de las técnicas analíticas de: fluorescencia de rayos X, fotometría por absorción atómica y espectrofotometría de emisión por plasma (ICP). A partir de la susceptibilidad magnética con un Kappameter digital, se obtuvo que las colas presenten un contenido de 0,36 % de níquel, 0,091 % de cobalto y 43,93 % de hierro. Los principales resultados confirmaron una de las posibles vías para el proceso de beneficio de las colas por vía seca.

Loyola un año después experimentó y propuso un esquema de beneficio de la colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, mediante 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 incrementa con la disminución del tamaño de las partículas, con valores de $97 \cdot 10^{-3}$, $106 \cdot 10^{-3}$ y $126 \cdot 10^{-3}$ m³/kg respectivamente, lo que demuestra el carácter ferromagnético. Además, analizó la composición química a través de la técnica de Fluorescencia de rayos X y 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 SiO₂ en el producto no magnético. El hierro se concentra en el producto magnético de las clases media y gruesa a 0,05 A. Sin embargo, en la clase fina la aplicación de un campo magnético no ejerce efectos significativos.

1.3.4 Tratamiento de las colas por métodos gravitacionales

García (1988) propone un esquema para el tratamiento futuro de las colas de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, el mismo consiste en el cribado, elutriación, separación magnética, mesa de concentración y esclusa. El

elutriador trabaja con flujo de agua y separa la fracción -0,180 mm, en el reboso se obtiene la fracción -0,03 y en el fondo +0,03. A la mesa de concentración es enviado el producto no magnético obtenido en la separación magnética, en ella se obtienen 3 productos, la fracción pesada, intermedia y ligera. Finalmente estas son sometidas a la separación en la exclusiva con el objetivo de lograr un concentrado de cromita, plantea además que la separación gravimétrica es la vía fundamental para el aprovechamiento de las colas desde el punto de vista económico y tecnológico. La desventaja de la investigación consiste en la aplicación de un proceso complejo pues emplean diferentes instalaciones experimentales.

Kriboi en el 1992 determina las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las muestras iniciales de las colas de Nicaro, en la cual utiliza 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. En la investigación los procesos gravitacionales empleados solo se utilizan para deslamar.

Álvarez (1996) propone un esquema tecnológico para la obtención de cromo espinela, el mismo consiste en la separación por hidrociclones, separación magnética, clasificador de espiral y mesas de concentración. Concluye que la vía fundamental para el aprovechamiento de las colas desde el punto de vista económico y tecnológico son los procesos gravitacionales.

En el 2013 Correa en su investigación determinó del comportamiento denso-granulométrico y químico de la cola de la empresa de “Comandante Ernesto Che Guevara” mediante la separación por elutriación utilizando el agua como fluido, con la combinación de las propiedades densidad y granulometría. Determinó la composición química a través de la técnica de Fluorescencia de rayos X. Por otra parte, resultaron que a 0,02 mm y 3600 kg/m^3 el hierro se concentra en el reboso, mientras en 0,04 mm y 2800 kg/m^3 de las arenas se enriquece el manganeso y a 3600 kg/m^3 el cobalto, cinc y cromo. En 0,08 mm a 2800 kg/m^3 el níquel, magnesio y silicio alcanzan sus mayores concentraciones en el reboso. Los resultados obtenidos señalaron la posibilidad de separar las

colas por vía húmeda, pero no se llegó a experimentar los productos finales para evaluar la recuperación de los elementos de interés contenidos en las colas.

Salom ya en el 2015 investigó la recuperación de níquel y cobalto en las colas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, utilizando la separación hidro- gravitacional (elutriación) y luego lixiviando buscando vías de tratamiento de las colas. Determinó la composición química a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X. Los resultados obtenidos señalaron que a través del proceso de elutriación el níquel se concentra en las arenas de tamaño mayores que 0,04 mm y densidad de 3600 kg/m³ con valor 0,46 % de níquel y al someterlas a la lixiviación ácida las arenas mayores que 0,04 mm poseen una extracción de 72,5 % de níquel y además en el producto de reboso con tamaño menor que 0,02 mm se obtuvo una extracción de 49 % de cobalto.

Fernández en el mismo año investigó sobre la recuperación de metales valiosos utilizando mesas de concentración a partir de las colas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, utilizando la separación hidro - gravitacional, con tres flujos de agua y un ángulo de inclinación en la mesa de concentración de sacudidas. Determinó la composición química a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X y los resultados obtenidos señalaron que no existen diferencias significativas en la calidad de la separación de los productos obtenidos con el alimentado durante la variación del flujo de agua, por lo que no hay beneficio de las colas en las mesas de concentración.

Conclusiones del capítulo 1

1. Las investigaciones más recientes sobre las colas de la tecnología CARON han estado centradas en el tratamiento hidrometalúrgico y de beneficio de materiales, utilizando como métodos de beneficio la separación magnética y la separación gravitacional, pero hasta el momento existen limitaciones tecnológicas para el aprovechamiento con eficiencia de las especies metálicas existentes.
2. No se ha estudiado con profundidad el comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” al variar el flujo de agua y el ángulo de inclinación en las mesas de concentración.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Teniendo en cuenta los conocimientos alcanzados podemos decir que el avance de toda investigación requiere de la utilización de un instrumento metodológico para la obtención de resultados confiables. Además la adecuada selección de los métodos y materiales empleados certifican los resultados logrados, 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 Métodos empleados en la investigación

Toda investigación implica de la utilización de métodos que viabilicen el cumplimiento del proceso investigativo, además, es la forma de abordar la realidad, de estudiar los fenómenos de la naturaleza, la sociedad y el pensamiento, con el propósito de descubrir la esencia de los mismos y sus relaciones.

En el desarrollo de la investigación se aplican los siguientes métodos:

Método de análisis y síntesis: El análisis es el proceso por el cual se examina un objeto en sus partes dirigido a lo individual, mientras que la síntesis es la unión de lo que se adquiere en el análisis, es decir, nos aporta el todo, lo general.

En la investigación el método se emplea para analizar los diferentes procesos gravitacionales aplicados a las colas, específicamente en las mesas de concentración, la cual se encarga de concentrar las especies metálicas que componen la muestra y de esta forma estudiar su posible futuro aprovechamiento.

Método histórico-lógico: El método histórico-lógico permite indagar en los referentes teóricos que identifican las relaciones entre el proceso cognoscitivo lógico y el desarrollo histórico de los procesos en su conjunto y del conocimiento en particular.

El mismo es aplicable para estudiar las colas desde sus inicios, así como el desarrollo de los procesos gravitacionales.

Método inductivo y deductivo: Es un proceso que permite la búsqueda de información, toma como referencia la relación de los aspectos generales a los particulares y viceversa.

Permite abordar los referentes teóricos que se utilizan para sustentar la indagación científica, así como las investigaciones precedentes aplicadas a las colas y a los métodos gravitacionales.

2.2 Selección y preparación de las muestras

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 NH_3 y CO_2 que contiene. Posee una densidad de 1600 a 1700 g/L (Peña, 2011).

El sólido contenido en las colas está constituido por mineral reducido, cuya densidad real es de 3,80 t/m³. Posee un predominio de las partículas finas, ya que el 60 % de ellas son inferiores a 44 μm ; y una porosidad de 42,50 % (Fernández, 2015).

La figura 2.1 muestra el esquema de trabajo utilizado, que incluye la toma de muestras para la investigación, la caracterización química y granulométrica y para los ensayos en la mesa de concentración.

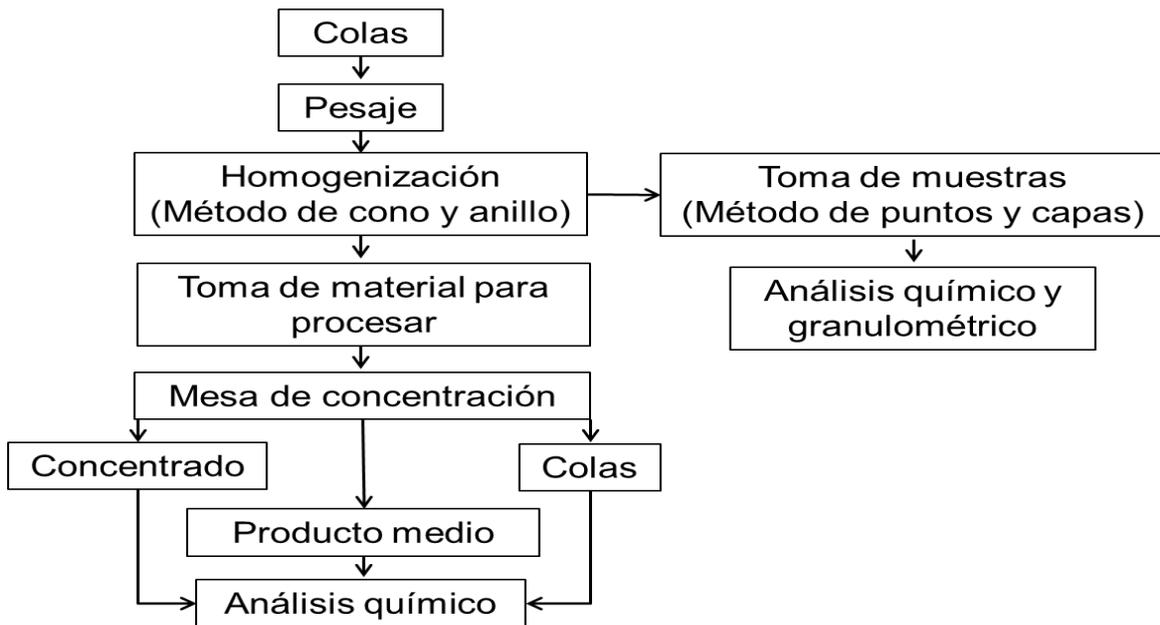


Figura 2.1 Esquema de trabajo.

Para realizar el estudio se tomó una muestra representativa de las colas de la tecnología Carbonato Amoniacal 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 homogeneización por el método del cono y el anillo, como se muestra en la figura 2.2.

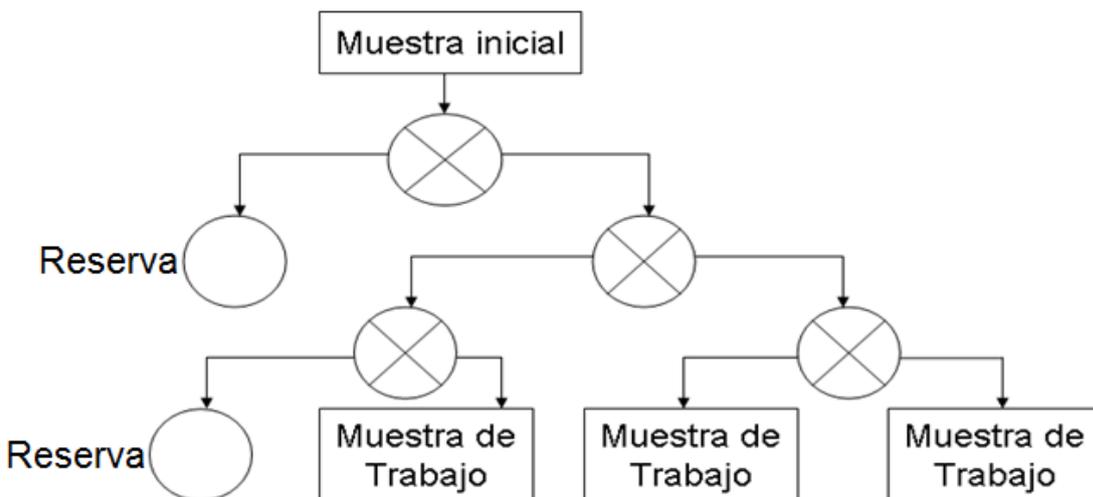


Figura 2.2 Procedimiento de homogeneización y cuarteo.

Cuarteo manual cono y anillo

Herramientas:

- ✓ Una pala
- ✓ Un cucharón de punta recta o cuchara de albañil
- ✓ Una escoba o cepillo

El procedimiento utilizado para el cuarteo manual es el siguiente:

1. Se coloca la muestra de campo sobre una superficie plana, dura y limpia, donde no pueda haber pérdida de material ni contaminación con materias extrañas.
2. Se homogeneiza el material haciendo un cono depositando cada paleada sobre la anterior y luego haciendo un anillo, seguidamente se forma nuevamente el cono.
3. Por medio de la pala, se ejerce presión sobre el vértice, aplanando con cuidado la pila hasta obtener un espesor y un diámetro uniformes. El diámetro obtenido deberá ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor del material.
4. Seguidamente se divide la pila aplanada en cuatro partes iguales con la pala o la cuchara de albañil.
5. Se separan, unen y guardan como reserva dos de las partes diagonalmente opuestas, incluyendo todo el material fino. Se puede utilizar una brocha o cepillo para incorporar el material fino a la muestra respectiva.

Se mezcla y homogeneiza el material restante y se cuarteo sucesivamente hasta reducir la muestra al tamaño requerido para las pruebas. El peso inicial de la materia prima fue de 610 kg, luego de realizar el procedimiento de homogeneización y cuarteo el peso final para las muestras es de 40 kg

En la figura 2.3 se muestra el procedimiento del cuarteo manual realizado a la cola.

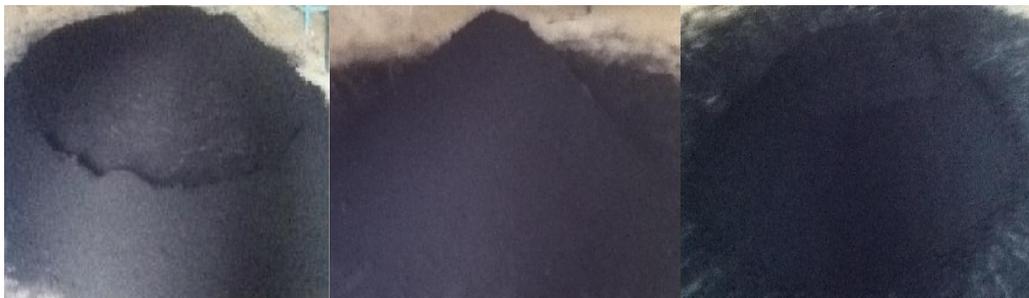


Figura 2.3 Procedimiento del cuarteo manual.

La masa de cada muestra utilizada en la mesa de concentración es de 1kg, las cuales fueron pesadas en una balanza analítica ubicada en la planta de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Los productos obtenidos en la mesa de concentración fueron sometidas a un proceso de decantación y secado térmico (100 °C) en una estufa perteneciente a los laboratorios químicos del Departamento de Metalurgia-Química del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para ser valoradas analíticamente.

2.3 Caracterización química

Para la determinación de la composición química de cada una de las muestras tomadas en esta investigación, se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X. Las mediciones fueron realizadas en el espectrómetro de fluorescencia de rayos X Axius Max, ubicado en el laboratorio analítico de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

2.3.1 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 relacionándolos con una serie de muestras patrones con que se calibró el equipo. Las mediciones se realizaron en un difractor de rayos X Phillips PW.



Figura 2.4 Equipo de FRx utilizado para la caracterización química.

2.4 Caracterización granulométrica

El análisis granulométrico constituye el elemento básico para la caracterización granulométrica de las colas objeto de estudio, este se realizó por vía húmeda, para evitar la aglomeración de las partículas más finas, seleccionando el siguiente juego de tamices según la serie de Taylor, (0,85; 0,50; 0,25; 0,15; 0,12; 0,10; 0,075; 0,044) mm. En la figura 2.5 se muestra el esquema de trabajo utilizado.

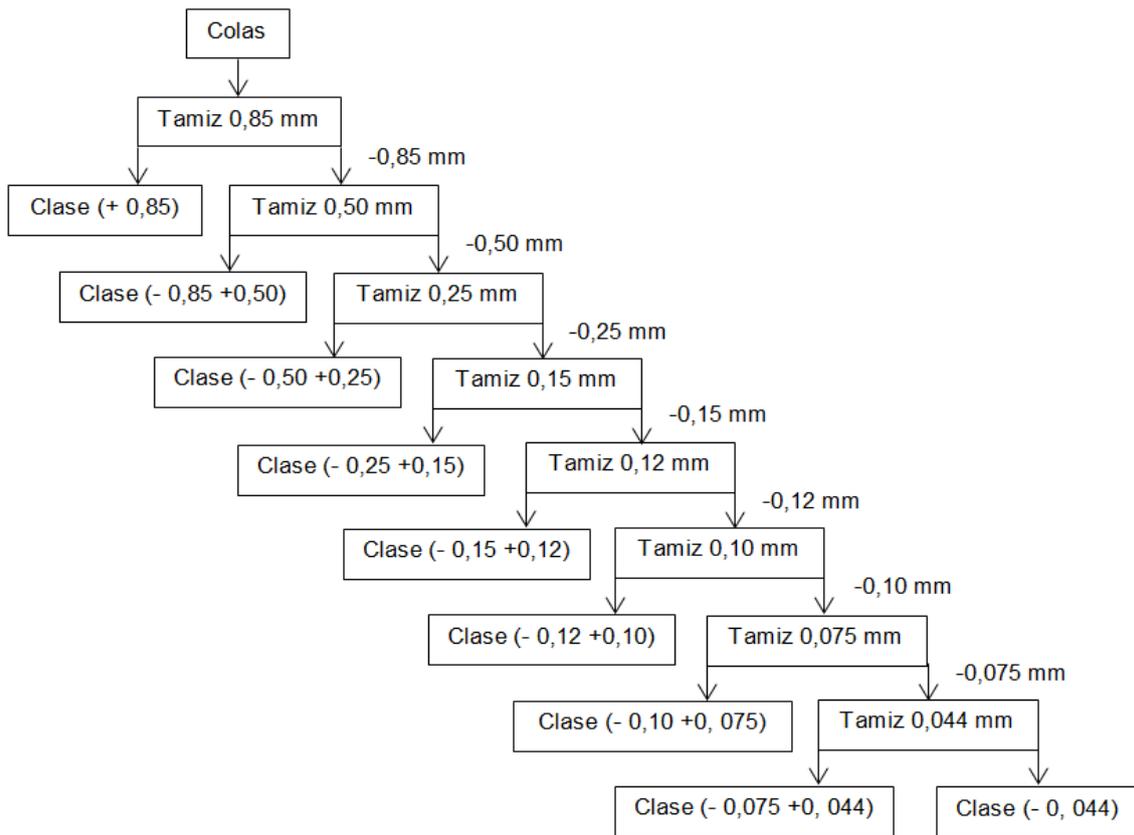


Figura 2.5. Esquema de flujo para el análisis granulométrico.

El análisis granulométrico por vía húmeda fue realizado en el cuarto de preparación de muestras del CEDINIQ, utilizando una tamizadora de laboratorio como se muestra en la figura 2.6



Figura 2.6 Tamizadora digital adaptada, modelo R.X.-29

2.5 Diseño de experimento

El diseño de experimento aplicado es el Factorial completo a tres niveles (mínimo, medio y máximo), donde las variables independientes son el flujo de agua y el ángulo de inclinación.

Consiste en un diseño del tipo:

$$N = Q^n = 3^2 = 9$$

Donde:

N : Número de experimentos

Q : Niveles tomados

n : Variables independientes

En la tabla 2.1 se muestran las combinaciones de las variables utilizadas en los experimentos.

Tabla 2.1 Combinaciones para desarrollar los experimentos.

Experimentos	Flujo de agua (l/s)	Ángulo de inclinación(°)
1	0,28	6
2	0,22	6
3	0,16	6
4	0,28	4,5
5	0,22	4,5
6	0,16	4,5
7	0,28	3
8	0,22	3
9	0,16	3

La cantidad total de experimentos es 27, pues se realiza tres replicas a cada uno.

Se tomaron estos valores de flujo de agua y ángulo de inclinación ya que según la literatura consultada, (Fomenko, T. G. 1980) para el enriquecimiento de materiales de granulometría fina, se debe utilizar un ángulo de inclinación transversal del piso de la mesa de concentración en un rango de 4 a 6⁰ y un flujo de agua a velocidades medias pequeñas del flujo, para mejorar los índices de

funcionamiento de la mesa. Además, se consideran los resultados de las investigaciones precedentes con las colas de Moa.

2.6 Metodología para determinar el flujo de agua

Para la determinación del flujo de agua a utilizar, se utilizó un beaker de 2000 ml y un cronómetro. El procedimiento se llevó a cabo de la siguiente forma:

Primeramente se calculó el tiempo de llenado del beaker para obtener el flujo deseado, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Tiempo de llenado} = \frac{\text{capacidad del beaker (L)}}{\text{flujo a utilizar (L/s)}} \quad (2.1)$$

El tiempo de llenado del beaker para cada flujo de agua se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Tiempo de llenado del beaker para cada flujo de agua.

Tiempo para el llenado del recipiente (s)	Flujo que se obtiene con un recipiente de 2 litros (L/s)
7,1	0,28
9,1	0,22
12,5	0,16

Luego se procede a llenar el beaker en el tiempo calculado para obtener el flujo deseado.

2.7 Metodología para determinar el ángulo de inclinación.

Para la determinación del ángulo de inclinación se utilizó un transportador de ángulos, el cual está formado por una pieza en forma de semicírculo graduado

con una escala en su periferia y una regla articulada en el centro. La escala está corrientemente graduada en grados.

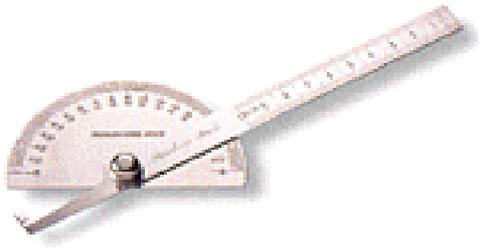


Figura 2.7 Transportador de ángulos utilizado en la medición.

Para la medición del ángulo en grados, se alinea el lado inicial del ángulo con el radio derecho del transportador (semirrecta de 0°) y se determina, en sentido contrario al de las manecillas del reloj, la medida que tiene, prolongando los brazos del ángulo por tener mejor visibilidad.

2.8 Metodología de separación en mesas de concentración.

2.8.1 Características de la mesa de concentración

Para el proceso se utilizó una mesa de concentración que está ubicada en el Laboratorio de Beneficio del ISMM. En la figura 2.8 se muestra la mesa de concentración utilizada.



Figura 2.8 Mesa de concentración utilizada en la experimentación.

A continuación se describen las características de la mesa utilizada para el desarrollo de la investigación:

- ✓ Regulador del ángulo de inclinación que permite regular hasta 10 °.
- ✓ Motor de 1,5 kw acoplado a reductor de velocidad, con transmisión de correa y polea.
- ✓ Largo de la mesa 1 m.
- ✓ Ancho de la mesa 37 cm.
- ✓ Once tablillas separadas a 2 mm.
- ✓ Altura desde el piso 87 cm.
- ✓ Tolva de alimentación con capacidad para 15 kg.
- ✓ Productividad media de la mesa 8,0 kg/h.

2.8.2 Procedimiento de separación

La experimentación se llevó a cabo en nueve etapas de trabajo, utilizando tres muestras para cada una de ellas, previamente preparadas como se describió con anterioridad. La masa de muestra fue constante (1 kg), así como también los parámetros de operación de la mesa.

Los productos obtenidos de la experimentación son los siguientes:

Concentrado: Se corresponde con las partículas más pesadas de la muestra.

Producto medio: correspondiente a las partículas de densidad media.

Colas finales: compuesta por las partículas más ligeras y que son arrastradas con mayor facilidad por el flujo de agua.

Se determina la masa de cada uno de los productos y se toma una muestra para la caracterización química, lo cual permite calcular la eficiencia del proceso en términos de recuperación de especies metálicas.

2.8.3 Indicadores tecnológicos.

Salida de los productos (%). Es la relación en peso de los productos obtenidos y la cantidad inicial de materia prima alimentada al proceso.

$$\gamma_n = \frac{P_n}{P_i} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Donde:

γ_n : Salida de los productos (%)

P_n : Masa de los productos (g)

P_i : Masa inicial (g)

Recuperación (%). Es la relación entre la cantidad de un producto n y la cantidad inicial; es una medida de la efectividad del proceso. Para el caso de la recuperación de especies metálicas en los productos obtenidos:

$$\varepsilon_n = \frac{\gamma_n \cdot \beta_n}{\beta_i} \quad (2.3)$$

Donde:

ε_n : Recuperación de especies metálicas en los productos

β_n : Contenido de especies metálicas en los productos

β_i : Contenido de especies metálicas en la materia prima

γ_n : Salida de los productos (%).

2.9 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 los productos obtenidos en la experimentación, se realizó en una estufa de control digital modelo DH6-9146A, ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico del ISMM, la misma se muestra a continuación.



Figura 2.9 Estufa de control digital 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, con una capacidad máxima de 120 g y una desviación de 1 mg.

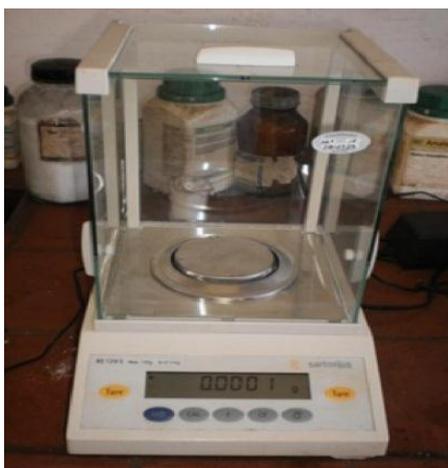


Figura 2.10 Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.

Conclusiones del capítulo 2

3. La muestra de colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” seleccionada para su caracterización se considera representativa con respecto a su volumen total.
4. Las técnicas analíticas empleadas para la caracterización físico-química, fueron aplicadas en instalaciones y equipos que garantizan la confiabilidad de los resultados.
5. El proceso de beneficio gravitacional en mesas de concentración fue utilizado para el tratamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

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 las técnicas de beneficio, debido a que aportan la información necesaria sobre el comportamiento de los diferentes elementos que la componen. En la presente tesis se aplica uno de los métodos gravimétricos (mesas de concentración), en el que se combinan densidad y granulometría con el fin de un futuro aprovechamiento de las especies metálicas contenidas en estos desechos.

3.1 Características de las colas

Las características de las colas se analizan a través de dos de sus propiedades fundamentales: densidad y granulometría; las que permiten valorar los procedimientos y alternativas tecnológicas para su tratamiento futuro. A continuación se exponen los resultados obtenidos experimentalmente.

3.1.1 Características químicas

En las investigaciones metalúrgicas es imprescindible tener conocimiento de las características químicas del material que es estudiado para valorar cualitativa y cuantitativamente su comportamiento durante un proceso determinado. La composición química se determinó tanto a la muestra de cola inicial como a los productos obtenidos en cada etapa del proceso. En la tabla 3.1 se muestra la composición química de la muestra inicial.

Tabla 3.1 Composición química promedio de la cola inicial (%).

Elementos	Ni	Co	Fe	Mn	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
Contenido Promedio (%)	0,40	0,075	43,225	0,638	7,290	12,315	5,035

Al observar la tabla se puede decir que los mayores contenidos corresponden a los elementos hierro, silicio, aluminio y magnesio, y en menor cuantía, manganeso, cobalto y níquel; resultados similares fueron obtenidos en otras investigaciones (Rojas & Turro 2003; Hernández 2011; García 2011 y Loyola 2012). En tal sentido se pueden considerar las colas como un mineral de hierro que contiene más del 40 % del elemento; por tanto, es una reserva potencial para los productores de acero a nivel mundial. De igual manera contienen cantidades bajas de níquel y cobalto, dado por la eficiencia tecnológica de la planta que los procesan, no obstante, el contenido de estos puede ser de interés económico, por lo que se realizan numerosos trabajos de investigación para su recuperación.

3.1.2 Características granulométricas

Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Composición granulométrica de las colas.

Clases de tamaño (mm)	Peso (g)	Salida (%)	Salida acumulativa según Cernido (%)
+ 0,85	0,95	0,19	100,00
- 0,85 + 0,5	4,35	0,87	99,81
- 0,5 + 0,25	13,60	2,72	98,94
- 0,25 + 0,15	40,69	8,14	96,22
- 0,15 + 0,12	2,10	0,42	88,08
- 0,12 + 0,10	15,44	3,09	87,66
- 0,10 + 0,075	58,93	11,79	84,57
- 0,075 + 0,044	7,15	1,43	72,78
-0,044	356,67	71,35	71,35

En la tabla 3.2 se aprecia que la clase menor de 0,075 mm representa el 72,78 %. Sin embargo, existe un predominio de las partículas menores de 0,044 mm que representan el 71,35 % de todo el material, evidenciándose una

distribución de las partículas finas en todo el espectro granulométrico de las colas estudiadas. Tal aspecto corrobora los resultados alcanzados por Turro (2002), Rojas y Turro (2003), Hernández (2011) y Peña (2011) en sus trabajos con las colas objeto de la presente investigación.

3.2 Resultados de los ensayos en la mesa de concentración. Composición química de los productos obtenidos.

A continuación se muestran los principales resultados de la investigación, así como el análisis realizado con cada una de las variables de estudio. En la tabla 1 de los anexos se muestran los productos obtenidos en la experimentación, así como las masas de cada uno al variar los parámetros operacionales de la mesa.

A continuación se muestra la composición química de cada uno de los productos obtenidos en los experimentos en la mesa de concentración.

Tabla 3.3 Resultados de la composición química media de las especies metálicas en el concentrado para cada experimento (%).

Experimentos	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr	Mn	Flujo de agua (L/s)	Ángulo de inclinación (°)
1	0,37	0,072	40,50	10,30	4,62	6,97	1,72	0,61	0,28	6,00
2	0,38	0,072	40,63	10,34	4,57	7,04	1,69	0,61	0,22	6,00
3	0,37	0,073	40,60	10,08	4,35	7,04	1,70	0,61	0,16	6,00
4	0,39	0,073	40,47	11,76	4,58	7,10	1,69	0,62	0,28	4,50
5	0,39	0,072	40,33	11,90	4,66	7,13	1,68	0,62	0,22	4,50
6	0,39	0,072	40,43	11,82	4,59	7,14	1,70	0,62	0,16	4,50
7	0,39	0,073	40,57	10,04	4,45	6,94	1,75	0,61	0,28	3,00
8	0,39	0,072	40,53	11,76	4,62	7,13	1,68	0,62	0,22	3,00
9	0,38	0,072	40,53	11,05	4,43	7,07	1,69	0,61	0,16	3,00

En la tabla 3.3 se puede observar que los contenidos de las especies metálicas no varían prácticamente en el concentrado con la variación de los parámetros estudiados. Solo en los casos del óxido de aluminio y óxido de silicio, se aprecia un incremento del contenido de estos con el flujo de agua cuando el ángulo es de 3 grados.

Tabla 3.4 Resultados de la composición química media de las especies metálicas en el producto medio para cada experimento (%).

Experimentos	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr	Mn	Flujo de agua (L/s)	Ángulo de inclinación (°)
1	0,38	0,072	40,67	11,47	4,35	7,21	1,72	0,62	0,28	6,00
2	0,38	0,073	40,53	11,61	4,43	7,21	1,71	0,62	0,22	6,00
3	0,39	0,073	40,47	11,84	4,60	7,15	1,70	0,62	0,16	6,00
4	0,39	0,072	40,30	12,10	4,87	7,09	1,67	0,62	0,28	4,50
5	0,39	0,072	40,77	11,62	4,52	7,20	1,70	0,62	0,22	4,50
6	0,38	0,072	40,57	11,97	4,73	7,18	1,68	0,62	0,16	4,50
7	0,39	0,073	40,70	11,42	4,42	7,17	1,71	0,61	0,28	3,00
8	0,39	0,072	39,83	12,22	5,00	7,04	1,69	0,61	0,22	3,00
9	0,39	0,072	39,77	12,33	5,09	7,03	1,66	0,62	0,16	3,00

En el caso del producto medio (tabla 3.4), tampoco es significativa la influencia de los parámetros operacionales en los contenidos de las especies metálicas. Solo es apreciable una variación de los contenidos de hierro, óxido de magnesio y óxido de silicio cuando varía el flujo de agua para un ángulo de inclinación de la mesa de 3 grados.

Tabla 3.5 Resultados de la composición química media de las especies metálicas en las colas para cada experimento (%).

Experimentos	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Flujo de agua(L/s)	Ángulo de inclinación(o)
1	-	-	-	-	-	0,28	6,00
2	-	-	-	-	-	0,22	6,00
3	-	-	-	-	-	0,16	6,00
4	0,38	0,071	39,87	11,19	4,25	0,28	4,50
5	0,38	0,073	39,99	11,17	4,23	0,22	4,50
6	0,38	0,074	40,45	11,03	4,07	0,16	4,50
7	0,38	0,070	39,33	11,32	4,27	0,28	3,00
8	0,38	0,071	39,97	11,19	4,21	0,22	3,00
9	0,39	0,071	39,47	11,00	4,12	0,16	3,00

Al observar la composición química del producto cola en la tabla 3.5, se puede constatar que no hay apreciable variación del contenido de las especies metálicas en los diferentes experimentos.

No obstante, la observación de la composición química de los productos obtenidos en cada experimento no da información sobre las posibles recuperaciones de estas especies metálicas en ellos, con la influencia del flujo de agua y el ángulo de inclinación. Es necesario considerar entonces, las salidas de cada uno los productos, la cual se determinó por la expresión 2.2 considerando las masas obtenidas que se muestran en la tabla 1 de los anexos.

Así mismo, las recuperaciones de las especies metálicas en los productos se determinaron a través de la expresión 2.3.

A continuación se analizan los aspectos antes señalados como indicadores tecnológicos del beneficio.

3.3 Principales indicadores tecnológicos

Los principales indicadores tecnológicos que se tienen en cuenta en la investigación son las salidas de los productos y las recuperaciones de las especies metálicas, cuando se varía el flujo de agua y el ángulo de inclinación. Lo anterior se ilustra a continuación.

3.3.1 Salida de los productos

La influencia de las variables estudiadas en las salidas de los productos de la experimentación, se reflejan en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

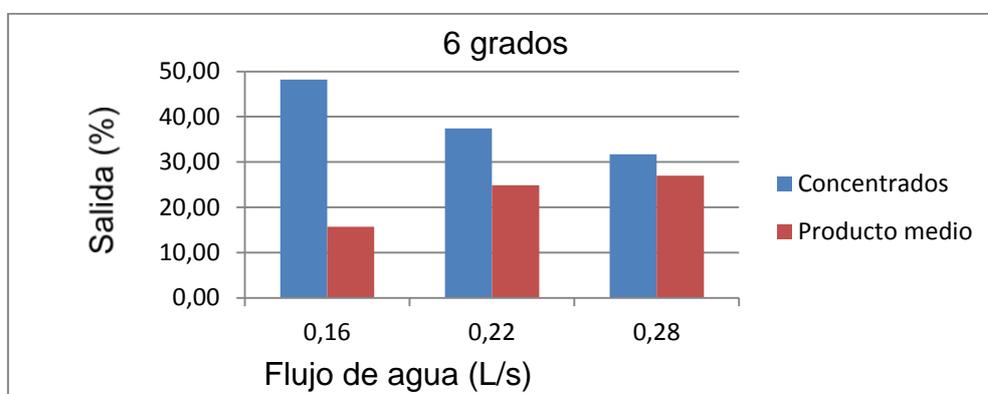


Figura 3.1 Salida de los productos para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de la mesa de concentración de 6 grados.

Al analizar la influencia de los diferentes flujos de agua y ángulos de inclinación utilizados en la mesa de concentración, se puede observar que al aumentar el flujo de agua, la salida del concentrado disminuye y la del producto medio aumenta al utilizar ángulos de 6 y 4,5 grados, aumentando la salida de cola cuando se utiliza 4,5 grados de inclinación de la mesa. Se observa también que cuando el ángulo es de 6 grados no se obtiene el producto cola y la salida del concentrado supera la salida del producto medio.

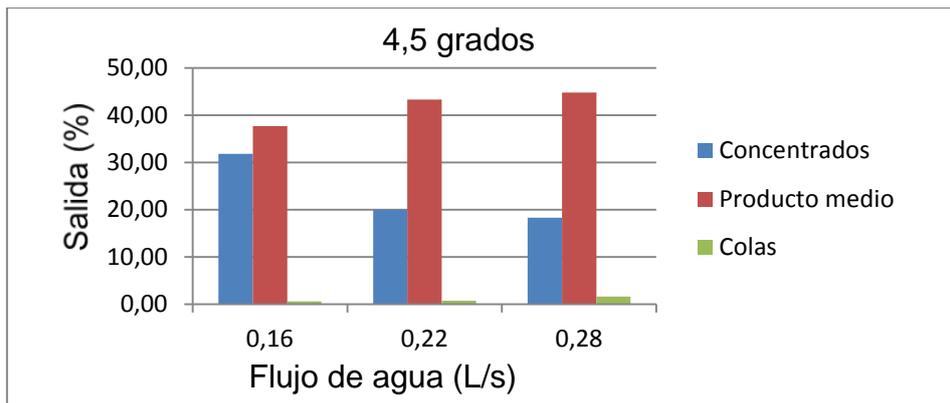


Figura 3.2 Salida de los productos para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de la mesa de concentración de 4,5 grados.

Cuando el ángulo de inclinación es de 3 grados se produce un incremento de la salida del concentrado y de la cola al aumentar el flujo de agua; no ocurre así para el producto medio, el cual disminuye al aumentar el flujo aunque las salidas que se obtienen de este producto son superiores a las de los dos productos restantes para el mismo ángulo que se analiza. El incremento de la salida del producto medio respecto a los productos concentrado y cola es similar cuando el ángulo de inclinación es de 4,5 grados.

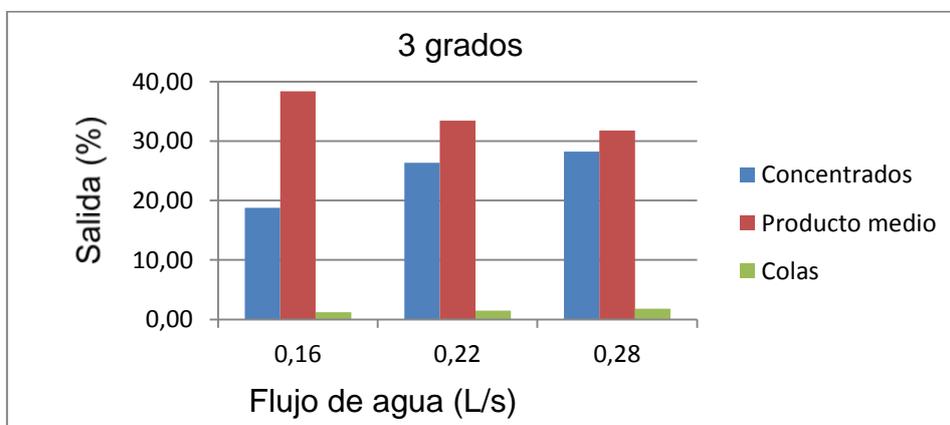


Figura 3.3 Salida de los productos para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de la mesa de concentración de 3 grados.

Este comportamiento se debe a que el aumento del ángulo de inclinación del piso de la mesa de concentración provoca la suspensión de los granos más gruesos, además, los granos minerales transportados por el flujo de agua en la

mesa de concentración se mueven a saltos, elevándose a una altura tanto mayor sobre el fondo de la mesa cuanto mayor sea la velocidad media del flujo y menor el diámetro de los granos.

3.3.2 Recuperación de las especies metálicas en los productos

Las siguientes figuras muestran las recuperaciones de las especies metálicas en cada uno de los productos. Para la elaboración de las mismas se utilizaron los valores de recuperaciones que se muestran en la tabla 3 de los anexos, calculados por la expresión 2.3.

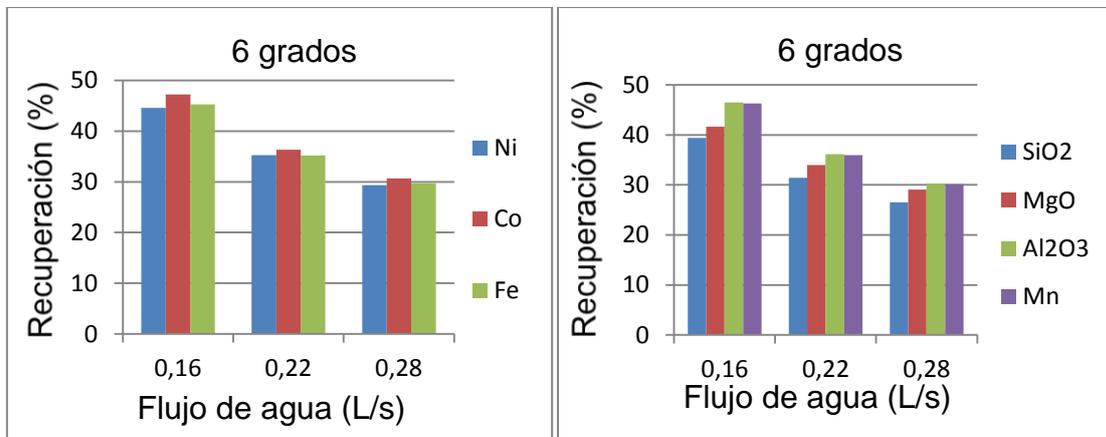


Figura 3.4 Recuperación de las especies metálicas en el concentrado para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 6 grados.

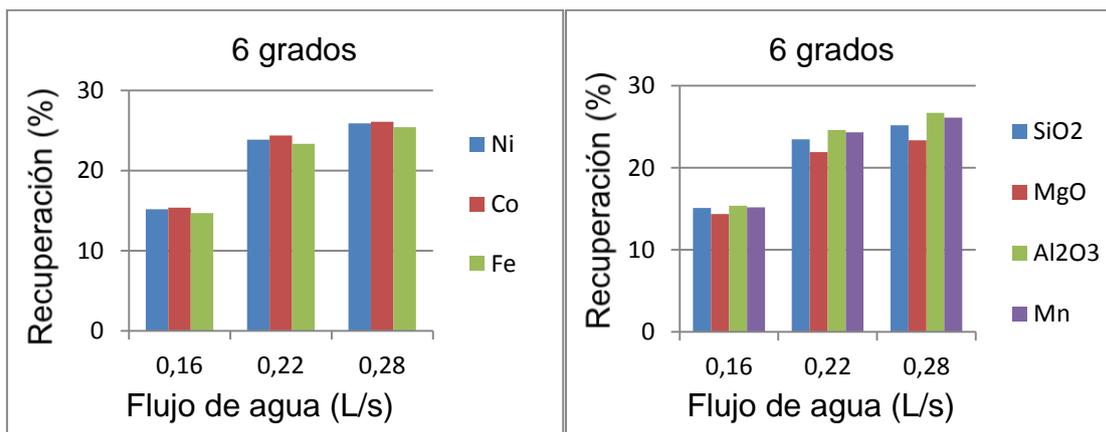


Figura 3.5 Recuperación de las especies metálicas en el producto medio para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 6 grados.

Con un ángulo de inclinación en la mesa de concentración de 6 grados, las mejores recuperaciones se obtienen en el concentrado, para cualquier flujo de agua. No obstante, cuando disminuye el flujo de agua se aprecia un incremento en las recuperaciones, obteniéndose las mejores con un flujo de 0,16 L/s, con valores superiores a 44,5 % para todas las especies metálicas, excepto para el SiO₂ (39,43 %) y MgO (41,66 %).

En el producto medio, las recuperaciones incrementan cuando aumenta el flujo de agua en la mesa de concentración, pero no supera el 30 % de ninguna de las especies metálicas.

En las figuras 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran las recuperaciones de las especies metálicas cuando el ángulo de inclinación es 4,5 grados. Se aprecia que a diferencia de los analizados anteriormente, cuando el ángulo es de 4,5 grados se obtienen los tres productos de la experimentación.

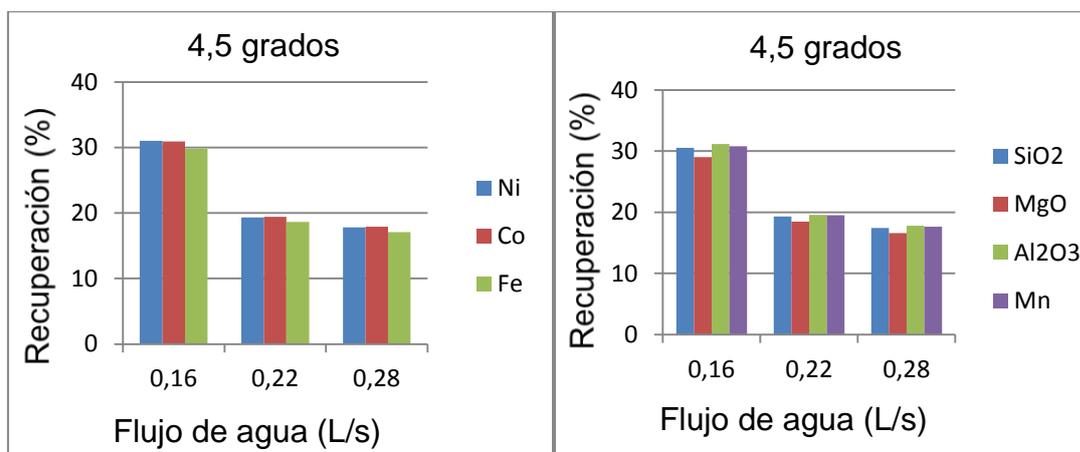


Figura 3.6 Recuperación de las especies metálicas en el concentrado para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 4,5 grados.

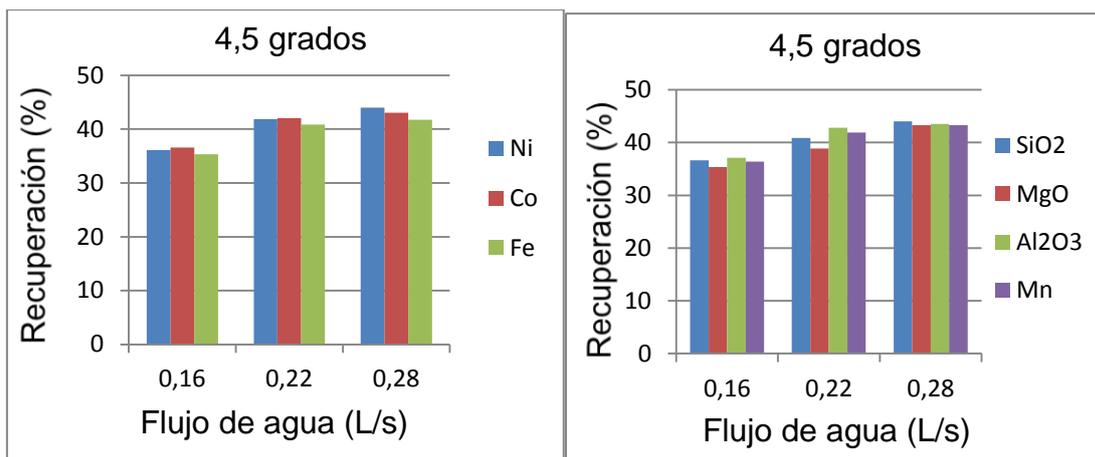


Figura 3.7 Recuperación de las especies metálicas en el producto medio para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 4,5 grados.

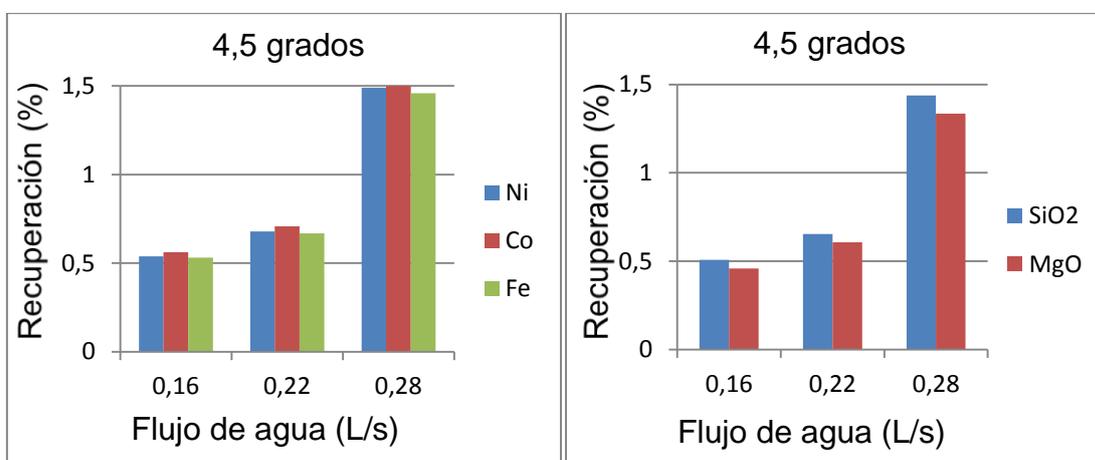


Figura 3.8 Recuperación de las especies metálicas en las colas para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 4,5 grados.

Al analizar las recuperaciones para los diferentes flujos de agua utilizados, se puede concluir que las mejores se alcanzan en el producto medio, que aumentan cuando el flujo de agua aumenta de 0,16 a 0,28 L/s. Se evidencia que los mejores valores se obtienen cuando el flujo de agua es de 0,28 L/s, entre 43 % y 44 % para todas las especies, excepto para el Fe (41,734 %). En el caso del concentrado las recuperaciones de las especies metálicas aumentan con la disminución del flujo de agua, aunque no superan el 38 %.

Al analizar las recuperaciones que se alcanzan cuando el ángulo de inclinación es 3 grados (figuras 3.9, 3.10 y 3.11), se puede constatar que se obtienen los tres productos de la experimentación. Las recuperaciones de las especies metálicas en el concentrado y en las colas incrementan con el aumento del flujo de agua pero no superan las obtenidas en el producto medio, que aumentan con la disminución del flujo de agua. En ninguno de los casos las recuperaciones superan el 40 %.

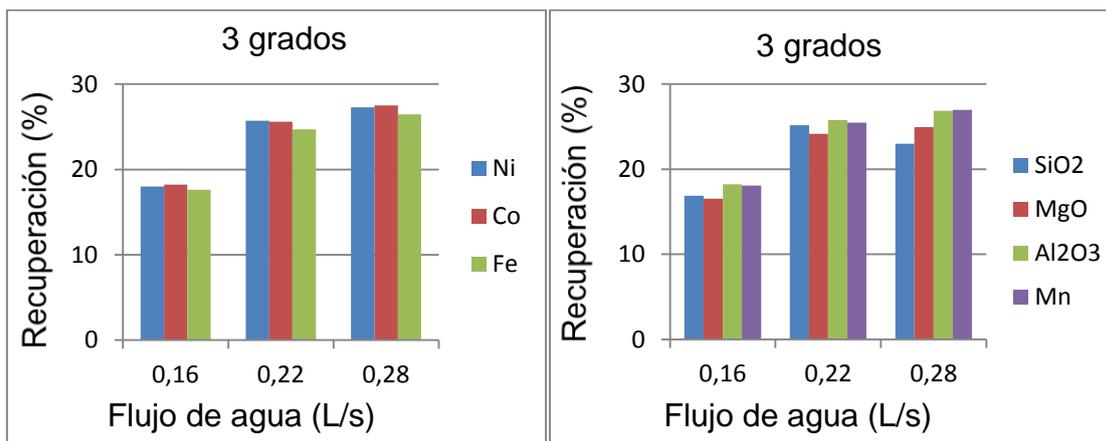


Figura 3.9 Recuperación de las especies metálicas en el concentrado para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 3 grados.

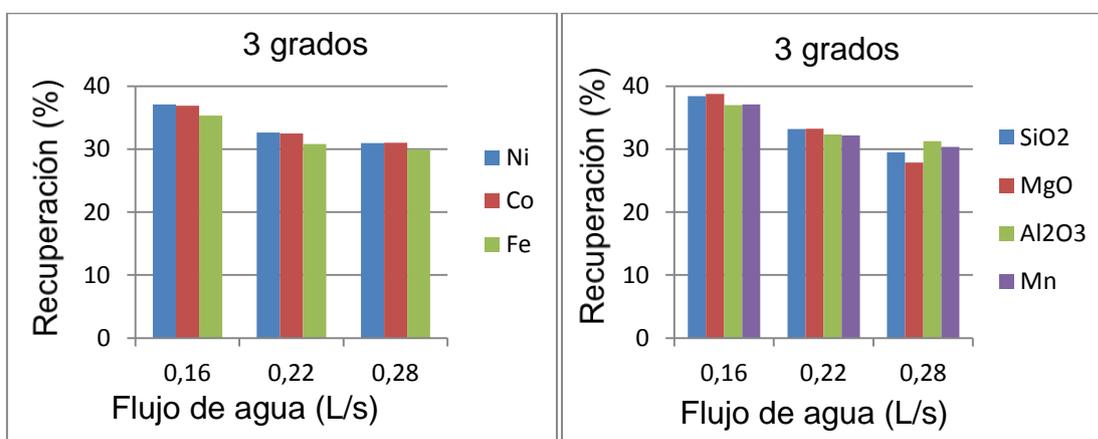


Figura 3.10 Recuperación de las especies metálicas en el producto medio para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 3 grados.

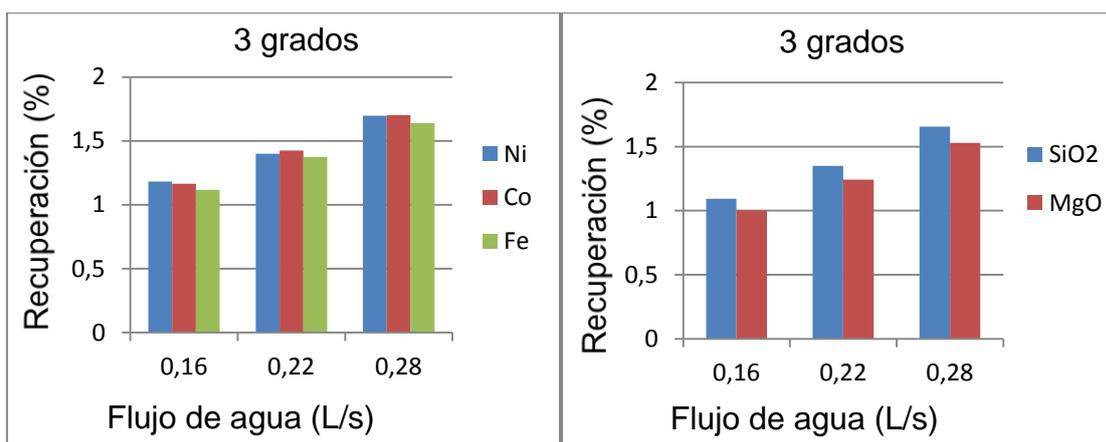


Figura 3.11 Recuperación de las especies metálicas en las colas para cada uno de los flujos de agua y un ángulo de inclinación de 3 grados.

En resumen, los mejores valores de recuperaciones de las especies metálicas se obtienen en el producto concentrado cuando el ángulo de inclinación es 6 grados y el flujo es de 0,16 L/s.

3.4 Análisis estadístico de los experimentos

La modelación estadístico matemática se emplea para obtener la ecuación del modelo de regresión ajustada a los contenidos de cada uno de los elementos en los productos de la investigación. A continuación se describen los efectos principales y la respuesta estimada en cada caso.

3.4.1 Efectos principales y superficie de respuesta estimada de los elementos en el concentrado.

En la figura 3.12 se muestran los efectos principales para el hierro en el concentrado. Se observa una disminución en el contenido de hierro al aumentar el flujo de agua desde 0,16 hasta 0,22 L/s y aumenta cuando el flujo varía desde 0,22 hasta 0,28 L/s. En lo concerniente al ángulo de inclinación de la mesa, el contenido de este elemento disminuye cuando el ángulo varía de 3 hasta 4,5 grados; a partir de este valor y hasta 6 grados, se aprecia un

incremento del contenido del metal de 0,17 %. En la figura 3.13 se muestra la superficie de respuesta estimada donde se observa un comportamiento parabólico cóncavo de la composición hierro, con relación al flujo de agua y al ángulo de inclinación.

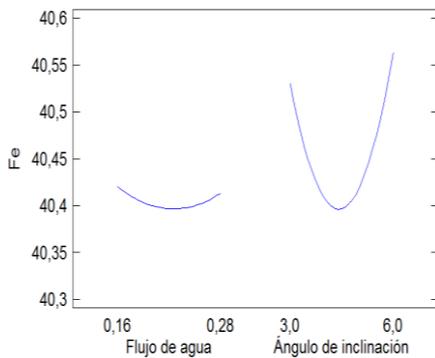


Figura 3.12 Efectos principales

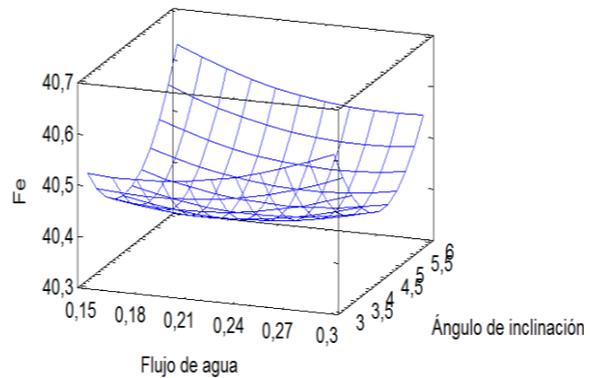


Figura 3.13 Superficie de respuesta

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el hierro está representada por:

$$Fe = 41,5928 - 0,75 \cdot F - 0,503333 \cdot A + 5,55556 \cdot F^2 + 0,388889 \cdot F \cdot A + 0,0666667 \cdot A^2$$

Donde:

F: es el flujo de agua (L/s)

A: es el ángulo de inclinación

El contenido de óxido de silicio en el concentrado según el gráfico de efectos principales, aumenta al incrementar el flujo de agua de 0,16 hasta 0,22 L/s, y disminuye cuando el flujo aumenta desde 0,22 hasta 0,28 L/s. En el caso del ángulo de inclinación, el contenido aumenta cuando incrementa el ángulo de 3 hasta 4,5 grados, disminuyendo cuando varía desde 4,5 hasta 6 grados. Se observa un comportamiento parabólico convexo de la composición óxido de silicio, con relación al flujo de agua y al ángulo de inclinación en la superficie de respuesta estimada mostrada en la figura 3.15

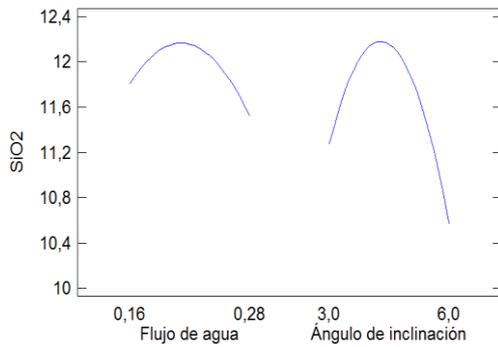


Figura 3.14 Efectos principales

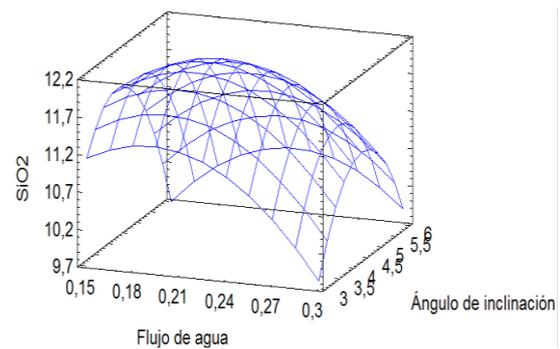


Figura 3.15 Superficie de respuesta

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el óxido de silicio está representada por:

$$SiO_2 = -0,573796 + 42,3565 \cdot F + 3,93833 \cdot A - 136,574 \cdot F^2 + 3,41667 \cdot F \cdot A - 0,547407 \cdot A^2$$

En la figura 3.16 se observa como el contenido de cobalto disminuye al incrementar el flujo de agua de 0,16 hasta 0,22 L/s, para luego aumentar cuando el flujo aumenta desde 0,22 hasta 0,28 L/s. En la figura 3.17 se muestra la superficie de respuesta estimada donde se observa un comportamiento parabólico cóncavo de la composición cobalto, con relación al flujo de agua y al ángulo de inclinación en la superficie de respuesta estimada.

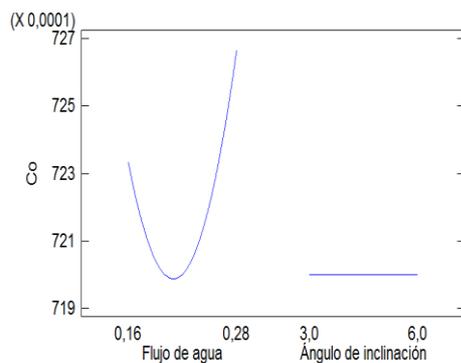


Figura 3.16 Efectos principales

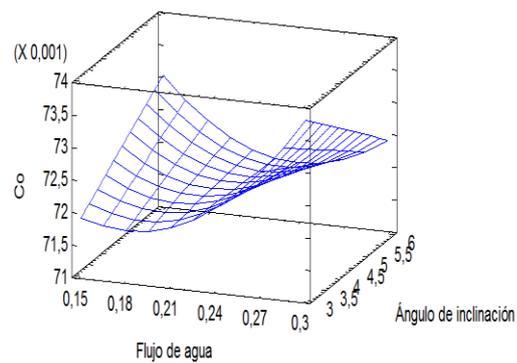


Figura 3.17 Superficie de respuesta

El modelo de regresión para el cobalto está representado por la siguiente ecuación ajustada:

$$Co = 0,0726111 - 0,0333333 \cdot F + 0,00122222 \cdot A + 0,138889 \cdot F^2 - 0,00555556 \cdot F \cdot A + 0,0 \cdot A^2$$

Los efectos principales y la superficie de respuesta en el concentrado para los restantes elementos, se muestran en las figuras 1 - 10 de los anexos. Se presenta además, el modelo de regresión ajustada en cada caso.

3.4.2 Efectos principales y superficie de respuesta estimada de los elementos en el producto medio.

En la figura 3.18 se puede apreciar los efectos principales para el hierro en el producto medio, donde se observa un aumento del contenido al incrementar el flujo de agua desde 0,16 hasta 0,28 L/s y el ángulo desde 3 hasta 4,5 grados. Se observa un comportamiento parabólico de la composición cobalto, con relación al flujo de agua y al ángulo de inclinación en la superficie de respuesta estimada.

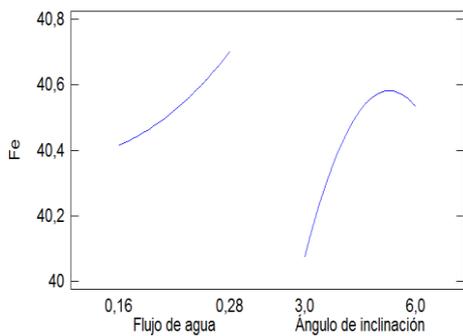


Figura 3.18 Efectos principales

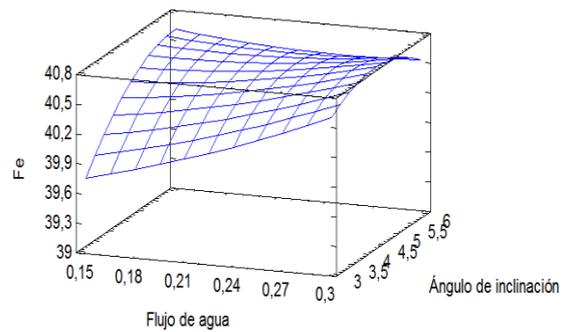


Figura 3.19 Superficie de respuesta

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el hierro está representada por:

$$Fe = 35,8321 + 7,03241 \cdot F + 1,47167 \cdot A + 10,1852 \cdot F^2 - 2,02778 \cdot F \cdot A - 0,097037 \cdot A^2$$

Donde:

F: es el flujo de agua (L/s)

A: es el ángulo de inclinación

Los efectos principales para el óxido de silicio en el producto medio se muestran a continuación, observándose una disminución del contenido al incrementar el flujo de agua desde 0,16 hasta 0,28 L/s y el ángulo de

inclinación desde 3 hasta 6 grados. En la superficie de respuesta mostrada se puede apreciar un comportamiento prácticamente planar de la composición óxido de silicio con relación al flujo de agua y el ángulo de inclinación.

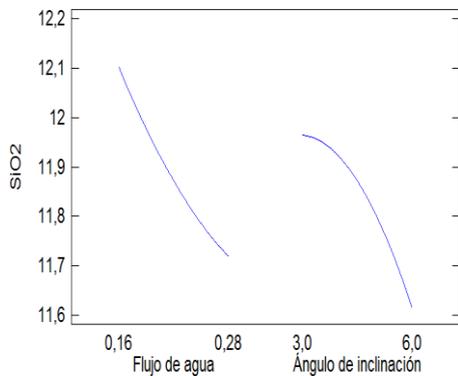


Figura 3.20 Efectos principales

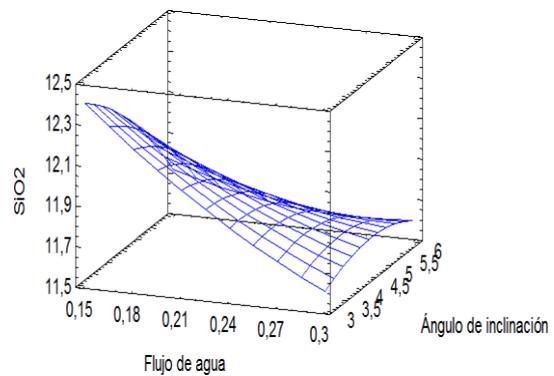


Figura 3.21 Superficie de respuesta

Ecuación del modelo de regresión ajustada para el óxido de silicio:

$$SiO_2 = 14,3643 - 14,6296 \cdot F - 0,12 \cdot A + 10,6481 \cdot F^2 + 1,5 \cdot F \cdot A - 0,0362963 \cdot A^2$$

El contenido de cobalto se mantiene constante al incrementar el flujo de agua desde 0,16 hasta 0,28 L/s. No siendo así cuando aumenta el ángulo de inclinación, pues el contenido disminuye en el intervalo de 3 hasta 4,5 grados y luego aumenta en el intervalo de 4,5 hasta 6 grados. En la figura 3.23 se muestra la superficie de respuesta estimada de la composición del cobalto con relación al flujo de agua y al ángulo de inclinación, el cual tiene un comportamiento parabólico.

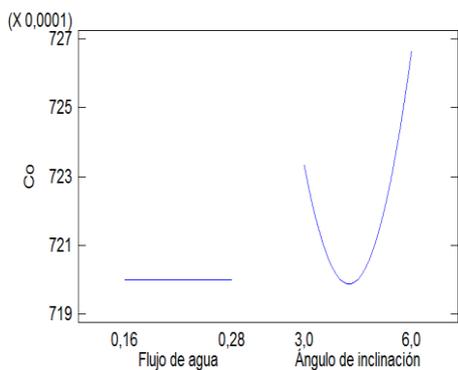


Figura 3.22 Efectos principales

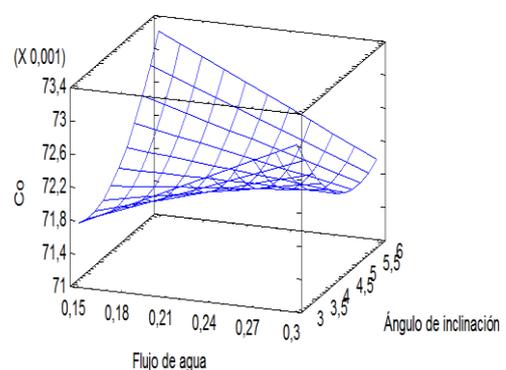


Figura 3.23 Superficie de respuesta

El modelo de regresión para el cobalto está representado por la siguiente ecuación ajustada:

$$Co = 0,0705 + 0,025 \cdot F - 0,000666667 \cdot A + 0,0 \cdot F^2 - 0,00555556 \cdot F \cdot A + 0,000222222 \cdot A^2$$

Los efectos principales y la superficie de respuesta en el producto medio de los restantes elementos se muestran en las figuras 11 - 20 de los anexos. Se presenta además, el modelo de regresión ajustada en cada caso.

Conclusiones del capítulo 3

1. Las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” están caracterizadas por contenidos de Fe de 43,225 %. Mayoritariamente se encuentran también el Al_2O_3 , SiO_2 y MgO con contenidos de 7,29 %, 12,31 % y 5,035 % respectivamente.
2. Granulométricamente, estas colas están constituidas por partículas menores de 0,044 mm (71,35%), lo que evidencia una distribución de las partículas finas en todo el espectro granulométrico del material.
3. Cuando se realiza la experimentación variando el flujo de agua y manteniendo constantes los ángulos de inclinación, las salidas de los productos que se obtienen en la mesa de concentración varían de la forma siguiente:
 - ✓ Cuando el ángulo es de 6 grados solo se obtienen dos productos: concentrado y producto medio. La salida del concentrado supera la salida del producto medio, pero disminuye con el aumento del flujo de agua.
 - ✓ Cuando el ángulo es de 4,5 grados se obtienen los tres productos. Las salidas del producto medio superan las salidas de los restantes productos (concentrado y colas), para todos los flujos de agua utilizados.
 - ✓ La salida del producto medio es superior a las salidas de los productos restantes cuando el ángulo es de 3 grados, disminuyendo con el aumento del flujo de agua de forma contraria a como sucede con este producto cuando el ángulo es de 4,5 grados.
4. Las recuperaciones de las especies metálicas están en función de los contenidos de estas en los productos y de las salidas de cada producto cuando se varía el flujo de agua para cada ángulo de inclinación de la mesa. Los mejores valores de recuperaciones (entre 44,576 % y 47, 220 %) se obtienen para un ángulo de 6 grados y un flujo de 0,16 L/s en el concentrado, excepto para el SiO_2 y para el MgO . Resaltan entre ellos 47,22 % de recuperación para el cobalto, 46,53 % para el Al_2O_3 y 46,32 % para el Mn, en tanto, la recuperación del Fe es de 45,26 %.

CONCLUSIONES FINALES

De la aplicación del beneficio gravitacional en mesas de concentración para el tratamiento de las colas del proceso CARON se concluye que: las mejores recuperaciones (entre 44,576 % y 47,220 %) de las especies metálicas, se logran en el concentrado con el menor flujo de agua (0,16 L/s) y el mayor ángulo de inclinación (6 grados). No obstante, estos resultados no justifican la aplicación del método de beneficio como una vía para el tratamiento de estos residuales y la recuperación de los valores metálicos contenidos en ellos.

RECOMENDACIONES.

Desarrollar investigaciones con la aplicación de otros métodos que permitan obtener mayores recuperaciones de las especies metálicas contenidas en las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para su aprovechamiento integral.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, E. 1996: Investigación tecnológica para la extracción de la cromo espinela contenida en las colas frescas de la planta René Ramos Latour de Nicaro. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 48 p.
2. ARAQUE, DAVID. 2012: Caracterización química y física de las menas lateríticas de Yagrumaje norte y sur de la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 53 p.
3. ASHINKOV, R. 1962: Beneficio de las colas de Nicaro por separación magnética. En: Informe técnico (en Ruso). Biblioteca D´SIT. 62 p.
4. BROWN, G. 1980: Operaciones básicas de la ingeniería química. Traducción al español. 629 p.
5. CHANG, A. & BOBKOVSKI, Y. G. 1993: "Estudio experimental sobre la hidrólisis de los iones de hierro durante la lixiviación carbonato amoniaca de los minerales oxidados de níquel previamente reducidos". Minería & Geología 15(2): 75-79.
6. COL, L.; GARCÍA, L. 1984: Investigaciones complementarias sobre el beneficio de las colas de Nicaro a escala de laboratorio y de planta piloto. Informe técnico. Nicaro, Cuba, 47p.
7. CORREA, YUNIOR. 2013: Comportamiento denso-granulométrico y químico de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Amaury Palacios Rodríguez (Tutor). Tesis en opción al título de master en metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 83 p.
8. DE LA ROSA, ALEXANDER. 2013: Lixiviación ácida del concentrado magnético de una muestra de cola de la empresa "René Ramos Latour". Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70 p.
9. FERNÁNDEZ GÓMEZ, DAMARIS. 2015: Recuperación de metales valiosos utilizando mesas de concentración a partir de las colas de la Empresa

- Comandante Ernesto Che Guevara. Tesis en opción al título de ingeniero en Metalurgia y Materiales. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 65 p.
10. FOMENKO, T. G. 1980: Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación. MIR Moscú. 422 p.
 11. GARBEY, A. 2005: Lixiviación orgánica de las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara para la recuperación de cobalto (2da parte). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70 p.
 12. GARCÍA, D. 1988: Estudio preliminar de la obtención del concentrado de cromo a partir de las colas de Nicaro. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 71 p.
 13. GARCÍA, E. 2011: Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 72 p.
 14. HERNÁNDEZ, C. M. 2011: Recuperación de Níquel, Cobalto y Hierro a partir del residuo sólido de la empresa "Ernesto Che Guevara". Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa 65 p.
 15. HERNÁNDEZ, C. M. 2012: Recuperación de Níquel, Cobalto y Hierro a partir del residuo sólido de la empresa "Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 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. En: 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 féreos. Instituto Mejanoobr, Leningrado.
 19. JONES, D. G. & CARTHY, G. 1988: Estudio preliminar de la obtención del concentrado de cromo a partir de las colas de Nicaro. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 71 p.

20. KOWALSKI T. 1953: Proposed flow sheet for metals recovery from Nicaro tailings. Project 112. Biblioteca D'SIT, 26p.
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. En: Informe Técnico. Nicaro, Cuba, 43.
22. LAMORU, E. 2010: Influencia de la relación níquel - cobre en el proceso de precipitación de sulfuros y las características del producto final de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba". Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 44 p.
23. LÓPEZ, H. & CARTHY, G. 1988: Optimización del esquema de beneficio de las colas de Nicaro con fines siderúrgicos. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 68 p
24. LOYOLA, O. 2012: Comportamiento de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" ante la variación de la intensidad del campo magnético. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. de Moa. 61 p.
25. 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.
26. 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.
27. MEDRANO, A. 2007: Lixiviación Ácida de los Residuales Sólidos de la tecnología Carbonato amoniacal. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. de Moa 64 p.

28. MINERAL PROCESSING WASTES. 2006: Material Description. <<http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/mwst1.htm>>. [Consulta: 25 de noviembre 2015].
29. MORA, YENDRY. 2008: Influencia de la humedad sobre el beneficio y la molienda de los minerales lateríticos. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 66 p.
30. OTERO, X; FERREIRA, T; HUERTADIAZ, M; PARTITI, C; SOUZAJR, V; VIDALTORRADO, P. & MACIAS, F: 2009. Geochemistry of iron and manganese in soils and sediments of a mangrove system, Island of Pai Matos (Cananeia SP, Brazil). Geoderma 19(148): 318-335.
31. PALMERO, A. 2011: Comportamiento de las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara” ante la intensidad de un campo magnético. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 45 p.
32. PEÑA, E. G. 2011: Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 72 p.
33. PEÑA, J. G. 1986: Estudio del esquema de beneficio de las colas de Nicaro. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. de Moa. 40 p.
34. PONCE, N. 1979: Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro. Revista La Minería en Cuba (Biblioteca RRL): 7 p.
35. PONCE, N.; ALTARRIBA, I. & CARRILLO, D. 1986: Composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Moa. Revista Tecnológica -Serie Geológica-, 16(2): 66-75.
36. PRIESTER, M. HENTSCHEL, T. & BENTHIN, B. 1991: Pequeña Minería-Técnicas y Procesos GTZ. <www.gama-peru.org/libromedmin/bibliogrfa/lit-074.htm>. [Consulta: 30 noviembre 2015].

37. REID, J.G. 1984: "Algunas observaciones sobre las características de la tostación, lixiviación y lavado del mineral laterítico de Greenvale", Boletín Técnico-Serie Níquel (1): 29-40.
38. RESUMEN DEL TALLER DE COLAS. 2005: Análisis de información científica técnica sobre el procesamiento de las colas de mineral. Moa, Biblioteca CEDINIQ, 35 p.
39. RODRÍGUEZ, M. P. 2004: Lixiviación ácida reductora (con SO₂ y H₂SO₄) de las colas de la Planta niquelífera de Punta Gorda, CEINIQ (Cuba). [Informe Técnico] 22 p.
40. ROJAS A. 2003: Características mineralógicas de los residuales no lixiviados del proceso Caron, en Moa, Holguín, Cuba. Minería & Geología. 19(3-4). 23-34.
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. SAMALEA, G. 1996: Lixiviación de las colas viejas de la tecnología carbonato amoniacal en medio ácido con SO₂ y H₂SO₃. En: Informe Técnico. Nicaro, Cuba, 23 p.
43. Sitio Web de Internet <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2.htm>
44. TURRO, A. 2002: Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal. Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico.de Moa. 154 p.
45. URGELLES, DENNIS. 2014: Cinética de la lixiviación de las colas de la tecnología carbonato amoniacal para la extracción de cobalto. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.de Moa. 75 p.
46. WEDEINGE, SALOM. 2015: Recuperación de níquel y cobalto en las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 72 p.

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. <<http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2.htm>>. [consulta: 25 noviembre 2015].
49. <<http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-6.htm>>. [consulta: 25 noviembre 2015].

ANEXOS

Tabla 1 Masa de los productos obtenidos con la variación del flujo de agua y el ángulo de inclinación.

Experimentos	Masa de productos (g)			Flujo de agua(L/s)	Ángulo de inclinación(°)
	Concentrado	Producto medio	Cola		
1	317,03	270,00	-	0,28	6
2	374,40	248,80	-	0,22	6
3	481,90	156,96	-	0,16	6
4	182,60	447,63	15,82	0,28	4,5
5	199,98	433,27	7,21	0,22	4,5
6	318,37	376,77	5,67	0,16	4,5
7	282,10	317,63	18,02	0,28	3
8	263,50	334,50	14,87	0,22	3
9	187,93	383,60	12,23	0,16	3

Tabla 2 Salida de los productos obtenidos en la mesa de concentración, (%).

Experimentos	Salida de los productos (%)			Flujo de agua(L/s)	Ángulo de inclinación(°)
	Concentrado	Producto medio	Cola		
1	31,70	27,00	0,00	0,28	6
2	37,44	24,88	0,00	0,22	6
3	48,19	15,70	0,00	0,16	6
4	18,26	44,76	1,58	0,28	4,5
5	20,00	43,33	0,72	0,22	4,5
6	31,84	37,68	0,57	0,16	4,5
7	28,21	31,76	1,80	0,28	3
8	26,35	33,45	1,49	0,22	3
9	18,79	31,76	1,22	0,16	3

Tabla 3 Recuperación de especies metálicas en los productos cuando se varía el ángulo de inclinación y el flujo de agua.

Experimentos	Productos	Recuperación (%)							Flujo de agua(L/s)	Ángulo de inclinación(°)
		Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Mn		
1	Concent.	29,326	30,639	29,705	26,507	29,069	30,312	30,146	0,28	6
	Prod. med.	25,875	26,094	25,402	25,155	23,345	26,691	26,097	0,28	6
	Colas	-	-	-	-	-	-	-	0,28	6
2	Concent.	35,256	36,351	35,195	31,436	33,982	36,139	35,992	0,22	6
	Prod. med.	23,843	24,379	23,331	23,449	21,89	24,607	24,308	0,22	6
	Colas	-	-	-	-	-	-	-	0,22	6
3	Concent.	44,576	47,22	45,263	39,431	41,666	46,537	46,327	0,16	6
	Prod. med.	15,173	15,38	14,695	15,091	14,351	15,388	15,171	0,16	6
	Colas	-	-	-	-	-	-	-	0,16	6
4	Concent.	17,804	17,892	17,095	17,442	16,622	17,792	17,649	0,28	4,5
	Prod. med.	44,017	43,061	41,734	43,994	43,267	43,515	43,267	0,28	4,5
	Colas	1,4894	1,5003	1,4588	1,4376	1,3351	-	-	0,28	4,5
5	Concent.	19,332	19,417	18,66	19,33	18,496	19,559	19,539	0,22	4,5
	Prod. med.	41,882	42,067	40,863	40,893	38,866	42,792	41,878	0,22	4,5
	Colas	0,6793	0,7068	0,6673	0,6541	0,606	-	-	0,22	4,5
6	Concent.	31,041	30,911	29,781	30,558	29,002	31,182	30,773	0,16	4,5
	Prod. med.	36,107	36,581	35,36	36,631	35,369	37,108	36,417	0,16	4,5
	Colas	0,538	0,561	0,5309	0,5083	0,4582	-	-	0,16	4,5
7	Concent.	27,27	27,516	26,475	22,999	24,932	26,843	26,972	0,28	3
	Prod. med.	30,969	30,982	29,908	29,464	27,884	31,255	30,369	0,28	3
	Colas	1,6969	1,7012	1,6398	1,6564	1,5294	-	-	0,28	3
8	Concent.	25,691	25,584	24,709	25,162	24,161	25,772	25,469	0,22	3
	Prod. med.	32,614	32,477	30,825	33,183	33,217	32,318	32,157	0,22	3
	Colas	1,4003	1,4238	1,3749	1,3508	1,2434	-	-	0,22	3
9	Concent.	18,01	18,247	17,623	16,863	16,548	18,218	18,067	0,16	3
	Prod. med.	37,081	36,901	35,297	38,407	38,754	36,992	37,077	0,16	3
	Colas	1,1826	1,1659	1,117	1,093	1,001	-	-	0,16	3

Efectos principales y superficie de respuesta estimada de los elementos en el concentrado.

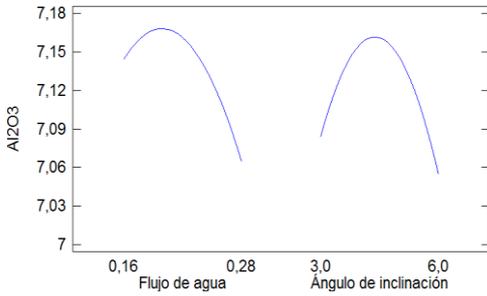


Figura 1 Efectos principales

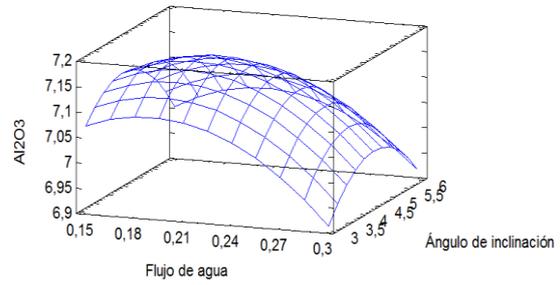


Figura 2 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el óxido de aluminio:

$$Al_2O_3 = 5,93093 + 5,50926 \cdot F + 0,32 \cdot A - 15,7407 \cdot F^2 + 0,166667 \cdot F \cdot A - 0,0407407 \cdot A^2$$

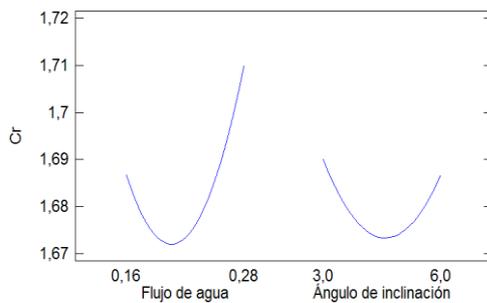


Figura 3 Efectos principales

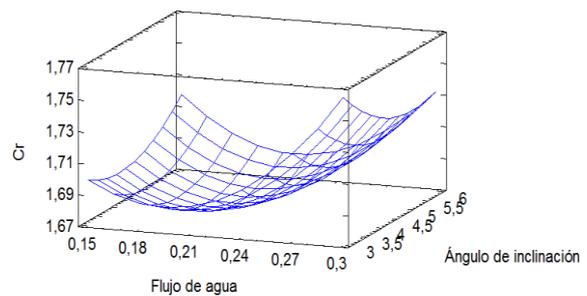


Figura 4 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el cromo:

$$Cr = 1,99667 - 2,36111 \cdot F + 0,0366667 \cdot A + 6,94444 \cdot F^2 - 0,111111 \cdot F \cdot A + 0,00666667 \cdot A^2$$

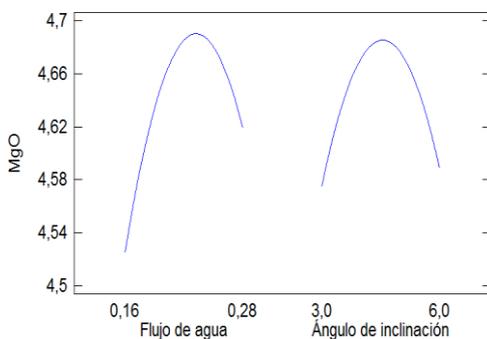


Figura 5 Efectos principales

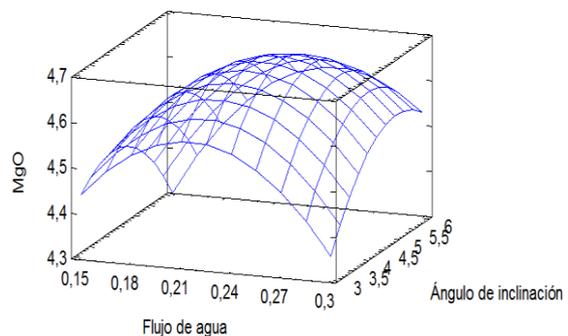


Figura 6 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el óxido de magnesio:

$$MgO = 2,72824 + 11,5046 \cdot F + 0,265 \cdot A - 31,4815 \cdot F^2 + 0,694444 \cdot F \cdot A - 0,0459259 \cdot A^2$$

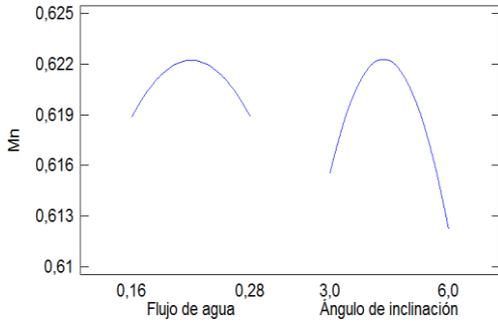


Figura 7 Efectos principales

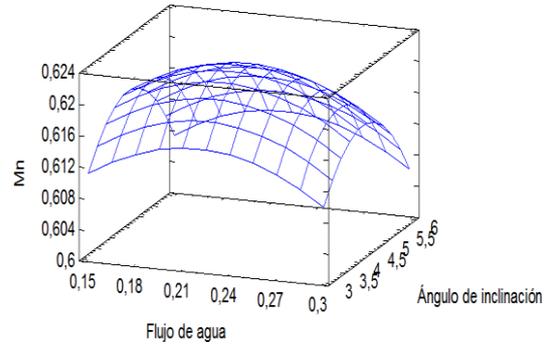


Figura 8 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el manganeso:

$$Mn = 0,507407 + 0,407407 \cdot F + 0,0322222 \cdot A - 0,925926 \cdot F^2 + 0,0 \cdot F \cdot A - 0,0037037 \cdot A^2$$

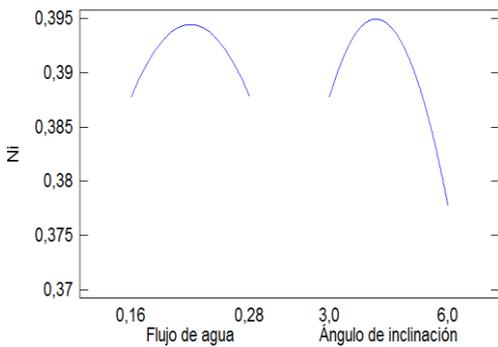


Figura 9 Efectos principales

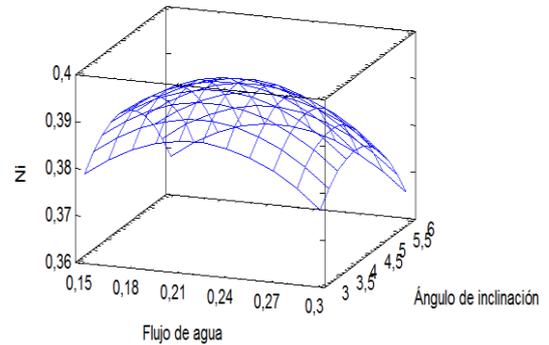


Figura 10 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el níquel:

$$Ni = 0,214815 + 0,814815 \cdot F + 0,0433333 \cdot A - 1,85185 \cdot F^2 + 0,0 \cdot F \cdot A - 0,00518519 \cdot A^2$$

Efectos principales y superficie de respuesta estimada de los elementos en el producto medio.

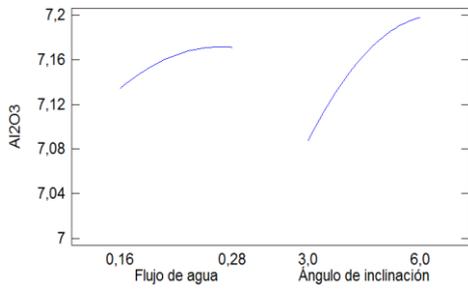


Figura 11 Efectos principales

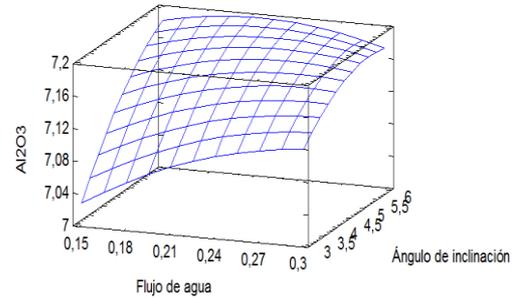


Figura 12 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el óxido de aluminio:

$$Al_2O_3 = 6,36037 + 2,73148 \cdot F + 0,172222 \cdot A - 3,24074 \cdot F^2 - 0,222222 \cdot F \cdot A - 0,00962963 \cdot A^2$$

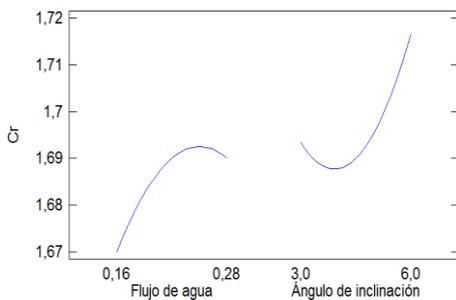


Figura 13 Efectos principales

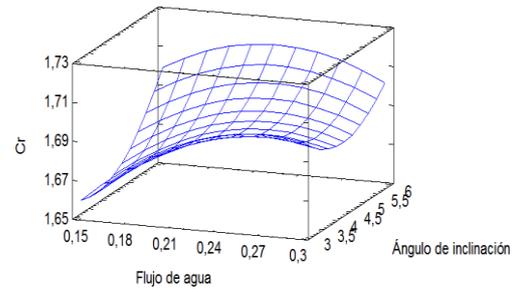


Figura 14 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el cromo:

$$Cr = 1,53639 + 1,76389 \cdot F - 0,0338889 \cdot A - 2,77778 \cdot F^2 - 0,0833333 \cdot F \cdot A + 0,00666667 \cdot A^2$$

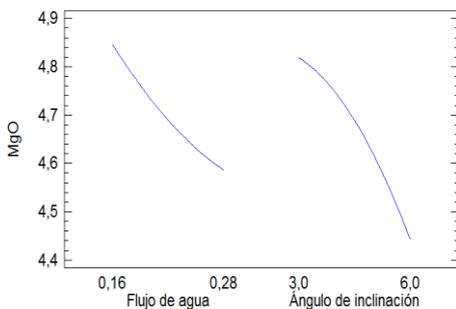


Figura 15 Efectos principales

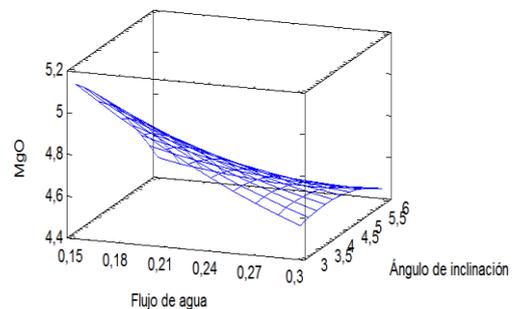


Figura 16 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el óxido de magnesio:

$$MgO = 6,71907 - 10,6759 \cdot F - 0,148889 \cdot A + 7,40741 \cdot F^2 + 1,16667 \cdot F \cdot A - 0,0259259 \cdot A^2$$

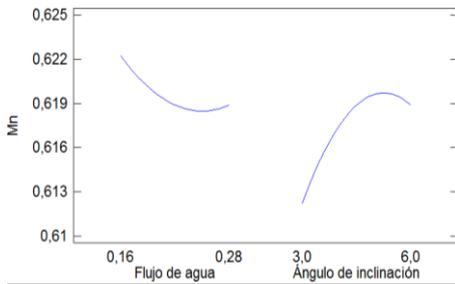


Figura 17 Efectos principales

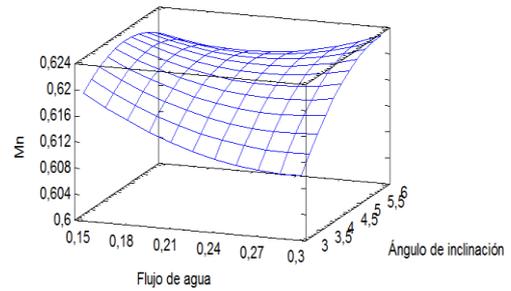


Figura 18 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el manganeso:

$$Mn = 0,634907 - 0,356481 \cdot F + 0,00944444 \cdot A + 0,462963 \cdot F^2 + 0,0277778 \cdot F \cdot A - 0,00148148 \cdot A^2$$

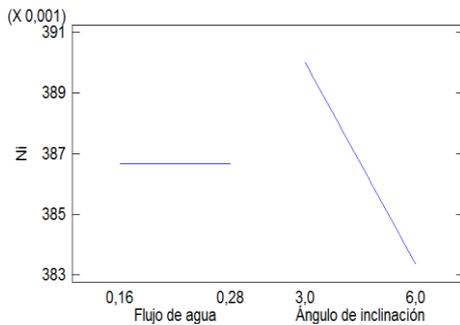


Figura 19 Efectos principales

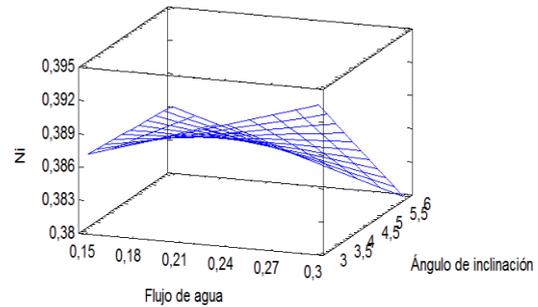


Figura 20 Superficie de respuesta

Modelo de regresión ajustada para el níquel:

$$Ni = 0,369167 + 0,125 \cdot F + 0,00388889 \cdot A + 0,0 \cdot F^2 - 0,0277778 \cdot F \cdot A + 0,0 \cdot A^2$$