



# Trabajo de Diploma



---

**CARACTERIZACIÓN FISICO QUIMICA INTEGRAL DE LOS  
PRINCIPALES FRENTES DE MINERÍA QUE TRIBUTAN AL  
PROCESO DE LA EMPRESA MOANICKEL SA.**

**AUTOR(S):** Lianelis Fernández Garrido

**TUTOR(ES):** Ing. Yeison Reyes Gonzalez

Ing. Katerin Ramirez Ramirez

Mc. Airem Garbey Frometa

Moa, noviembre 2023

---

# **AGRADECIMIENTOS**

- **Agradezco primeramente a mi Dios por haberme permitido llegar hasta aquí y hacer este sueño realidad.**
- **A todas esas personas que se preocuparon por mí, que siempre estuvieron a mi lado**
- **Al equipo de tecnología por su ayuda incondicional para poder realizar este proyecto que sin su ayuda no lo hubiera logrado y por haberme hecho sentir parte de su equipo de trabajo.**
- **A mis padres por todo su apoyo y dedicación en todos estos años, por estar siempre para mí en cada momento, por no soltarme nunca, por ser esos padres incondicionales y guiarme por el camino correcto.**
- **A mi familia en general por la confianza depositada en mí, y por cada uno de sus esfuerzos y dedicación para que pudiera seguir adelante en el cumplimiento de mis sueños, por sus oraciones.**
- **A mis tutores Katerin y Yeison por su ayuda, su tiempo y su paciencia. Gracias por sus consejos y su cariño.**
- **A mi tutora Airem por su ayuda, su tiempo, su amistad y por ayudarme realizar posible este trabajo.**
- **A Ariel Mosqueda por su ayuda, tiempo, consejos, por todo**
- **A Wilmer, Roberto, Yanetsis, Lisset, Edel y Bladimir por su ayuda, su cariño y preocupación.**
- **A Eidier, Omarito, Cesar y Gabriela por su ayuda, su tiempo, preocupación y por haberme hecho sentir parte de su equipo de trabajo.**
- **A todas esas bellas personas que conocí, que me apoyaron y nunca dudaron de mí.**
- **A mis vecinos que me daban ánimo para seguir adelante.**
- **A todos ellos muchas gracias.**

# DEDICATORIA

➤ A

mi

Familia

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la caracterización físico química de un conjunto de muestras pertenecientes a los principales frentes de minería de la Empresa Pedro Sotillo Alba Moa Nickel S.A. Se obtuvo que el área con mayor contenido de las fracciones >20 mesh, fue Zona A A5 con un 39.24%. Con relación a la clase de tamaño - 20 + 100 mesh, los mayores registros lo exhiben Zona Septentrional con 27.4 %, Camarioca Norte-A19 con un 14.26 % y Atlantic con un 12.26 %, todas por encima de los parámetros establecidos (12 %). De acuerdo a los análisis químicos efectuados, se pudo observar que en el yacimiento Zona Septentrional, el 42.44% del Ni se concentra en la fracción granulométrica - 20 + 100 mesh. De los elementos nocivos, el SiO<sub>2</sub> se concentra en un 61.13 %, por lo que esta fracción es portadora de un elevado contenido de este elemento. Se pudo constatar que el contenido de Mg, así como el contenido de Fe, guardan una estrecha relación con la velocidad de sedimentación de la pulpa cruda. La eficiencia de extracción del Ni y el Co arrojó buenos resultados, superando el 95 % en la mayoría de los casos, la misma se afecta cuando se incrementa el contenido de Mg por encima de 1.70 %, ya que este es un elemento alto consumidor de ácido. Se calculó que un 93,24% del Ni presente en la fracción -20+100 mesh en el yacimiento Zona Septentrional se lixivia, del mismo modo en el área de Criba Fija el 75,4% del níquel en esta fracción se lixivia. Por esta razón no resultaría factible separar esta fracción del mineral, ya que afectaría considerablemente el balance de níquel alimentado a la planta.

**Palabras Claves:** Granulometría, sedimentación, lixiviación.

## SUMMARY

In this work, the results of the physical-chemical characterization of a set of samples belonging to the main mining fronts of the Company Pedro Sotillo Alba Moa Nickel S.A. are presented. It was obtained that the area with the highest content of fractions >20 mesh was Zone A A5 with 39.24%. In relation to the size class - 20 + 100 mesh, the highest records are exhibited by the Northern Zone with 27.4%, Camarioca Norte-A19 with 14.26% and Atlantic with 12.26%, all above the established parameters (12%). According to the chemical analyzes carried out, it was observed that in the Northern Zone deposit, 42.44% of the Ni is concentrated in the granulometric fraction - 20 + 100 mesh. Of the harmful elements, SiO<sub>2</sub> is concentrated in 61.13%, so this fraction has a high content of this element. It was found that the content of the Mg, as well as the Fe content, are closely related to the sedimentation rate of the raw pulp. The extraction efficiency of Ni and Co gave good results, exceeding 95% in most cases; it is affected when the Mg content increases above 1.70%, since this is a high acid-consuming element. It was calculated that 93.24% of the Ni present in the -20+100 mesh fraction in the Northern Zone deposit is leached, similarly in the Fixed Screen area 75.4% of the nickel in this fraction is leached. For this reason, it would not be feasible to separate this fraction of the mineral, since it would considerably affect the balance of nickel fed to the plant.

**Keyword:** Granulometry, sedimentation, leaching.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	V
<b>Palabras Claves:</b> Granulometría, sedimentación, lixiviación.....	V
<b>SUMMARY</b> .....	VI
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	VII
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	3
1.1 Definiciones y conceptos básicos .....	3
1.2 Plantas de beneficio y sus componentes principales.....	9
1.3 Descripción del flujo tecnológico de las Plantas de Preparación de Pulpa y de Espesadores. .....	11
1.4. Antecedentes de la Investigación.....	12
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	19
2.1 Materiales y equipos utilizados.....	19
2.2 Métodos de preparación y clasificación de la pulpa. ....	19
2.3 Determinación de la granulometría.....	21
2.4 Determinación de la densidad de la pulpa y el % de sólido.....	21
2.5 Determinación del % de rechazo o de gravilla. ....	22
2.6 Determinación del % de arena. ....	23
2.7 Determinación de la velocidad de sedimentación.....	24
2.8 Lixiviación en autoclave de laboratorio.....	24
2.8.1 Preparación de la pulpa: .....	25

2.8.2 Cálculo del licor obtenido en la lixiviación. ....	26
2.8.3 Cálculo de la cantidad de agua que se debe adicionar en la prueba.....	26
2.8.4 Procedimiento para operar la autoclave. ....	26
2.8.5 Preparación de la muestra para análisis químico. ....	28
2.8.6 Determinación de la eficiencia de extracción de los metales de interés. ....	28
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>30</b>
3.1. Caracterización granulométrica de los frentes en explotación minera. ....	30
3.2. Distribución de los metales de interés en las clases de tamaño evaluadas. ....	30
3.3. Determinación de la velocidad de sedimentación y su correlación con los análisis químico granulométricos.....	32
3.4. Evaluación a escala piloto del comportamiento de los diferentes yacimientos en la lixiviación ácida. ....	33
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	<b>35</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>36</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Bibliografía .....	37
<b>ANEXOS</b> .....	<b>40</b>

## **INTRODUCCIÓN**

Las lateritas níquelíferas son materiales regolíticos derivados de rocas ultramáficas ricas en olivino que contienen reservas económicamente explotables de Ni y, generalmente, Co. Los yacimientos lateríticos de Ni-Co producen actualmente alrededor del 40% del Ni mundial y contienen aproximadamente el 70% de las reservas (Glesson, Butt, & Elias, 2003); (Ferriset, Butt, Morris, & Piantone, 2005); (Mudd, 2010); (Marsh & Anderson, 2011). Asimismo, las lateritas representan una fuente de obtención de Co de importancia mundial (Llorca, 2007) con leyes que alcanzan hasta 0,84 % CoO (Lambiv Dzemua, Glesson, & Schofield, 2013).

Los perfiles de meteorización lateríticos se caracterizan, típicamente, por contener una zona más superficial limonítica muy rica en óxidos e hidróxidos de hierro y pobre en sílice. La limonita suele tener una zona especialmente rica en hierro (ferricreta o iron-cap) en la parte superior. De la zona limonítica se pasa en profundidad a una saprolita (zona de roca alterada rica en filosilicatos donde se preserva la textura de la roca madre o protolito;) y finalmente a la roca madre. Cabe destacar que la terminología utilizada para designar las diferentes zonas del perfil es muy variada y no existe un consenso general. (Golightly, 2010)

Los yacimientos lateríticos de la región de Moa, parte nororiental de Cuba, comenzaron a ser estudiados en la década del 50 del siglo pasado por compañías norteamericanas, que a finales de ese decenio comienzan su explotación con la instalación de una moderna industria de proceso ácido.

Durante años, estos yacimientos han sido objeto de muchas investigaciones y de manera especial se han dedicado esfuerzos a estudiar el espesor de la corteza laterítica, las irregularidades del relieve del basamento, la presencia de xenolitos, la potencia de las menas níquelíferas-cobaltíferas y las variaciones bruscas que presenta la composición química de la corteza mineral en profundidad. (Valdivia García, y otros, 2014)

La composición sustancial de las lateritas níquelíferas cubanas es compleja, pues presentan asociaciones mineralógicas diversas que varían entre los diferentes tipos genéticos y litológicos de menas en los yacimientos. Las menas lateríticas en sentido general, se caracterizan por la presencia de mezclas de óxidos y oxihidróxidos de hierro, cromo, manganeso, silicatos magnesianos, compuestos amorfos y minerales arcillosos, asociados isomórficamente al níquel y el cobalto principalmente en los retículos cristalinos de dichos minerales. (Valdivia García, y otros, 2014)

### **Situación problemática**

Durante los más de 60 años de actividad minera, las lateritas ferroníquelíferas de los yacimientos de la región de Moa, han experimentado importantes cambios en sus características físico químicas y

mineralógicas. Estos cambios han conducido a modificaciones en los estándares de operación de la planta, con el objetivo de asimilar estos minerales. Desde el punto de vista granulométrico, se ha identificado que la fracción  $- 20 + 100$  mesh, conocida como arena, cuando su contenido en el mineral excede los límites establecidos genera significativas complicaciones en el proceso. Entre las afectaciones de mayor impacto destaca el incremento del torque en los espesadores de pulpa y la pérdida de condiciones de operación en los reactores de Lixiviación por concepto de arenamiento.

### **Planteamiento del problema**

La insuficiente caracterización físico química integral de los principales frentes de minería, impide determinar el comportamiento de la fracción  $- 20 + 100$  mesh en el proceso ácido de la empresa MoaNickel SA.

**Objeto.:** Minerales lateríticos

**Campo de acción:** Análisis físico químicos de minerales lateríticos

**Objetivo general:** Determinar el comportamiento de la fracción  $- 20 + 100$  mesh en el proceso ácido de la empresa Moanickel SA.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterización físico química de los principales frentes de minería en explotación.
2. Evaluación a escala piloto del comportamiento de los diferentes yacimientos en la lixiviación ácida.
3. Evaluación técnica del comportamiento de la fracción  $- 20 + 100$  mesh en la lixiviación a escala piloto.

**Hipótesis:** Si se realiza una caracterización físico química integral de los principales frentes de minería, se podrá determinar el comportamiento de la fracción  $- 20 + 100$  mesh en el proceso ácido de la empresa MoaNickel SA.

# CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 Definiciones y conceptos básicos

### Yacimientos mineros

Los yacimientos mineros son depósitos donde la calidad y cantidad de los minerales presentes justifica un mayor estudio, el cual tiene por objetivo definir en cantidad, calidad, profundidad y dimensión del yacimiento con el fin de desarrollar las actividades mineras para que la explotación del mismo sea económicamente rentable con las tecnologías actuales. (Téllez, 2018)

### Caracterización de los yacimientos lateríticos

Los yacimientos lateríticos de Ni-Co producen actualmente alrededor del 40% del Ni mundial y contienen aproximadamente el 70% de las reservas. Asimismo, las lateritas representan una fuente de obtención de Co de importancia mundial con leyes que alcanzan hasta 0,84 % CoO.

Los perfiles de meteorización lateríticos se caracterizan, típicamente, por contener una zona más superficial limonítica muy rica en óxidos e hidróxidos de hierro y pobre en sílice. La limonita suele tener una zona especialmente rica en hierro (ferricreta o iron-cap) en la parte superior. De la zona limonítica se pasa en profundidad a una saprolita (zona de roca alterada rica en filosilicatos donde se preserva la textura de la roca madre y finalmente a la roca madre. (Proenza, 2015)



**Figura 1.1 A)** Zona limonítica constituida principalmente por goethita y hematites. **B)** Zona saprolítica dominada por serpentina, serpentina rica en Ni y "garnieritas".

Las lateritas niquelíferas se forman predominantemente en climas tropicales húmedo y de sabana. Las temperaturas cálidas y las fuertes lluvias, combinadas con una alta actividad biogénica, favorecen la meteorización química necesaria para formar los perfiles lateríticos.

Para ser asimilada por el proceso metalúrgico la mena debe contener como mínimo 35 % de Fe y 1% de Ni, parámetros que la definen como laterita de balance (LB) o limonita en el ámbito industrial y es el denominado mineral útil. (Agyei, 2010)

El mineral disponible para las operaciones presentes y futuras difiere bastante del evaluado para el diseño del proceso de lixiviación ácida a presión en la empresa. Durante los primeros trabajos de

exploración en Moa se partió de un yacimiento de lateritas promediando alrededor de 1,35 % de Ni y 0,13 % de Co. Este yacimiento mostraba a su vez poco silicato del tipo de las serpentinas, lo que, acompañado del bajo contenido de magnesio en estos minerales, sugirieron la aplicación de la lixiviación ácida para su procesamiento.

En el mineral a procesar mediante esta tecnología la fase predominante es la Goethita, de ahí su característica limonítica. Este mineral laterítico se presenta como tierra suelta y en terrones; el mineral serpentinitico se muestra en toda la gama desde el material terroso hasta fracciones de rocas duras de diversos tamaños.

### **Separación y clasificación de sólidos**

Se denomina clasificación de sólidos a la separación de materiales sólidos, agrupándolos según el tamaño de las partículas, granos o pedazos. La clasificación de sólidos según el tamaño de los mismos tiene también gran importancia como método de análisis físico para el control de la calidad de los productos y de la eficacia de otras operaciones básicas, como la molienda. En la industria química se usan principalmente dos métodos de clasificación de sólidos: el tamizado o cribado y la separación hidráulica o neumática. Los métodos de análisis más usados se basan en los mismos principios. (Rosabal Vega, 1998)

### **Teoría sobre el proceso de sedimentación**

La sedimentación es uno de los métodos que existen de separación mecánica de sólidos y fluidos donde las partículas sólidas tienden a descender, por efecto de la fuerza de gravedad, y acumularse en el fondo del equipo, de esta forma se logra un lodo o fango de sólidos depositados, por encima del cual queda el fluido claro. (Anache Anache, 2016)

El proceso de sedimentación está gobernado por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuanto mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuanto menor es la viscosidad del mismo. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, proceso denominado coagulación y floculación. (Comisión-Europea, 2014)

Un cuerpo que cumple la ley de Stokes se ve sometido a dos fuerzas, la gravitatoria y la de arrastre. En el momento que ambas se igualan su aceleración se vuelve nula y su velocidad constante. (Comisión-Europea, 2014)

Cuando el cuerpo cae a través de un fluido confinado en un recipiente o local cuyas dimensiones no rebasan cierta magnitud relativa con respecto a la del cuerpo, pueden producirse ciertas desviaciones del valor real de la velocidad de caída. (Comisión-Europea, 2014)

En el proceso de sedimentación se persiguen dos funciones:

1. Obtener un líquido claro dejando que sedimente el sólido que se quiere eliminar.
2. Obtener un sólido eliminando el líquido, el cual se encuentra por encima del material depositado (sedimento). Una suspensión de partículas concentradas puede sedimentar en una de las dos formas siguientes:

✓ Después de un breve período de aceleración inicial, la interfase entre el líquido claro y la suspensión se desplaza hacia abajo con velocidad constante, formándose una capa de sedimento en el fondo del recipiente.

✓ Cuando la interfase se aproxima a la capa de sedimento, la velocidad a la que desciende disminuye hasta alcanzar el punto crítico de sedimentación, cuando se forma una interfase directamente entre el sedimento y el líquido claro.

La sedimentación posterior es consecuencia únicamente de la consolidación del sedimento, ascendiendo entonces el líquido hacia arriba alrededor de los sólidos, que forman entonces un lecho en el que las partículas están sueltas, pero en contacto unas con otras. (Ganganelly, 2017)

Como el área de flujo se reduce gradualmente, la velocidad disminuye gradualmente. En la Figura 1.3 a) se ilustra una etapa del proceso de sedimentación. Donde A es el líquido claro, B es suspensión a la concentración inicial, C es una capa a través de la cual disminuye progresivamente la concentración y D es el sedimento.

La velocidad de sedimentación permanece constante hasta que la superficie superior coincide con la superficie de la zona C, y disminuye entonces hasta que se alcanza el punto crítico de sedimentación una vez que han desaparecido las zonas B y C. Una segunda modalidad de sedimentación es la que se representa en la Figura 1.3 b) cuando la gama de tamaños de partículas es muy grande. La velocidad de sedimentación disminuye progresivamente durante toda la operación, sin existir ninguna zona de composición constante y extendiéndose la zona C desde la interfase superior hasta la capa de sedimento.

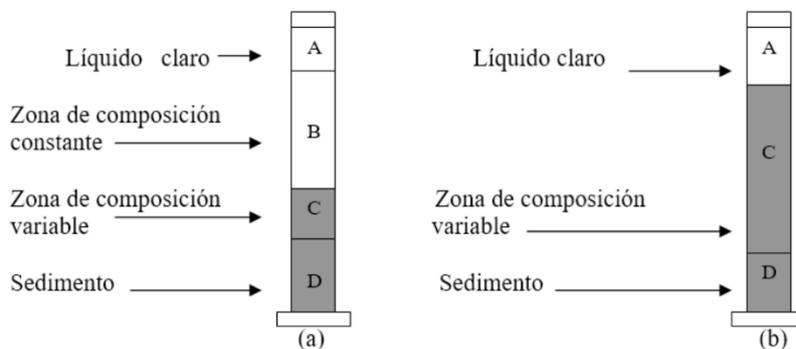


imagen 1: Sedimentación de suspensiones concentradas; (a) Sedimentación del tipo 1;(b) Sedimentación del tipo 2.

Las principales razones de la modificación de la velocidad de sedimentación de las partículas en una suspensión concentrada son las siguientes:

1. Las partículas grandes sedimentan con relación a una suspensión de partículas más pequeñas, por lo que la densidad efectiva y la viscosidad del fluido aumentan.
2. La velocidad ascendente del fluido desplazado durante la sedimentación es notable en una suspensión concentrada, y la velocidad aparente de sedimentación es menor que la velocidad real relativa al fluido.
3. Los gradientes de velocidad en el fluido cercano a las partículas aumentan como resultado del cambio en el área y en la forma de los espacios de flujo.
4. Las partículas más pequeñas tienden a ser arrastradas hacia abajo por el movimiento de las partículas grandes, experimentando por tanto una aceleración.
5. Como en una suspensión concentrada las partículas se encuentran más juntas, la floculación es más acentuada en un disolvente ionizado, aumentando el tamaño efectivo de las partículas pequeñas.

Otros aspectos que influyen en la sedimentación son:

- Diámetro del recipiente.
- Concentración de la suspensión.
- Forma del recipiente
- Composición del mineral

Hay dos tipos de movimiento en el proceso de sedimentación: el del líquido rebosante que asciende y el del sólido descendente. Estos movimientos están en dependencia de la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión, en función de la concentración.

**Mineral:** Un mineral es una sustancia natural, de composición química definida, normalmente sólido e inorgánico, y que tiene una cierta estructura cristalina. (Wikipedia, 2018)

**Mineral útil:** Es la laterita de balance (LB) o limonita, con más de 35 % de Fe y más de 1 % de Ni. (Pérez García, 2012)

**Mena:** Una mena de un elemento químico, generalmente un metal, es un mineral del que se puede extraer aquel elemento porque lo contiene en cantidad suficiente para poderlo aprovechar. Es decir, cuando mediante un proceso de minería se puede extraer ese mineral de un yacimiento y luego, mediante metalurgia, obtener el metal. (Wikipedia, 2018)

**Pulpa:** mezclas de sólidos y líquidos en forma de suspensiones de tal forma que sus características y comportamiento se pueden estudiar, en lo que a minería se refiere, como un fluido homogéneo. Es un fluido formado por la suspensión de uno o varios minerales en agua. (2018)

**Limonita de balance:** Su fórmula general es  $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . En la actualidad el término se usa para designar óxidos e hidróxidos masivos de hierro sin identificar que carecen de cristales visibles y tienen

raya parda amarillenta. La limonita es normalmente el mineral goethita, pero puede consistir también en proporciones variables de magnetita, hematites, lepidocrocita, hisingerita, pitticita, jarosita.

**Granulometría:** Es la distribución por tamaños de las partículas de un árido. Para conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra de árido se separan estos mediante cedazos o tamices.

#### **Análisis granulométrico por tamizado**

Para este análisis se hace pasar una muestra seca, disgregada y pesada por diferentes tamices dispuesto de mayor a menor abertura, agitándolos para hacer pasar la muestra a través de ellos. Con este proceso se logra determinar el porcentaje de material que queda retenido en cada uno de los tamices, para poder confeccionar una curva granulométrica.

**Los áridos** son un conjunto de partículas pétreas de diferentes tamaños.

**Fracción granulométrica:** Es la cantidad de árido que pasa por un tamiz y queda retenido en otro. (Andreu, 2.008 – 2.009))

#### **Análisis granulométrico por sedimentación**

Se lleva a cabo, sobre todo en arenas finas, limos, y arcillas. El estudio se basa sobre la “[ley de Stoke](#)”, que relaciona la velocidad de sedimentación de una partícula en el seno de un fluido con el tamaño de dicha partícula. Se ejecuta colocando una muestra en agua destilada dentro de un cilindro de sedimentación y, a la que se le agrega un dispersor para evitar la floculación, para finalmente introducir el hidrómetro dentro del recipiente con la muestra. (wikipedia, 2022)

La **ley de Stokes** proporciona la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar de número de Reynolds pequeño. (Stokes, 1851)

**Ganga:** Se llama así al conjunto de todos los minerales sobrantes que se encuentran asociados a la mena en la roca extraída en un yacimiento. La ganga hace que la ley del metal disminuya, por lo que es necesario separarla de la mena, como primera etapa en la concentración y obtención del metal. (Wikipedia, 2018)

**Disgregación:** proviene etimológicamente del latín “disgregatōnis”, y alude tanto a la acción como al efecto de disgregar, o sea separar las partes que antes eran las constituyentes de una totalidad. (2018)

**Disgregación de materiales:** Un material puede disgregarse o separarse físicamente por la acción del agua, de la temperatura, etcétera, volviéndose más vulnerable. Las rocas suelen disgregarse o fragmentarse en pequeños trozos del mismo material. Químicamente, en el caso de las muestras sólidas que no se disuelven fácilmente, pueden disgregarse por vía húmeda o seca, para obtener partículas más pequeñas, previamente a su disolución en ácidos o agua, para facilitar el proceso. (2018)

## **Análisis por tamizado**

La determinación de las características granulométricas de un material granular, generalmente polidisperso, se realiza a nivel de laboratorio, en las empresas productoras que manejan áridos como materia prima o como producto (arena, piedras molidas, cemento, minerales de níquel, etc.)

Para la determinación de esas características granulométricas se utilizan universalmente tres métodos: el análisis por tamizado o cribado, el análisis por medio del microscopio y las pruebas de sedimentación.

El análisis por tamizado consiste en la separación mecánica de las diferentes fracciones de tamaño del material por medio de un juego de tamices, de abertura de agujeros conocida, que se colocan uno encima de otro en gradación de mayor a menor abertura comenzando por arriba.

Cuando el material que se somete a análisis es pegajoso (por ejemplo, si contiene mucha arcilla), entonces se usa la variante del tamizado en húmedo, durante el cual se rocía cada bandeja con una ducha a presión.

### **Operaciones de tamizado**

El objetivo de la operación de tamizado es la separación de dos o más fracciones de un material polidisperso por medio de superficies de cribado o tamizado, cuyos tamaños de agujeros se selecciona de acuerdo con el tamaño de las fracciones deseadas, en la figura se presenta un esquema elemental de la operación de tamizado para la obtención de dos fracciones del material alimentado Q

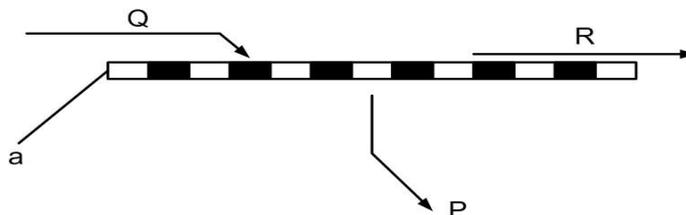


Imagen 2. Esquema elemental de una operación de tamizado: Q – alimentado; R – rechazo; P – producto; a – superficie de cribado.

Teóricamente el producto R debe tener un tamaño de partícula superior al tamaño de los agujeros, ya que toda partícula de un tamaño menor que este debe pasar por dichos agujeros. Sin embargo, factores como la adherencia a las partículas pequeñas entre sí y a las grandes, el grosor del colchón de material que existe sobre la superficie de cribado, la sección viva de la misma, la humedad del material y el tiempo de retención del material en la criba, influyen sobre la verdadera eficiencia del tamizado.

Las causas de bajas eficiencias en el cribado, como la humedad del material son difíciles de controlar, a menos que la propia humedad sea regulada en un paso anterior del proceso. El agua superficial de las partículas pequeñas tiende a aglutinarlas y a obstruir los orificios de la criba, además de que aumenta

la fricción entre partículas y disminuye su movilidad. Sin embargo, cuando la humedad aumenta por encima de ciertos valores, característicos de cada material, se producen las condiciones de cribado húmedo y la eficiencia aumenta notablemente. (Rosabal Vega, 1998)

### **Influencia de la humedad en el proceso de cribado**

El contenido de la humedad externa en el material laterítico es una dificultad en el proceso de cribado. El agua, que se encuentra en los poros y fisuras, así como la ligada químicamente, ejerce influencias en el proceso de cribado. Por ejemplo, el cribado de ciertos minerales es prácticamente imposible si la humedad de ellos es mayor del 6 %, ya que la humedad en lo fundamental está presente en las capas superficiales, al mismo tiempo, el lignito poroso se cierce incluso con una humedad de hasta el 45 %. Las clases finas tienen la mayor humedad externa a causa de su gran superficie específica. La humedad externa en el material provoca la aglutinación de las partículas pequeñas entre sí, su adhesión en grandes pedazos y el recubrimiento de los agujeros de las cribas con el material viscoso. Además, la humedad del material baja la acción de las fuerzas de tensión superficial y puede formar capas, las cuales cubren los agujeros de la malla. Todo esto dificulta la separación del material en la criba según el grosor y obstaculiza el paso de los granos pequeños a través de los agujeros, como resultado de lo cual estos granos quedan en el producto sobre la malla. La efectividad del cribado disminuye bruscamente debido al contenido de la humedad, la cual depende de las propiedades del material y de la dimensión de los agujeros del tamiz. (Mora Foster, 2008)

## **1.2 Plantas de beneficio y sus componentes principales**

### **Planta de beneficio de menas limoníticas:**

Se le denomina beneficio o preparación de minerales al conjunto de operaciones y procesos primarios de elaboración de la materia prima mineral, sin transformación química de los minerales en volumen, que tienen el objetivo de separar todos los componentes útiles de la roca y los componentes estériles que le acompañan, las tecnologías de beneficio se fundamentan en la utilización de diferencias de propiedades físicas y/o físico químicas de los componentes minerales y la roca. (Hernández, 2008)

### **Principios teóricos del beneficio para el material laterítico**

La variabilidad presente en los yacimientos lateríticos, producto de las propias condiciones de su surgimiento, influyen en la variación de la composición química, mineralógica y granulométrica en los diferentes cortes del perfil, dentro de un mismo yacimiento y de un yacimiento a otro, trae consigo la extracción extensiva del mineral para compensar dicha variabilidad.

Es necesario aprovechar los contrastes que se manifiestan en las cortezas respecto a la composición mineralógica, química y granulométrica para obtener productos homogéneos como resultado de la liberación, separación y concentración de componentes mediante el uso de métodos de beneficio

apropiados. Si el beneficio de minerales se fundamenta en la diferencia de las propiedades físico químicas de los minerales que componen la mena, para su separación y concentración en productos homogéneos por su composición; entonces la mena laterítica de acuerdo a su diferencia en composición de fases minerales puede ser beneficiada, para su uso integral y la consiguiente protección.

Para la concentración de los minerales contenidos en las menas lateríticas; en particular, el efecto de los procesos de reducción de tamaño, es un importante factor para el beneficio de minerales. Además, si se trata de mejorar la calidad del producto de entrada al proceso extractivo mediante el beneficio del mineral, es necesario tener en cuenta la preparación mecánica de este, ya que constituye la parte inicial dentro de la preparación del mineral en su conjunto. (Mora Foster, 2008)

### **Necesidad de empleo del beneficio de minerales**

La utilización de los minerales presentes en la corteza terrestre por la industria metalúrgica, química y otras, resultan económicamente factible solo cuando el componente mineral se encuentra por encima de un mínimo establecido, y en ello un rol primordial, lo tiene la preparación previa de los mismos, que es de lo que se ocupa el beneficio de minerales.

La elaboración metalúrgica o química de la materia prima mineral sin una preparación previa no permite su utilización racional y completa, debido a que las elaboraciones en estas industrias transforman los componentes a través de operaciones más costosas que las de preparación, y por tanto hay que utilizarlas para alcanzar las concentraciones exigidas del componente utilizable. Además, en muchos casos la presencia de más de un componente entorpece el procesamiento metalúrgico o químico de otro, con pérdida de calidad que se refleja en el producto obtenido. En general, la mayoría de los componentes minerales tienen que ser sometidos a beneficio previo, debido a que su estado natural no satisface las complejas condiciones que exige su procesamiento industrial.

Por cuanto, los minerales que se explotan presentan cada vez más complejidad y menor contenido, el beneficio no solo se hace más necesario, sino que requiere también de su perfeccionamiento. Una ventaja del beneficio es que el mismo no solo concentra determinado componente, sino que puede eliminar la presencia de los componentes dañinos que lo acompañan.

El procedimiento de beneficio de minerales se puede dividir en dos etapas: desintegración de los minerales, es decir, liberación de los granos de mineral útil de otros granos de minerales y roca estéril que los rodean; separación de los minerales (beneficio propiamente dicho), o sea, separación de los granos libres de mineral útil en el concentrado.

La desintegración (descubrimiento) de los minerales se consigue reduciendo el tamaño de partículas, o sea, mediante trituración y molienda, las cuales tiene gran importancia tecnológica y económica en el

beneficio de minerales. El fin tecnológico de estas operaciones consiste en descubrir los minerales, conservando su máximo posible, siendo mínimo el desmenuzamiento.

Para ello se cuenta con un considerable grupo de tecnologías que se inician su aplicación desde el mismo momento en que estos son extraídos de la corteza terrestre. Como se expresó anteriormente, las tecnologías de beneficio se fundamentan en la utilización de diferencias de propiedades físicas y/o físico químicas de los componentes minerales y la roca.

Las operaciones de beneficio de minerales también pueden encontrarse incluidas dentro de los procesos metalúrgicos o químicos, para realizar la separación y/o concentración de algún producto particulado. Desde el punto de vista económico, siempre que la operación de beneficio logre disminuir el costo general del procesamiento de algún sólido o mejorar la calidad de algún producto, de manera que logre una mejor utilización sin mayores gastos, esta debe ser empleada. Esto es lo que precisamente potencia encontrar la utilización de operaciones de beneficio de minerales en muchas ramas de la industria o los servicios. (Hernández, 2008)

### **1.3 Descripción del flujo tecnológico de las Plantas de Preparación de Pulpa y de Espesadores**

La Planta de Preparación de Pulpa tiene como propósito primordial producir una pulpa acuosa del mineral laterítico a una concentración de 25 % de sólidos y recuperar las partículas de limonita de un tamaño menor de 0,84 mm (20 mesh). Esta planta fue diseñada con dos unidades iguales e individuales (con algunos equipos en común). Cada unidad es capaz de manipular la capacidad total de la planta, pero normalmente cada tren debe operar con una capacidad no mayor de 455 t/h. Estos trenes están compuestos por una tolva, un transportador de estera, un transportador de banda, una criba, dos lavadoras y dos zarandas. El mineral se alimenta a la Planta a través de camiones que parten de la mina. Sin embargo cuando existen dificultades para transportar el mineral por algún problema ocasionado o por lluvias, se toma mineral de las pilas de almacenaje que la mina tiene localizada en varios depósitos.

El mineral cae por gravedad a una tolva, cuyo tiempo de retención es 10 min. De las tolvas, el mineral cae a dos esteras de velocidad variable, las cuales controlan el tonelaje de mineral alimentado a la planta. Estas esteras conducen el mineral a dos transportadores de banda. La velocidad de estos transportadores es constante y tienen una inclinación de 15 grados cada uno.

El mineral que pasa a través de estas bandas no debe llevar rocas mayores de 32 pulg (813 mm), si sobrepasan este tamaño el operador debe romper las mismas en fracciones más pequeñas utilizando para ello los martillos neumáticos. El mineral es conducido a las cribas, que poseen barras situadas paralelamente a una distancia de 4 pulg (102 mm), aquí se añade por primera vez agua en forma

atomizada a una presión de 80 lb/pulg<sup>2</sup> (551,58 kPa) con el objetivo de romper los terrones de mineral que pasaron a través del embudo y lavar las partículas de mineral que traen las rocas serpentinitas.

La pulpa con partículas de mineral menores de 4 pulg (102 mm) cae por gravedad de las cribas vibratorias a las lavadoras de paletas, las cuales desmenuzan a la vez que lavan el mineral. Los pedazos de mineral de mayor tamaño quedan en las lavadoras, formando una cama y la pulpa de 30 % de sólidos que sale de esta, cae por gravedad a las zarandas. Las partículas mayores de 0,84 mm, que son en su mayoría de carácter serpentínico, son rechazadas y van al transportador de rechazo. Las menores de 0,84 mm se descargan al colector de pulpa, en forma de pulpa con 25 % de sólidos, alimentándose por gravedad a la Planta de Espesadores de Pulpa a través de una tubería de concreto de 24 pulgada de diámetro.

El rechazo de las zarandas de carácter serpentínico es enviado al circuito de rechazo mediante un transportador, el cual descarga a un cilindro lavador que es el encargado de desmenuzar y lavar los terrones de mineral que no fueron recuperados durante el proceso de clasificación. Este producto es descargado a una zaranda, en la cual ocurre la última clasificación; las partículas de mayor tamaño son transportadas a través de transportadores hasta el depósito del rechazo y la pulpa producto es recolectada en un foso y luego recirculada al proceso.

El agua que se utiliza en los rociadores para lavar el mineral es agua de proceso, extraída del reboso de los tanques Espesadores de Pulpa. Esta agua es bombeada a través de una tubería de 18 pulg (460 mm) hasta la Planta de Preparación de Pulpa. (Manual de Operaciones Planta de Pulpa, 2018)

#### **1.4. Antecedentes de la Investigación.**

(Quintana Puchol, 2018) realizó un estudio granulométrico de la pulpa cruda laterítica utilizando las técnicas de tamización y levigación, valorándose las fluctuaciones del contenido de las fracciones granulométricas y la existencia de grumos de diferentes grados de delezabilidad, los cuales influyen en el contenido de sólidos en la pulpa cruda para lixiviar. Las tomas de pulpa cruda corresponden fundamentalmente a muestras representativas del mineral laterítico de las zonas Atlantic y Yamanigüey. El análisis granulométrico de la pulpa cruda (20 mesh = 0,84 mm) se efectuó mediante las técnicas de tamización y sedimentación. Utilizando un tamiz de 400 mesh, se separó por vía húmeda la pulpa cruda en dos fracciones principales: una fracción <37 µm destinada al análisis granulométrico por levigación y otra > 37 µm dedicada al proceso de tamización.

Como resultado de este trabajo se pudo ver que el contenido másico de la fracción dispersa (< 37µm) en la pulpa laterítica cruda es por lo regular de 82-87 %, en la cual la fracción < 1 µm alcanza valores entre 37 y 48 %. El contenido total de grumos de diferentes tamaños (5-53 µm) alcanza valores de 15 hasta 25 % de la masa de la pulpa cruda, incrementándose aparentemente el grado de polidispersidad

de la fracción dispersa. El espaciado poroso entre los grumos de las fracciones granulométricas de la parte dispersa es variable y puede alcanzar valores entre 25-65 % del volumen total, por lo cual la densidad de las fracciones dispersas está en relación inversa con el contenido y tamaño de los grumos en las mismas, disminuyendo su valor desde  $3,80 \text{ g/cm}^{-3}$  hasta  $3,40 \text{ g/cm}^{-3}$ . También el contenido mineralógico por fracción granulométrica influye en la densidad, estando en correspondencia aproximada con lo expuesto anteriormente. La coagulación de la micela laterítica compleja se debe, entre otros factores, a la interacción de ella con silicatos coloidales amorfos y con oxihidróxidos de Al, Mg, Ni y otros, incrementándose el contenido de agua por sustituciones isomórficas en la goethita de  $\text{Fe}^{3+}$  por otros cationes trivalentes y divalentes. La magnitud del espaciado poroso entre los grumos y su relación entre los macroporos y los microporos influye en la retención del agua percolada entre los grumos, lo que dificulta el movimiento del agua desde las zonas de compresión de los espesadores hacia las superiores. (Falcón Fernández, 1983).

(Ostroumov, 2002) realizó una valoración general de los minerales presentes en la corteza de intemperismo del sector Atlantic de la mina de Moa; exponiendo criterios sobre la concentración de las fases minerales por fracciones granulométricas.

La granulometría del horizonte de ocre es tendente a la fracción - 20 micras, que transiciona hacia la parte superior de dicho horizonte a la fracción de + 80 micras. Las fracciones de muestras en que tienden a concentrarse las fases minerales principales son: La lizardita, antigorita y nepovita tienden a concentrarse en la fracción de + 80 micras no magnética. A la fase clorita no se le puede definir aún una fracción granulométrica determinada por concentrarse los resultados más frecuentes en las fracciones - 20 micras y + 20 -80 micras. La goethita e hidrogneithita tienden a concentrarse en las fracciones magnéticas gruesas: + 80 micras.

La magnetita y maghemita tienden a concentrarse más en la fracción + 20-80, micras fuertemente magnéticas. Y la hidrargilita tiende a concentrarse en la fracción + 20 -80 micras no magnética.

(Cardero, 2016) realizó una investigación sobre la identificación de las fases minerales portadoras de níquel y cobalto en las menas del yacimiento Yagrumaje Sur donde obtuvo como resultado que la granulometría de mayor predominio en la mena es la fracción fina ( $<0,045 \text{ mm}$ ), que supera el 50 % en peso, siendo superior al 10 % y al 4,46 % en las fracciones gruesa ( $> 0,074 \text{ mm}$ ) e intermedia ( $<0,074 \text{ mm} > 0,045 \text{ mm}$ ) respectivamente. Las menas son esencialmente ferrosas ( $\text{Fe} \geq 35 \%$ ), con contenidos notables de aluminio (22,17 %) y sílice (21,18 %). El contenido más alto de níquel lo presenta la muestra M-3/LB y los mayores valores de cobalto en las muestras M-2, M-5, M- 6 y M-7 correspondiente a laterita de balance. Se destaca las altas concentraciones de Mn, mayores 0,20 % en los cinco tipos de menas. Las fases portadoras de níquel en las menas FB, LB y SF se concentran en

las fracciones granulométricas intermedia y fina, como, goethita, maghemita y magnetita. En estas fracciones granulométricas el níquel alcanza contenidos desde 0,81 % hasta 1,43 %. Las portadoras de cobalto tienden a concentrarse con mayor peso en la fracción gruesa ( $> 0,074$  mm) e intermedia ( $<0,074$  mm  $>0,045$  mm), como la asbolana, litioforita y otros minerales de manganeso. En estas fracciones el cobalto tiene concentraciones desde 0,02 % hasta 0,28 %.

(Alberto Hernández Flores, 2017) realizó el análisis fraccional al intervalo granulométrico  $-2,0+0,074$  mm de una muestra del yacimiento Punta Gorda, atendiendo a las propiedades físicas de diámetro y densidad de las partículas. Como resultado fundamental se logra obtener un producto comprendido en el intervalo granulométrico  $-2,0+0,4$  mm y en un rango de densidad de  $2,40$  g/cm<sup>3</sup> a  $2,80$  g/cm<sup>3</sup> en el que se distribuye el 94,89 % y el 91,1 % de magnesio y aluminio respectivamente, lo que se puede utilizar como vía para mejorar la calidad de la mena de alimentación al proceso extractivo y a la vez aprovechar estos recursos para otros fines. El empleo del contraste que manifiestan la fracción granulométrica comprendida en el intervalo  $-2,0+0,074$  mm de la mena laterítica respecto al diámetro y densidad de las partículas que la componen, permite la separación y concentración de los elementos químicos. (VERA, 2001)

#### **Investigaciones realizadas a yacimientos mineros**

Camarioca Norte y Zona A (2014).

En el año 2013 se registraron numerosas afectaciones al proceso productivo asociadas a la mala calidad del mineral alimentado. Las características físico-químicas del mineral procesado generaban una pulpa de alta viscosidad y bajo % de sólidos sin importar cuanto aditivo de sulfato ferroso se emplee.

En abril del 2014 fueron tomadas 30 toneladas de las diferentes áreas que se encontraban planificadas dentro de la minería de los próximos tres años, con el objetivo de simular la explotación minera en ese período, la muestra estuvo compuesta por: 70.83 % de Camarioca Norte, 4.17 % Moa Oriental, 4.17 % Presa de Rechazo y 20.83 % de Zona A.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Favorables velocidades de sedimentación en el compuesto, con valor de 135 mm/1h y 158 mm/2h, valores que no corresponden con los obtenidos en los períodos de crisis del proceso, siendo pésimos los valores obtenidos con el material de Zona A, siendo de 22 mm/1h y 34 mm/2h. Óptimos resultados en la compactación del compuesto usando el aditivo preparado con ácido y sal (sulfato ferroso Hepta Hidratado). (Díaz, 2014)

Moa Oriental A-22 (2020)

El promedio del contenido de Ni+Co fue bastante bajo (1.133%), con valores aceptables de Fe entre 39-41% y el contenido de Mg de 1.67%. Se realizó solamente una determinación de SiO<sub>2</sub> cuyo resultado fue bastante bajo: 2.76%. Los análisis granulométricos arrojaron un contenido de arena promedio de 12.682%, algo elevada y un % de rechazo de 9.70% bastante bajo.

Los valores promedios de extracción que se obtuvieron se pueden considerar malos, por debajo de 90% y hasta 81% como valor mínimo. El promedio es de 88.92% tanto para el Ni como para el Co. Con RAM de 0.315 y 0.340 ton ácido/ton mineral.

Con relación a las velocidades de sedimentación de la pulpa cruda y lixiviada, la pulpa cruda el promedio es de 108 y 131 mm para 1 y 2 horas respectivamente. En la pulpa lixiviada se pudo observar varias muestras que reportan 0 de sedimentación al cabo de las 2 horas y el promedio para 1 hora es de 6 mm. (González, 2020)

Camarioca Sur A-3 (2021).

Tabla 1. Composición química promedio, % (rango de variación)

Ni	Co	Fe	Mg	Ni+Co	C, %	S, %
1.092– 1.178	0.0985 – 0.109	42.24 – 46.91	0.39 - 0,91	1.191 – 1.277	0.201	0.350

No se disponen de otros elementos de interés como SiO<sub>2</sub>, Al, Cr y Mn, (por avería del equipo de fluorescencia RX), pero de acuerdo a la relación con los otros elementos no se infieren grandes desviaciones.

En resumen, estos resultados no sugieren un comportamiento tecnológico fuera de la operación histórica de la planta.

Otros análisis realizados muestran los siguientes resultados:

Tabla 2. Análisis físico del mineral.

Sedim pulpa cruda mm/2hr	% Rechazo	Arena (+100 Mesh), %
133	24.670	14

El contenido de carbono, aunque no fue alarmante, no se considera un valor bajo, en especial por los bajos valores de cobalto reportados, lo que además sugiere bajo contenido de Mn. Esto, en contraposición de los análisis químicos, indica un fuerte carácter reductor del mineral, lo que es perjudicial para la mayor parte de las etapas del proceso, con posible impacto negativo en las características del producto final.

Lo anterior infiere, que en este caso el procesamiento de este tipo de mineral debe ser bajo la condición de mezcla con un mineral de fuerte carácter oxidante (como Yagrumaje), o mediante el uso de un aditivo que otorgue carácter oxidante durante el proceso de Lixiviación. Aspectos que deben ser valorados en próximas pruebas dónde se disponga de mayor volumen de mineral.

De igual modo la muestra mineral no sugiere grandes desviaciones desde el punto de vista de composición granulométrica, aunque el contenido de la arena si resulta significativamente elevado.

Los valores de relación ácido mineral con los que se procesó este mineral fueron bajos, lo que en realidad responde a la baja disponibilidad de ácido acentuada en los últimos días del 2020. Los valores de extracción y sedimentación se mantuvieron bajos, en especial los de la sedimentación de la pulpa lixiviada que llegaron a ser los más bajos de todo el período. (Empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba, 2021)

### **Zona Septentrional (2022)**

Se realizó la caracterización desde el punto de vista físico - químico y granulométrico de las muestras tomadas durante la apertura de Zona Septentrional donde destaca el contenido de Ni+Co en la clase de tamaño (-16+20 mesh) con 1.12 % como promedio, sin embargo, la contribución de dicha clase en el mineral es de apenas un 0.78 %. De manera general, se observa bajos valores de ley de Ni+Co en las clases inferiores. El Fe y el Mg se encuentran dentro de los requerimientos tecnológicos del proceso, con 45.4 % y 1.34 % respectivamente. Para lograr evaluar el comportamiento en el proceso de la mezcla de minerales alimentada con la participación de Zona Septentrional, se consideró como período total además de los 11 días de prueba, 15 días antes y después de alimentada la muestra.

Como parte de la estrategia productiva encaminada a lograr el máximo de estabilidad en las operaciones de la planta, se consideró la incorporación controlada al proceso, de los minerales de Zona Septentrional. Uno de los principales requerimientos para el último trimestre del año 2021, era el desarrollo de la corrida tecnológica con la muestra de mineral correspondiente a este yacimiento. Se logró procesar una mezcla con una participación promedio de 23.03 % de los minerales del yacimiento Zona Septentrional, manteniendo un ritmo en Lixiviación superior a 9.000 t/día.

A pesar de no lograr cumplir con el contenido de ley de Ni+Co previsto con la contribución de los minerales de Zona Septentrional en la mezcla alimentada, se obtuvieron altos índices de eficiencia; > 95 % desde el punto de vista de extracción y > 97 % en las etapas de lavado. Este comportamiento responde a la disminución de los elementos nocivos en el mineral procesado, alcanzándose valores inferiores a 6.5 % de sílice y 1.5 % de magnesio.

En marzo de 2022 se realizó una prueba tecnológica para la evaluación de la incorporación al proceso de los minerales de Zona Septentrional y de esta manera evaluar el impacto que tendría en el mismo. En abril se inicia la prueba industrial basada en la conformación de la mezcla alimentada al proceso con un 25-35 % de participación de los minerales de Zona Septentrional. Esta prueba se extendió por 11 días, alimentándose 69,669 t de mineral, lo que representa el 43.42 % de la mezcla procesada, la mayor contribución en el minado fue de Camarioca Norte con un 54.94 %.

Se obtuvieron como resultados que durante el período de alimentación del mineral de Zona Septentrional, no se alcanzan considerables valores de ley de Ni+Co, manteniéndose por debajo de

1.20 % en todo el periodo; los contenidos de nocivos alimentados a Lixiviación exhibieron una disminución, llegando a estar por debajo de 7 % para la sílice y de 1.7 % para el magnesio; la capacidad de Lixiviación no se afectó producto al balance de mineral, lográndose un incremento del inventario de mineral en el proceso superior a las 60,000 t, asociado a la cercanía del yacimiento Zona Septentrional. Los valores de eficiencia en la planta de Lavaderos estuvieron en el orden de 97 %, en este aspecto tiene gran influencia el bajo contenido de elementos nocivos procesados en Lixiviación. (Reyes Gonzalez, 2022)

### **Investigaciones realizadas sobre la eficiencia de recuperación y el rechazo del mineral útil de la Planta de Preparación de Pulpa.**

En el año 1994 un grupo multidisciplinario conformado por profesionales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM) y de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba realizaron un estudio para caracterizar el rechazo de la Planta de Preparación de Pulpa. Los resultados obtenidos demostraron que más de la mitad de este producto residual lo constituían partículas del componente valioso para el proceso extractivo y que para compensar estas pérdidas en el rechazo se debía incrementar la extracción minera, el desbroce y escombreo de mayores volúmenes de material. Al reprocesar una muestra del rechazo industrial en las instalaciones de la planta de beneficio del ISMM se logró obtener una recuperación del 90 %. (Hernandez Flores)

En el año 2017 se caracterizaron granulométricamente 26 muestras de diferentes frentes en explotación y se determinó experimentalmente que la causa del incremento del rechazo de la Planta de Preparación de Pulpa está condicionado a la incorporación al proceso de menas que no constituyen limonita de balance y que aportan al proceso prácticamente la mitad de las fracciones que se rechazan, comprendidas entre 0,84 mm y 100 mm. También se confirmó que existe un incremento en las menas alimentadas al proceso con tamaño de partículas entre 0,84 mm y 100 mm. Esta incorporación genera un incremento considerable del contenido de rechazo, moviéndose de 18 % (hace 5 años) a valores en el rango entre 26 % y 30 %. (Cuenca Tellez, 2017)

### **Evaluación tecnológica de una mezcla de mineral compuesta por mineral de Camarioca Norte-Zona Septentrional-Atlantic.**

En el año 2022 se conformó una mezcla compuesta por 40 % de Camarioca Norte A-14, 40 % de Zona Septentrional de los cuales el 40 % constituía saprolita y 20 % de Atlantic. La mezcla presentó muy bajos valores de % de rechazo y arena: 6.62 % y 3.81 % respectivamente. Se llegó a la conclusión que la pulpa obtenida presenta muy buenas características de sedimentación. La mezcla requiere de alta RAM (0.338), los resultados arrojaron buena extracción con RAM de 0.300 sin embargo la sedimentación de la pulpa lixiviada fue mala (8 mm/2h). (Ramirez, 2022)

### **Pasaporte Muestra Tecnológica Atlantic**

En el 2022 se realizó una corrida a escala industrial con el mineral del yacimiento Atlantic donde se llegó a la conclusión que la baja ley de mineral en el período de prueba no solo tiene que ver con la baja ley de Atlantic, sino a que los yacimientos alimentados tampoco aportaron suficiente Ni+Co. El beneficio que aporta Atlantic radica principalmente en el aumento del contenido de Fe en el mineral alimentado y por consiguiente en la velocidad de sedimentación de la pulpa cruda. El aumento en la sedimentación de la pulpa por la participación de Atlantic, se traduce en aumento del % de sólido de fondo y precalentado. El incremento en el % de sólido de fondo responde a la combinación de incremento de consumo de sal y la participación de Atlantic en el proceso. (Reyes Gonzalez, 2022)

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

El presente capítulo está dedicado a mostrar los materiales y métodos utilizados en el trabajo experimental, el cual se llevó a cabo en el Laboratorio de Tecnología de la empresa y en el que existen los equipos necesarios para su realización.

### **2.1 Materiales y equipos utilizados**

Los equipos utilizados fueron:

- Agitadores de hélices con impelente mecánico IKA RW 47 D.
- Balanza técnica digital SARTORIUS combies 3.
- Balanza analítica digital METTLER TOLEDO ML
- Horno FELISA

Además, se emplearon los siguientes utensilios:

- Tanquetas de 20L para la preparación de la pulpa
- Probeta graduada a 2000ml
- Probeta graduada a 1000ml
- Regla graduada en milímetros
- Bomba de mano
- Jeringuillas de 10 y 20 ml.
- Juegos de tamices Tyler (20 Mesh).
- Agitadores de mano

### **2.2 Métodos de preparación y clasificación de la pulpa.**

Previo a la alimentación al proceso se requiere demostrar donde se concentra la mayor proporción de níquel por fracciones si en la -200 o en la +100, que yacimiento tiene arena metalúrgica y cuál es el yacimiento donde la arena es inerte en la lixiviación, por lo que se hace necesario realizar una adecuada preparación de las muestras tomadas en las diferentes áreas de los yacimientos mineros Camarioca Norte (A-20, A-19, A-16), Moa Oriental (A-7, A-34), Zona Septentrional, Atlantic, Criba Fija, Playa la vaca pozo 1(LF), Playa la vaca pozo 1(LB). Para la preparación de estas muestras de mineral crudo, fueron utilizadas muestras puntuales.

Procedimiento:

Para la caracterización de una muestra de mineral es imprescindible durante su procesamiento que se consideren las siguientes etapas:

### **Toma de muestra**

La muestra debe ser representativa del blanco, área y frentes mineros. Esta muestra debe poseer contribuciones de serpentina y escombros en una cantidad de aproximadamente 7% que son valores semejantes a los que en la calidad se está alimentando al proceso. La muestra está aproximadamente entre 4-10 kg de cada área que se quiere evaluar en los yacimientos. Para ello se emplearon tanquetas de 20 L para su traslado, asegurando que estén debidamente tapadas cuando se produzca su transportación y se pesa en una balanza técnica digital SARTORIUS combies 3 que se muestra en la Figura 2.1.



Imagen 3. Balanza técnica digital SARTORIUS COMBIES 3.

### **Método para la preparación de la pulpa cruda**

#### **Homogenización de la muestra**

La homogenización de la muestra del mineral en su forma natural se realizará por el método del cono y del anillo. Este método consiste en verter la muestra de la tanqueta en una superficie plana y limpia, el mineral debe caer formando un cono del cual se comenzará a separar pequeños bultos de tierra formando un círculo. Luego se debe reunir cada uno de los bultos de tierra formado, creando una pila en forma de cono. Repetir este procedimiento aproximadamente 3 veces para garantizar una adecuada homogenización de la muestra.

## Preparación de la pulpa

El mineral homogenizado luego de pesar y determinar la humedad, se vierte en una tanqueta hasta la mitad, añadir agua y comenzar a agitar en un agitador de hélices con impelente mecánico IKA RW 47



D, como se muestra en la Figura 2.2, hasta formar una pulpa. Se recomienda un régimen de agitación intenso, moviéndose en el rango de 700 a 800 rpm, la cual se debe ir regulando a medida que se observe el espesamiento del mineral. Se recomienda no agitar por un tiempo superior a los 5 min debido a que podría ocasionar cambios en las propiedades reológicas del mineral lo que incidiría directamente en los resultados al alcanzarse valores en la velocidad de sedimentación alejados del valor real.

Imagen 4. Agitador de hélices con impelente mecánico IKA RW 47 D.

### 2.3 Determinación de la granulometría

En la granulometría se realiza, usando tamices de 20 mesh (0.833 mm) y de clasificación atendiendo a los diferente por ciento en peso retenido >0.833 mm (% de gravilla); <0.833 mm (Mineral útil) y <0.833 mm y >0.15 mm (% de arena).

En el caso del % de arena, se requiere que sea (>12 %), ya que esta es la principal causante de las tupiciones en el proceso. Para el rechazo, se necesita que sea (>18), un valor más alto que este ya sería un área de recuperación. El mineral útil, debe de ser (<80), debido a que esta parte del mineral es la que se aprovecha en el proceso.

### 2.4 Determinación de la densidad de la pulpa y el % de sólido

Una vez conformada la pulpa y tamizada por la malla de 20 mesh, tomar 2 000 ml medido en una probeta de ese volumen previamente tarada. Pesar la pulpa en una balanza analítica digital del modelo METTLER TOLEDO ML como se muestra en la Figura 2.3 y anotar el peso.

$$\rho_P = \frac{m_P}{V_P} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\% \text{ de sólidos} = \frac{\rho_S(\rho_P - \rho_L)}{\rho_P(\rho_S - \rho_L)} * 100 \dots \dots \dots (2.2)$$

Determinar densidad de la pulpa por la ecuación (2.1) y el % de sólido mediante la ecuación (2.2).

Donde:

- $\rho_P$ : Densidad de la pulpa (g/ml).
- $m_p$ : Masa de la pulpa (g)
- $V_p$ : volumen de pulpa (ml)
- $\rho_S$ : Densidad del sólido. Se asume como gravedad específica del sólido 3.55 g/ml.
- $\rho_L$ : Densidad del líquido. A 30°C, la densidad del agua es de 0.996 g/ml.



Imagen 5. Balanza analítica digital METTLER TOLEDO ML.

### 2.5 Determinación del % de rechazo o de gravilla

El retenido en el tamiz, previamente tarada y lavada con abundante agua hasta que el agua salga limpia. Seguidamente se pasará la malla con el retenido y se calculará el por ciento de rechazo usando la ecuación 2.3.

$$\% \text{ de rechazo} = \frac{0.8 * m_{\text{retenido}(+20 \text{ mesh})}}{\% \text{ de sólido} * m_p} * 100 \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde:

- 0.8: Factor de humedad que contempla el agua absorbida por el material que se lava.
- $m_{\text{retenido}(+20\text{mesh})}$ : masa del retenido en el tamiz malla 20 mesh (g).
- $\% \text{ sólido}$ : % de sólido correspondiente a la pulpa analizada contenida en la probeta de 2 000 ml, determinado anteriormente.  $m_p$ : masa de la pulpa contenida en la probeta de 2 000 ml (g).

En el caso de que se cuente con un horno para esta evaluación, una vez que se lava el retenido, se verterá en una bandeja o platillo (previamente tratada y guardado su peso), colocándolo posteriormente en el horno FELISA del modelo FE 293 como se muestra en la Figura 2.4, para secarlo. El tiempo de secado en el horno será aproximadamente 24 horas, a una temperatura constante de 80oC. Pesar el platillo con el retenido una vez que la muestra esté a temperatura ambiente, en balanza analítica, descontando el peso del envase y calculando el % de rechazo o gravilla a partir de la ecuación (2.3) sin tener en cuenta el factor de humedad (0.8).



Imagen 6. Horno FELISA, modelo FE 293

## 2.6 Determinación del % de arena

Se extrae 2 000 ml de la pulpa desprovista de partículas mayores de 20 mesh en una probeta previamente tarada. Pesar la pulpa contenida en la probeta por un tamiz de malla 100 mesh previamente tarada y lavar con abundante agua, hasta que el agua salga limpia.

Realizar el mismo procedimiento de secado que en punto anterior si no se cuenta con un horno y seguidamente pesar la malla con el retenido y calcular el % de arena usando la ecuación (2.4).

$$\% \text{ de Arena} = \frac{0.65 * m_{\text{retenido (+100 mesh)}}}{\% \text{ de sólido} * m_{P-1}} * 100 \dots \dots \dots (2.4)$$

Donde:

- 0.65: Factor de humedad que contempla el agua absorbida por el material que se lava.
- $m_{\text{retenido(+100mesh)}}$ : masa del retenido en el tamiz malla 100 mesh (g).
- %sólido: % de sólido correspondiente a la pulpa analizada contenida en la probeta de 2 000 ml, determinado anteriormente.

- $m_{p-1}$ : masa de la pulpa contenida en la probeta de 2 000 ml (g).

Si se cuenta con un horno para esta evaluación, realizar el procedimiento de secado descrito en el punto anterior y calcular el % de arena usando la ecuación (2.4), sin tener en cuenta el factor de humedad (0.65).

### 2.7 Determinación de la velocidad de sedimentación

De la pulpa desprovista de partículas mayores de 20 mesh se extrae 1 000 ml en una probeta previamente tarada y se determina el % de sólido siguiendo el procedimiento antes mencionado. Una vez definido el sólido de la pulpa, se procede a diluir la misma hasta obtener un % de sólido de 12.5%.

$$V_p = \frac{\% \text{ de sólidos}_{deseado} * \rho_{P \text{ deseada}}}{\% \text{ de sólido}_{real} * \rho_{P \text{ real}}} * Volumen_{promedio} \dots \dots \dots (2.5)$$

Don

de:

- $V_p$ : Volumen necesario de la pulpa para obtener 12.5% sólido (ml).
- $\% \text{ de sólido}_{deseado}$ : por ciento de sólido deseado (12.5%).
- $\rho_{P \text{ deseada}}$ : densidad deseada (1.095 g/ml).
- $\% \text{ de sólido}_{real}$ : por ciento de sólido de la pulpa inicial.
- $\rho_{P \text{ real}}$ : densidad de la pulpa inicial (g/ml).
- $Volumen_{promedio}$ : volumen de la probeta que se usa (en este caso 1 000 ml).

Luego de calculado el volumen de la pulpa necesaria para alcanzar 12.5% de sólido, se extrae la pulpa sobrante de la probeta y se sustituye por agua de proceso hasta alcanzar los 1 000 ml. Posteriormente se procede a agitar la pulpa de 8 a 10 veces de forma continua con un agitador de mano. Se deja en reposo por un período de 2 h. La lectura de la velocidad de sedimentación se realiza cada 1h, leyendo la altura existente entre la superficie del líquido y la interfase líquido-sólido, con una regla graduada en milímetros. La velocidad de sedimentación reportada es la altura de la superficie del líquido y la interfase líquido-sólido mediante las 2 h en (mm/2 h).

### 2.8 Lixiviación en autoclave de laboratorio

Lixiviación: es una técnica ampliamente utilizada en metalurgia extractiva que convierte los metales en sales solubles en medios acuosos. En la Empresa se efectúa la disolución de los óxidos de Níquel y Cobalto contenidos en el mineral laterítico en forma de sulfatos, a través de un reactivo químico conocido con el nombre de Ácido Sulfúrico. La lixiviación de sulfuros es un proceso más complejo debido a la naturaleza refractaria de minerales de sulfuro y esto implica el uso de recipientes a presión (autoclaves o reactores).

La lixiviación del mineral laterítico a escala de laboratorio, simulando el proceso industrial, permite predecir el comportamiento de los diferentes frentes de minería, yacimientos o pulpas en la lixiviación a escala industrial.

Tabla 3. Condiciones instrumentales de diseño.

Temperatura	250 °C (230 a 260) °C
Presión total	3900 kPa (2700 a 4600) kPa
Tiempo de retención	3 horas. (Lixiv. - 1 hora)
Agitación	900 Rev/min.
Composición de la solución final	30 g/L de ácido sulfúrico 7 g/L de níquel 0.6 g/L de cobalto
Extracción.	95 %

### 2.8.1 Preparación de la pulpa

Se prepara la pulpa en condiciones similares a la pulpa alimentada a la planta de lixiviación con sólidos de 35 a 40 % y granulometría de -20 mesh (0.83 mm). En caso de que la pulpa inicial no tenga el % de sólido requerido, se deja reposar y se decanta el agua clara.

Se pesa de 2480 a 2500 g de pulpa preparada en un recipiente de boca ancha, que calculado en volumen oscila entre 2.5 y 2.7 L, (recomendado para operar la autoclave) y se completa con agua para alcanzar 28 % de sólido final.

Se determina el peso de los sólidos seco de la pulpa según la fórmula siguiente:

$$\text{Sólido seco crudo} = \frac{\text{peso de la pulpa} \times \% \text{ de sólidos}}{100} \dots\dots\dots (20)$$

Donde:

Peso de la pulpa: Cantidad de pulpa pesada para la lixiviación, en g.

% de sólidos: % de sólidos determinado a la pulpa en la balanza calorimétrica

Se calcula el agua que trae inicialmente la pulpa por la fórmula siguiente:

$$\text{Agua} = \text{Peso de la Pulpa} - \text{Peso sólido seco crudo} \dots\dots\dots (21)$$

El % de sólidos seco lixiviado se calcula por la fórmula siguiente:

$$\text{Peso de sólido seco lixiviado} = \text{Peso de sólido seco crudo} \times 0.92 \dots\dots\dots (22)$$

Donde:

Factor de lixiviación: 0.92

Se determina la cantidad de ácido sulfúrico de concentración conocida por la fórmula siguiente:

$$\text{Peso de ácido sulfúrico} = \frac{\text{peso sólido seco crudo} \times \text{RAM}}{\text{concentración del ácido}} \dots\dots\dots (23)$$

Donde:

RAM: relación ácido/mineral, generalmente fijada para la prueba como 0.3.

Concentración del ácido: concentración de ácido sulfúrico, en %.

Se pesa la cantidad de ácido sulfúrico calculada, en un vaso de precipitados, previamente tarado y se reserva para la lixiviación.

**NOTA:** Se fijan los sólidos finales para la lixiviación como 28 %, aunque ese valor se puede variar.

### 2.8.2 Cálculo del licor obtenido en la lixiviación

Se calcula la cantidad de licor obtenido en la lixiviación por la fórmula siguiente:

$$\text{Licor} = \frac{\text{peso sólido seco lixiviado}}{\% \text{ sólido}/100} * \frac{1-\% \text{ sólido}}{100} \dots\dots\dots (24)$$

Donde

% de sólidos: se estableció como 28 %

### 2.8.3 Cálculo de la cantidad de agua que se debe adicionar en la prueba

Se determina la cantidad de agua a añadir en la prueba de lixiviación por la fórmula siguiente:

$$\text{Agua a añadir} = (\text{licor} - \text{ácido} - \text{agua inicial en la pulpa}) \dots\dots\dots(25)$$

Se pesa la cantidad de agua calculada en un recipiente previamente tarado y se reserva para la prueba.

### 2.8.4 Procedimiento para operar la autoclave

Se vierte la pulpa reservada dentro de la autoclave, lavando las paredes del recipiente receptor de pulpa y las paredes interiores de la autoclave con el agua reservada para la lixiviación, adicionándola toda a la autoclave. Esta operación de lavado de las paredes, se realiza para evitar pérdidas de agua y de pulpa.

Se baja el cabezal de la autoclave con la palanca de izaje y se enrosca la rosca del cabezal con la del cuerpo de la autoclave, se aprietan los pernos en forma de cruz y después el resto hasta que queden bien apretados.

Se coloca la correa en la polea del agitador y se alinea la guardera.

Se conecta la línea del disco de ruptura del drenaje a la atmósfera

Se cierran las válvulas de entrada de ácido y despresurización.

Se coloca el sistema de enfriamiento al eje del agitador.

Se arranca el agitador y se abre la válvula de enfriamiento, se comprueba que la velocidad alcanzada por el agitador sea la fijada para la prueba (900 rev/min).

Se conecta el termo-par y se comienzan las operaciones para el encendido del quemador.

Se coloca el botón en posición piloto y se presiona, acercando una llama al piloto para el encendido del mismo. Se suelta el botón lentamente, sin dejar que se apague el piloto, buscando que el mismo pueda girar hacia la izquierda, para colocarlo en posición de operación (posición ON).

Se chequea el equipo de control de temperatura, si está en el Modo correcto, inmediatamente se coloca en posición de encendido. Con esta operación se enciende el quemador y comienza el calentamiento de la autoclave.

Cuando la temperatura de la autoclave llega de 140 a 170 °C, se le añade el ácido a la bala, manteniendo la válvula de salida cerrada. La adición del ácido sulfúrico se realiza a través de un embudo colocado en la válvula de entrada de la misma. Esta operación se efectúa lentamente para evitar pérdidas de ácido por derrames o salpicaduras, siendo necesario desechar este, y añadir la cantidad pesada.

Se conecta la bala a la autoclave en la línea de inyección de ácido y la línea del balón de nitrógeno a la bala, la cual estará presurizada a 4200 kPa.

Cuando el control de temperatura marque 200 °C se presuriza con nitrógeno, por tramo de tubería de mayor a menor presión.

Se abren lentamente las válvulas de la línea de inyección a la autoclave, observando que no se produzcan incrementos bruscos de presión y que el manómetro indique 4 200 kPa. Se esperan de 10 a 20 segundos para garantizar que todo el ácido penetre a la autoclave.

Se cierra el sistema nuevamente.

Posteriormente se aumenta la presión de nitrógeno a 4 800 kPa, lo que asegura que todo el ácido sulfúrico pasó a la autoclave.

Se abren lentamente las válvulas de inyección a la autoclave, observando que no se produzcan incrementos bruscos de presión y se revisa el preñe del agitador y las válvulas para detectar posibles salideros.

Se cierran todas las válvulas del sistema hasta la línea de nitrógeno. Se despresuriza el tramo desde la línea de nitrógeno hasta la bala.

Se chequea que la temperatura durante la lixiviación se mantenga en 246 °C, para ello se ventea periódicamente nitrógeno a la atmósfera durante el tiempo pre establecido que durará la lixiviación.

**Para parar la autoclave se realizan las operaciones siguientes:**

1. Se apaga el controlador de temperatura y se cubre con un nylon para evitar que le caiga agua.
2. Se coloca el protector al quemador.
3. Se comienza el enfriamiento de la autoclave lentamente con agua, abriendo poco a poco la válvula de agua de enfriamiento. Se aumenta la abertura de la válvula a medida que desciende la temperatura, hasta que llegue a los 100 °C.
4. Se cierra la válvula de adición de agua.
5. Se para el agitador.

6. Se retira la correa y el sistema de enfriamiento del eje de la autoclave.
7. Se comienza a despresurizar la autoclave por la válvula de despresurización.
8. Cuando el manómetro marque cero, se coloca un paño en la línea de inyección de ácido y se abren las 2 válvulas de entrada de ácido a la autoclave, para despresurizar ese tramo
9. Se desconecta el drenaje de la línea del disco de ruptura.
10. Se desconecta el termopar.
11. Cuando la autoclave esté totalmente despresurizada, se quitan los pernos, se desenrosca el cabezal, se levanta con la palanca de izaje y se retira la junta.

### 2.8.5 Preparación de la muestra para análisis químico

Se extrae la muestra por vacío hacia un Kitasato preparado para esta operación.

Se homogeniza la pulpa lixiviada, se vierten 1000 ml en la probeta previamente tarada y se pesa (reservándose para la determinación de velocidad de sedimentación y densidad de la pulpa).

El resto se homogeniza y se vierte en 2 embudos buchner al vacío al que previamente se le colocó papel de filtro de densidad media.

Se recibe el filtrado en dos kitasatos destinando una muestra de licor para la determinación de la densidad, y la otra para el análisis químico del licor, la cual se vierte en un frasco seco, se tapa y se codifica.

El sólido de uno de los embudos se desecha, y el otro se destina para el análisis químico. En este caso se lava hasta  $\text{pH} > 3.5$  en el licor filtrado utilizando agua destilada previamente calentada hasta  $\sim 70^\circ\text{C}$ .

Se transfieren los sólidos a un platillo se colocan en la estufa a  $92^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  durante 2 horas.

Se dejan enfriar a temperatura ambiente, se vierten en un mortero de porcelana se trituran y se cuartean.

Se pasan todos los sólidos por un tamiz malla 100 mesh, se envasan, se codifican y se envían al laboratorio conjuntamente con el licor para el análisis químico, señalándole las determinaciones a realizar.

### 2.8.6 Determinación de la eficiencia de extracción de los metales de interés

Considerando que el Fe no se lixivia durante el proceso en los reactores, entonces se puede decir que:

$$\text{Fe}_{\text{FS}} * \text{FS} = \text{Fe}_{\text{LS}} * \text{LS} \dots\dots\dots (26)$$

De lo que se deriva que  $\frac{\text{Fe}_{\text{FS}}}{\text{Fe}_{\text{LS}}} = \frac{\text{LS}}{\text{FS}} \dots\dots\dots (27)$

Luego haciendo un balance de Ni se tiene que:

$$\text{Ni}_{\text{FS}} * \text{FS} = \text{Ni}_{\text{LS}} * \text{LS} + \text{Ni}_{\text{FS}} * \text{FS} * \text{Extr}_{\text{Ni}} \dots\dots\dots (28)$$

Despejando  $Extr_{Ni}$  se tiene que

$$Extr_{Ni} = \frac{Ni_{FS} * FS - Ni_{LS} * LS}{Ni_{FS} * FS} \dots\dots\dots (29)$$

$$Extr_{Ni} = \frac{Ni_{FS} - Ni_{LS} * LS/FS}{Ni_{FS}} \dots\dots\dots (30)$$

Si se sustituye en ecuación 27 la 24, se tiene que:

$$Extr_{Ni} = \frac{Ni_{FS} - Ni_{LS} * (F_{eFS}/F_{eLS})}{Ni_{FS}} * 100 = \frac{Ni \text{ que se disolvió en el licor}}{Ni \text{ alimentado}} \dots\dots\dots (31)$$

Para determinar la extracción de Co se sigue el mismo procedimiento anterior.

### CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El propósito de este capítulo consiste en presentar y analizar los resultados de la caracterización físico química de los principales frentes de minería en explotación actual por la fábrica. Además, se muestran los resultados de las lixiviaciones a escala piloto.

#### 3.1. Caracterización granulométrica de los frentes en explotación minera

A continuación, se presenta los resultados del análisis granulométrico para los frentes estudiados: Camarioca Norte (A-16, A-19, A-20), Moa Oriental (A-7, A-34), Zona A (A5), Playa la Vaca (LF, LB), Atlantic, Zona Septentrional y Criba Fija. Siguiendo el procedimiento descrito en el epígrafe 2.3, fue determinada la composición granulométrica de las áreas en explotación mineras, atendiendo a las clases de tamaños 20, 100 y 200 mesh lo que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4. Resultado de la clasificación granulométrica de las muestras estudiadas.

Clase	% en peso											
	CN-A16	CN-A19	CN-A20	MO-A7	MO-A34	Zona A A5	Playa la Vaca LF	Playa la vaca LB	Atlantic	Zona Sept	Ciba Fija	
+20	3,19	3,19	3,19	11,800	6,56	39,24	1,59	6,47	9,4	3,44	4,94	
-20+100	7,785	14,265	11,36	2,877	2,74	7,41	5,674	2,315	12,262	27,395	11,208	
-100+200	8,29	8,29	8,29	3,359	0,517	22,506	1,234	1,684	7,055	7,99	6,174	
-200	83,925	77,445	80,35	93,765	96,743	70,084	93,092	96,002	80,683	64,615	82,619	
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Según se muestra en la Tabla 3.1, el área con mayor contenido de las fracciones >20 mesh, fue: Zona A A5 con un 39.24%. Este valor puede estar asociado a la incorporación de zonas o áreas de recuperación. Moa Oriental (A-34, A-7), Playa la Vaca (LB) y Atlantic fueron las áreas con comportamiento aceptable, quedando en el rango entre 5 y 17 %.

Con relación a la clase de tamaño -20+100 mesh, los mayores registros lo exhiben Zona Septentrional con 27.4 %, estando en correspondencia con las disímiles evaluaciones realizadas a este material, CN-A19 con un 14.26 % y Atlantic con un 12.26 %, todas por encima de lo establecido (12 %).

#### 3.2. Distribución de los metales de interés en las clases de tamaño evaluadas

A continuación, se presenta de forma gráfica los resultados del análisis químico por fracciones de cada área minera caracterizada. En este apartado se hace mayor énfasis en la clase granulométrica - 20 + 100 mesh (arena) ya que resulta del mayor interés determinar su comportamiento.

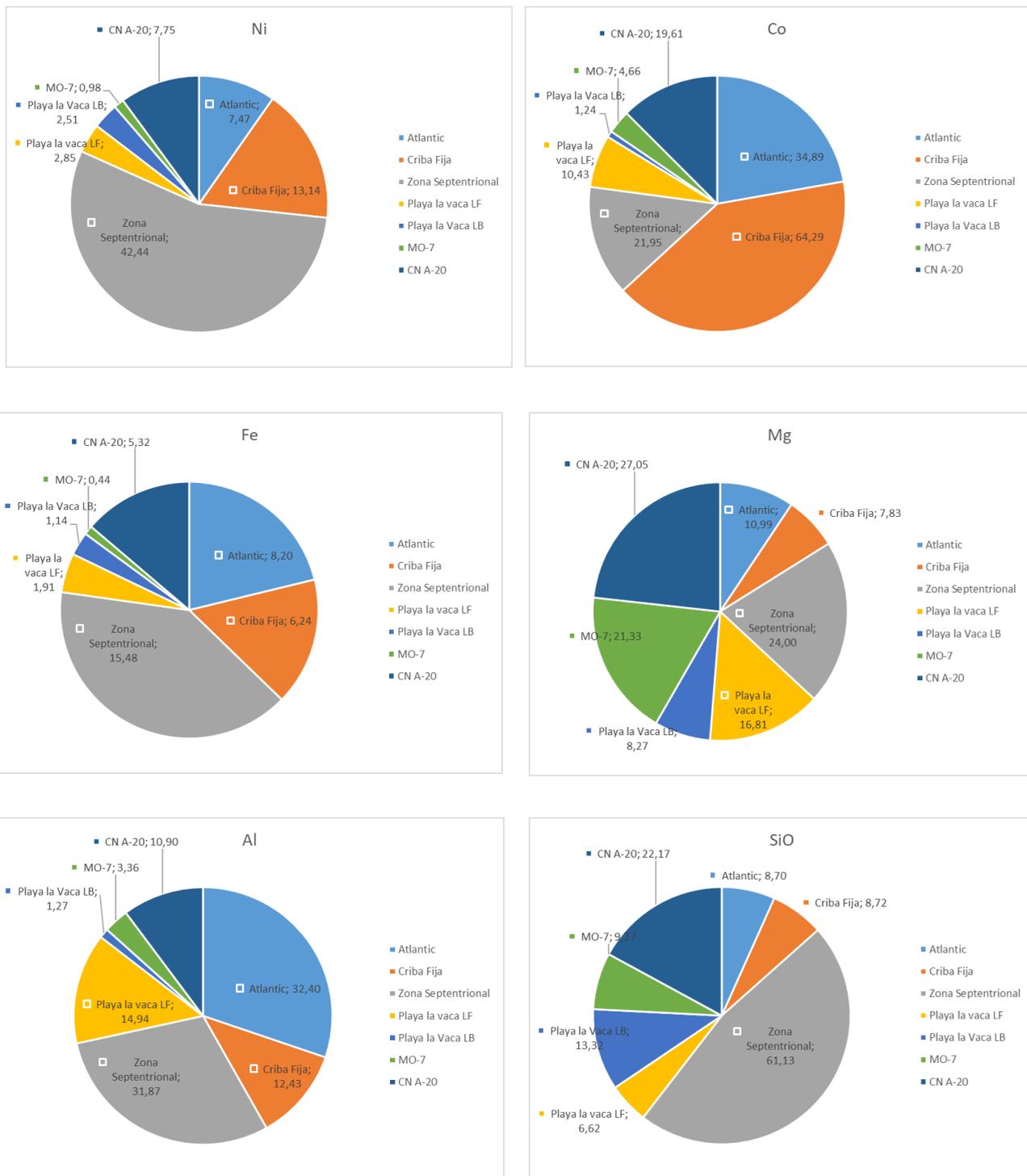


Imagen 7. Concentración de los principales elementos de interés en la clase de tamaño – 20 + 100 mesh.

Según los resultados del análisis químico efectuado en las diferentes clases granulométricas, específicamente en la fracción – 20 + 100 mesh, se pueden realizar las siguientes observaciones:

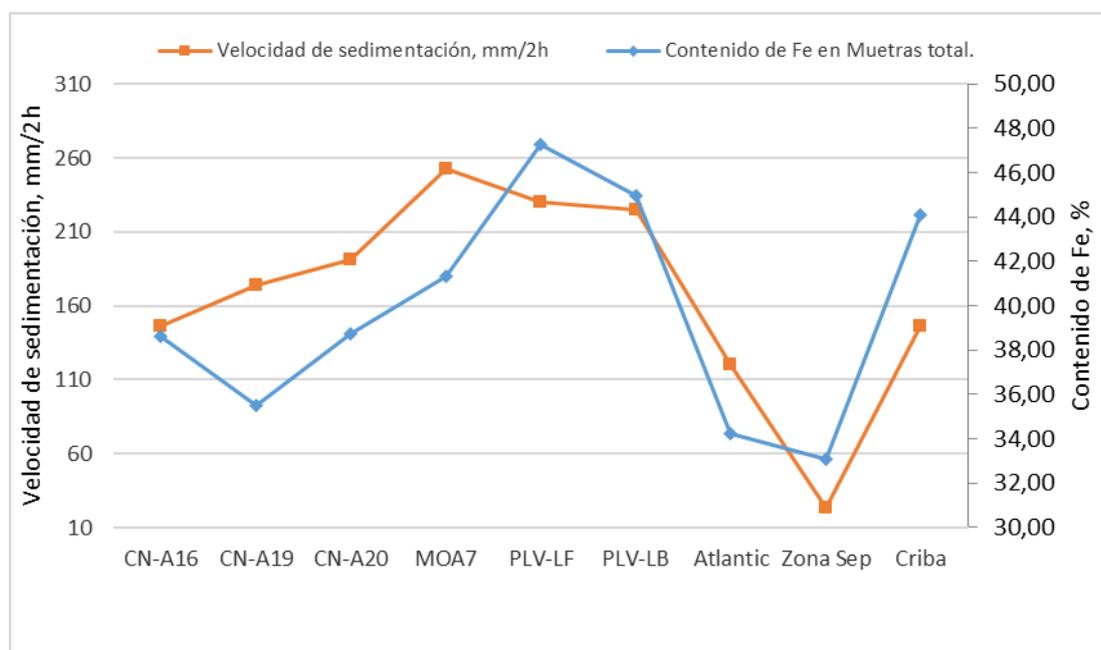
- En el yacimiento Zona Septentrional, el 42.44 % del Ni se concentra en esta fracción granulométrica, siendo además el que más contenido en peso de esta fracción aporta con 27.4 %. El Co se concentra en un 21.95 % y el Fe en un 15.48 %. De los elementos nocivos, el SiO<sub>2</sub> es el que

mayor valor muestra con un 61.13 %, por lo que esta fracción es portadora de un elevado contenido de este elemento.

- En el yacimiento Atlantic, el Co y el Al registran valores considerables, concentrándose un 34.89 % y 32.49 % respectivamente en esta fracción que es de un 12.26 % en peso. El resto de los elementos se concentran en mayor cuantía en las fracciones más finas.
- En el área de Criba Fija, el Ni y el Co se concentran en un 13.14 % y 64.29 % respectivamente para una contribución de esta fracción de 11.21 % en peso.
- En Camarioca Norte A 20 con un 11.36 % en peso de esta fracción, el Co se concentra en un 19.61 %, de igual manera se comporta el Mg y el SiO<sub>2</sub> concentrándose en un 27.05 % y 22.17 % respectivamente.
- El resto de los yacimientos presentan baja contibución de esta fracción granulométrica.

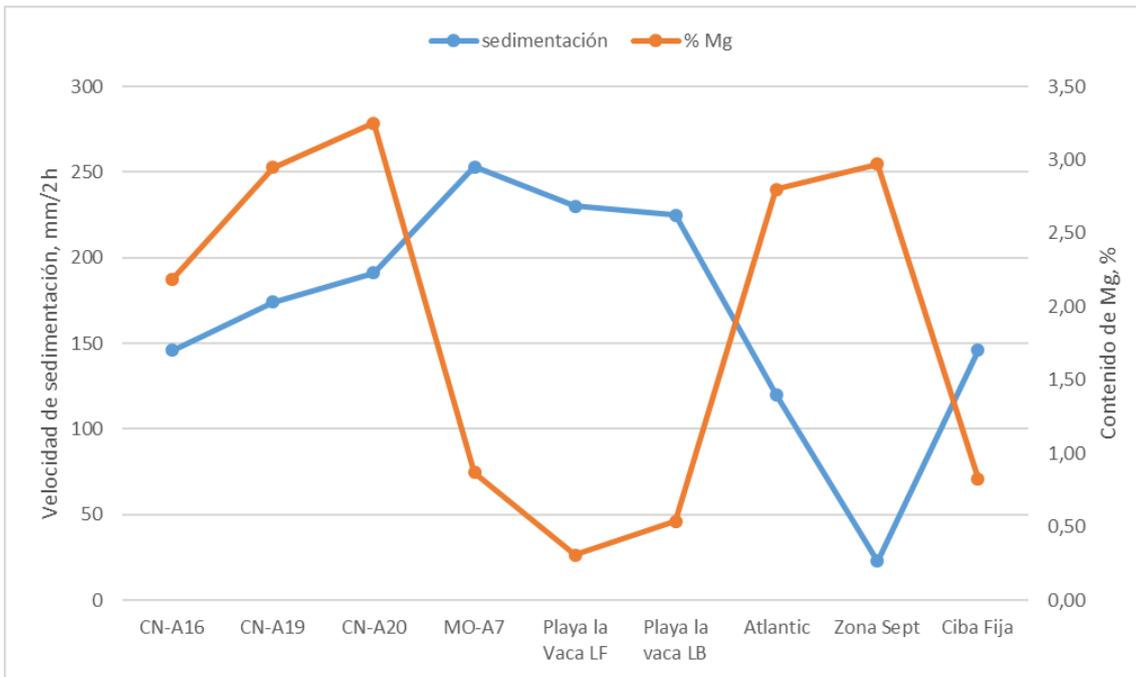
### 3.3. Determinación de la velocidad de sedimentación y su correlación con los análisis químicos

Según procedimiento 2.7 se determinó la velocidad de sedimentación de las muestras estudiadas. Con estos resultados, y los análisis químicos granulométricos se analizó la influencia de los mismos sobre el comportamiento de la velocidad de sedimentación. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



**Imagen 8.** Correlación entre la velocidad de sedimentación y el contenido de Fe.

Como se puede observar, existe una buena correlación entre el contenido de Fe y la velocidad de sedimentación de la pulpa cruda. A medida que se incrementa el contenido de Fe aumenta la velocidad de sedimentación de manera proporcional.

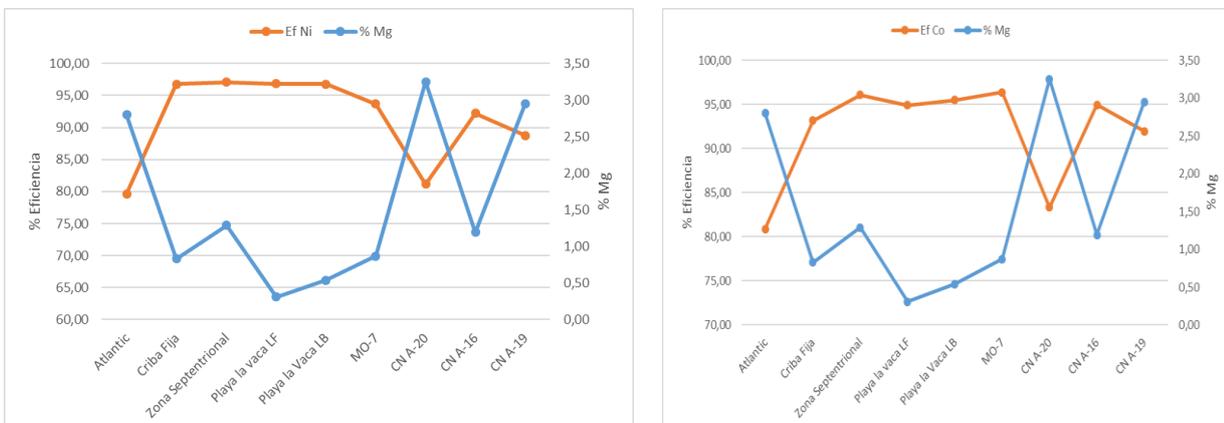


**Imagen 9.** Correlación entre la velocidad de sedimentación y el contenido de Mg.

Se puede observar que el contenido de Mg guarda una estrecha relación con la velocidad de sedimentación. A medida que se incrementa el contenido de Mg, se afecta considerablemente la velocidad de sedimentación.

### 3.4. Evaluación a escala piloto del comportamiento de los diferentes yacimientos en la lixiviación ácida

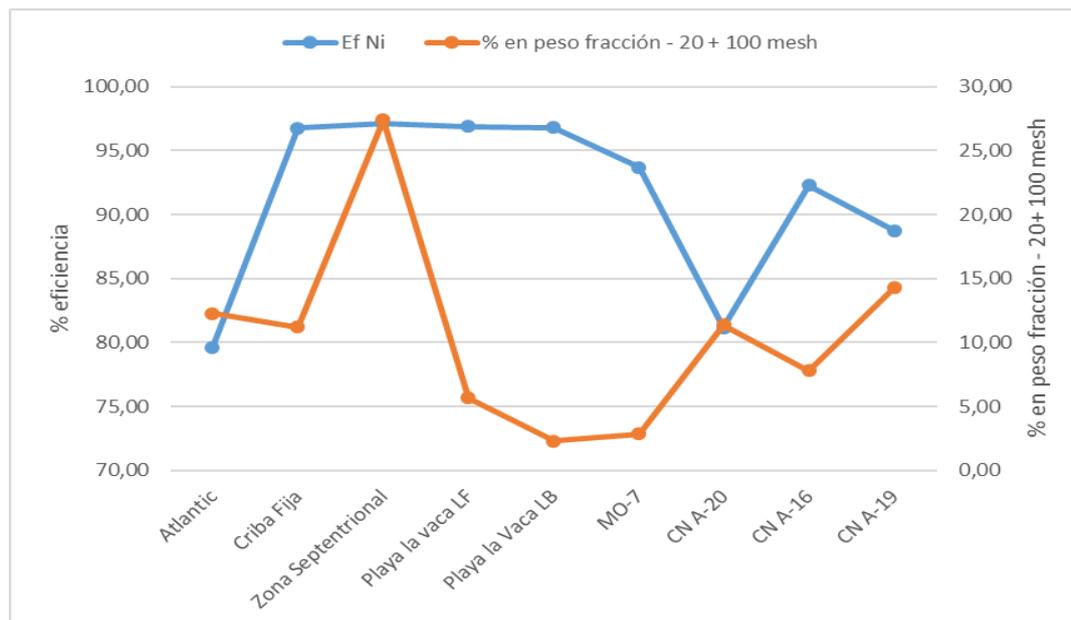
Siguiendo el procedimiento descrito en el epígrafe 2.8, se realizó la lixiviación de cada muestra de los yacimientos de manera independiente. Todas las lixiviaciones se realizaron en condiciones estándar de 0.300 RAM y 225 psi. A continuación, se muestran los resultados de las extracciones de Ni y Co y su interacción con el contenido de algunos metales y la granulometría de la pulpa alimentada.



**Imagen 10.** Comportamiento de la eficiencia de extracción del Ni y el Co vs el contenido de Mg.

Según muestran los gráficos anteriores, la eficiencia de extracción del Ni y el Co se afecta cuando se incrementa el contenido de Mg, ya que este es un elemento alto consumidor de ácido. De manera general, se obtuvieron buenos valores de eficiencia de extracción de Ni y Co, superando en su mayoría al 95 % de extracción.

Con respecto a la interacción entre la composición granulométrica de la pulpa y la eficiencia de extracción, se obtuvo que a medida que se incrementa el contenido de la fracción – 20 + 100 mesh por encima del 10 % se afecta la extracción.



**Imagen 11.** Comportamiento de la extracción de Ni vs contenido de la fracción – 20 + 100 mesh.

Sin embargo, llama la atención el punto correspondiente al yacimiento Zona Septentrional, donde se observa que es el yacimiento con más alto contenido de dicha fracción y la eficiencia no se afecta. Teniendo en cuenta el alto contenido de Ni presente en esta fracción, se puede decir que este comportamiento está asociado a que la arena de este yacimiento se lixivia prácticamente toda, se calcula que un 93.24% del Níquel en dicha fracción se lixivia. En el área de Criba Fija, se observa un comportamiento similar, se calcula que el 75.4 % del níquel en esta fracción se lixivia. Por esta razón no resultaría factible separar esta fracción del mineral, ya que afectaría considerablemente el balance de níquel.

## CONCLUSIONES GENERALES

Con el desarrollo del presente trabajo se da cumplimiento de los objetivos propuestos, arribando a las siguientes conclusiones:

1. El área con mayor contenido de las fracciones >20 mesh, fue: Zona A A5 con un 39.24%. El resto de las áreas estudiadas manifiesta valores acordes con los requerimientos tecnológicos del proceso. Desde el punto de vista de velocidad de sedimentación, se obtuvieron de manera general buenos resultados, arrojando como valor máximo 253 mm/2 h en Moa Oriental A-7. El mínimo valor lo arrojó Zona Septentrional con 23 mm/2h, el resto de las áreas muestran valores por encima de los 130 mm/2h.
2. Los resultados del análisis químico efectuado en las diferentes clases granulométricas, específicamente en la fracción - 20 + 100 mesh, se pudo observar que en el yacimiento Zona Septentrional, el 42.44 % del Ni se concentra en esta fracción granulométrica, siendo además el que más contenido en peso de esta fracción aporta con 27.4 %. El Co se concentra en un 21.95 % y el Fe en un 15.48 %. De los elementos nocivos, el SiO<sub>2</sub> es el que mayor valor muestra con un 61.13 %, por lo que esta fracción es portadora de un elevado contenido de este elemento.
3. La eficiencia de extracción del Ni y el Co se afecta cuando se incrementa el contenido de Mg por encima de 1.70 %, ya que este es un elemento alto consumidor de ácido. De manera general, se obtuvieron buenos valores de eficiencia de extracción de Ni y Co, superando en su mayoría al 95 % de extracción. Se calculó que un 93,24% del Ni presente en la fracción -20+100 mesh en el yacimiento Zona Septentrional se lixivia, del mismo modo en el área de Criba Fija el 75,4% del níquel en esta fracción se lixivia. Por esta razón no resultaría factible separar esta fracción del mineral, ya que afectaría considerablemente el balance de níquel alimentado a la planta.

## RECOMENDACIONES

1. Continuar con los estudios de implementación de nuevas tecnologías dentro del proceso, que permitan controlar el contenido de las fracciones  $- 20 + 100$  mesh teniendo en cuenta los atractivos contenidos de metales de interés que aportan.

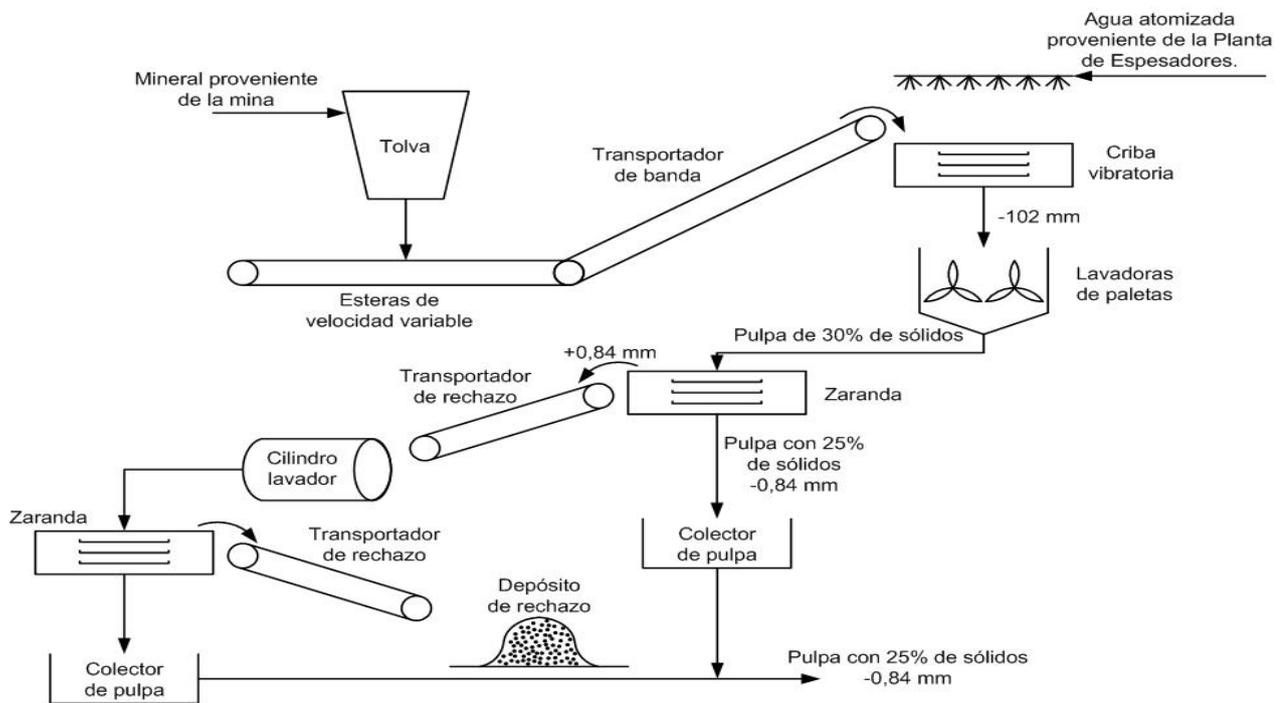
## Bibliografía

- (21 de 03 de 2018). Obtenido de Wikipedia.
- (31 de 05 de 2018). Obtenido de Wikipedia.
- (31 de 05 de 2018). Obtenido de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Mena>
- (24 de 02 de 2018). Obtenido de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/3>.
- (24 de 01 de 2018). Obtenido de <http://deconceptos.com/general>
- Agyei, G. A.-P.-F. (2010). Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*,, 36-52.
- Alberto Hernández Flores, G. A. (16 de 02 de 2017). Estudio fraccional densométrico de la mena laterítica: evaluación del enriquecimiento. págs. 292-308.
- Anache Anache, K. (2016). *Evaluación del empleo del licor neutralizado para la dilución del floculante*.
- Andreu, C. G. (2.008 – 2.009)). *Prácticas de Materiales de Construcción*.
- Cardero, Y. C. (2016). *IDENTIFICACIÓN DE LAS FASES MINERALES PORTADORAS DE NÍQUEL Y COBALTO EN LAS MENAS DEL YACIMIENTO YAGRUMAJE SUR*.
- Comisión-Europea. (2014). *Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group in Defining Critical Raw Materials*. Bruselas, Bélgica.
- Cuenca Tellez, F. (2017). *Evaluación del material de rechazo en la planta de preparación de pulpa, empresa comandante Pedro Sotto Alba*.
- Díaz, L. R. (2014). *“Análisis preliminar del comportamiento del mineral planificado a ser alimentado al proceso”*. Empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba, Dpto. Tecnología de los Procesos. Recuperado el Noviembre de 2022
- Empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba. (2021). *Evaluación del efecto de los minerales de Camarioca Sur en el proceso*. Reporte Técnico, Dpto. Tecnología de los Procesos.
- Fábrica Cmdte. Pedro Sotto Alba. (2016). *Procedimiento Específico*, Versión 0.3. Recuperado el Noviembre de 2022, de *“Lixiviación ácida en Autoclave Piloto”*.
- Falcón Fernández, J. (1983). Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento de moa. En *Consideraciones sobre la sedimentación de la pulpa limonítica en la planta "Comandante Pedro Sotto Alba"* (págs. 173-188).
- Ferriset, P., Butt, C. M., Morris, R. C., & Piantone, P. (2005). Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering. *Economic Geology, 100 th Anniversary Volume*, 681-722.
- Ganganelly, B. (2017). Estudio de sedimentación de la pulpa laterítica a escala piloto en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

- Glesson, S., Butt, C., & Elias, M. (2003). Nickel laterites: A review. *SEG Discovery*(54), 1-18.
- Golightly, J. P. (2010). Progress in Understanding the Evolution of Nickel Laterites. *Special Publications of the Society of Economic Geologists*, 15, 451-485.
- González, Y. R. (2020). *Caracterización de los minerales de Moa Oriental A-22*. Reporte Técnico, Fábrica Cmdte. Pedro Sotto Alba, Dpto. Tecnología de los Procesos. Recuperado el Noviembre de 2022
- Hernandez Flores, A. y. (s.f.). Beneficio de la mena laterítica.
- Hernández, J. (2008). *Curso de tratamiento de minerales*.
- Lambiv Dzemua, G., Glesson, S. A., & Schofield, P. F. (2013). Mineralogical characterization of the Nkamouna Co–Mn laterite ore, southeast Cameroon. *Mineralium Deposita*, 48, 155-171.
- Llorca, S. M. (2007). Metallogeny of supergene cobalt mineralization, New Caledonia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 40, 377-385.
- (04 de 11 de 2018). *Manual de Operaciones Planta de Pulpa*. Obtenido de <http://www.mnpsa.com.cu/Intranet/Calidad/Gestion>.
- Marsh, E., & Anderson, E. (2011). Ni-Co laterite deposits. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 1259-1268.
- MoaNickel SA; Centro Internacional de la Habana SA. (2012). *Yagrumaje Oeste, evaluación y verificación de los recursos medidos*.
- Mora Foster, Y. (2008). *Influencia de la humedad sobre el beneficio y la molienda de los minerales lateríticos*.
- Mudd, G. (2010). Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, 38, 9-26.
- Ostroumov, M. N. (2002). Caracterización mineralógica de las lateritas del sector atlantis, mina Moa. *Minería y Geología*, 1-87.
- Peña Abreu, R. E., & Vera Sardiñas, L. O. (2013). Identificación de clases patrones para la modelación matemática en yacimientos de níquel cubanos. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*., 14(2), 154-169.
- Peña Abreu, R. E., Fernández Martínez, L., Rivas Salas, A. I., Castañeda Ferrer, Y., Cuenca Vilche, Y., Pérez Melo, N., & Espinosa Frómata, M. (2013). Metodología para la evaluación en retrospectiva de muestras tecnológicas. *Anuario de la Sociedad Cubana de Geología*.(1), 47-57.
- Pérez García, L. (2012). *Reporte Técnico del Plan de Adiestramiento*ˆ. *Tecnología de los Procesos*.,
- Proenza, J. (2015). Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos. *revista de la sociedad española* , 3-9.
- Quintana Puchol, R. (2018). ESTUDIO DE LA PULPA CRUDA DEL MINERAL LATERITICO DEL YACIMINETO MOA (I). ANALISIS GRANULOMETRICO. *MINERÍA Y GEOLOGÍA*, 3-84.

- Ramirez, K. R. (2022). *Evaluación tecnológica de una mezcla de mineral compuesta por mineral de Camarioca Norte-Zona Septentrional-Atlantic*.
- Reyes Gonzalez, Y. (2022). *‘‘Resultado de la prueba Tecnológica para la evaluación de los minerales de Zona Septentrional en el proceso’’*. Reporte Técnico, Empresa Cmdte. Pedro Sotto, Dpto. Tecnología de los Procesos.
- Reyes Gonzalez, Y. (2022). *Pasaporte Muestra Tecnológica Atlantic*.
- Rosabal Vega, J. M. (1998). *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*. ENPES. Vol. II.
- Stokes, G. G. (1851). *Wikipedia*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/ley de stokes](https://es.wikipedia.org/wiki/ley_de_stokes)
- Téllez, F. (2018). *Evaluación del mineral de rechazo en la Planta de Preparación de Pulpa*. ismm moa.
- Valdivia García, G., Arostegui, M., Alonso Pérez, J. A., Cabrera, I., Hernández, N., Herrera, V., . . .
- Martínez, A. (2014). Actualización del conocimiento mineralógico de menas lateríticas y residuos sólidos de las industrias niquelíferas cubanas. *INFOMIN*, VI(1), 70-100.
- VERA, O. (2001). *Procedimiento para la determinación de las redes racionales de explotación de los yacimientos de níquel y cobalto en la región Moa*.
- wikipedia*. (7 de 02 de 2022). Obtenido de [https://blog.structuralia.com/curva y análisis granulometrico](https://blog.structuralia.com/curva_y_analisis_granulometrico)

## ANEXOS



Anexo 1. Diagrama del flujo de la Planta de Preparación de Pulpa



Anexo 2. Balanza Técnica Digital



Anexo 3. Balanza Secadora Ohaus



Anexo 4. Tamiz de 20 mesh



Anexo 5. Agitadores de hélices con impelente mecánico IKA RW 47 D



Anexo 6. Sedimentación



Anexo 7. Mineral de Camarioca Norte A-16



Anexo 8. Mineral de Zona Septentrional



Anexo 9. Mineral de Atlantic



Anexo 10. Arena -20+100mesh de CN A-20



Anexo 11. Yacimiento Zona septentrional

Area	Vel. Sed	Fraccion granulometrica	% en peso	Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO2	Cr	Mn	Cu	Zn
CN-A16	127	+20	3,19										
		-20+100	7,785	0,682	0,327	14,42	6,3	4,41	12,92	3,42	3,01	0,011	0,034
		-100+200	8,29	0,548	0,232	12,16	6,74	3,48	15,09	3,26	2,21	0,01	0,036
	146	Total	80,735										
CN-A19	150	+20	3,19										
		-20+100	14,265	0,276	0,234	10,78	4,97	1,25	26,67	2,83	2,47	0,01	0,032
		-100+200	8,29	0,263	0,137	5,04	3,49	0,63	31,15	1,63	1,4	0,006	0,065
	174	Total	74,255										
CN-A20	162	+20	3,19										
		-20+100	11,36	0,531	0,671	9,58	0,42	14,96	2,41	3,11	6,31	0,018	0,091
		-100+200	8,29	0,94	0,439	26,21	0,63	8,01	3,35	2,41	3,97	0,017	0,055
	191	Total	77,16	0,799	0,039	37,03	2,886	2,467	10,91	0,746	0,024	0,012	0,049
MO-A7	240	+20	11,800										
		-20+100	2,877	0,294	0,246	6,290	6,450	4,350	13,370	4,650	1,250	0,008	0,0042
		-100+200	3,359	0,381	0,309	20,930	4,090	4,200	7,010	1,650	1,650	0,009	0,038
	253	Total	81,964	0,897	0,143	43,125	0,583	3,694	3,765	1,953	0,542	0,009	0,036
MO-A34	126	+20	6,56										
		-20+100	2,74	0,522	0,545	24,2	0,18	5,64	1,96	4,81	3,37	0,009	0,062
		-100+200	0,517	0,662	0,689	21,55	0,39	5,54	2,22	5,04	4,56	0,011	0,067
	185	Total	90,183										
Zona A A5	200	+20	39,24										
		-20+100	7,41	0,446	0,082	35,49	0,06	9,26	1,91	2,18	0,56	0,006	0,031
		-100+200	22,506	0,384	0,068	32,53	0,08	10,34	2,16	2,1	0,51	0,007	0,035
	214	Total	30,844										
Playa la Vaca LF	191	+20	1,59										
		-20+100	5,674	0,788	0,789	21,63	0,4	5,3	1,51	5,69	4,18	0,011	0,067
		-100+200	1,234	1,012	0,812	27,36	0,12	4,62	1,59	3,95	4,21	0,012	0,045
	230	Total	91,502	1,306	0,115	47,203	0,461	3,304	3,318	1,137	0,384	0,014	0,032
Playa la vaca LB	178	+20	6,47										
		-20+100	2,315	1,417	0,066	22,24	1,93	2,06	19,33	1,04	0,52	0,014	0,026
		-100+200	1,684	0,696	0,226	15,17	1,6	9,9	3,92	4,36	3,22	0,013	0,037
	225	Total	89,531	1,313	0,123	46,062	0,488	3,693	2,965	1,315	0,535	0,014	0,032
Atlantic	178	+20	9,4										
		-20+100	12,262	0,797	0,276	22,91	2,51	8,27	6,3	1,89	2,24	0,013	0,046
		-100+200	7,055	1,291	0,323	26,65	2,23	5,87	5,42	2,21	2,88	0,016	0,04
	196	Total	71,283	1,387	0,05	36,625	2,893	2,109	9,574	1,167	0,275	0,011	0,0341
Zona Sept	15	+20	3,44										
		-20+100	27,395	1,492	0,117	25,44	1,13	4,2	11,38	2,26	1,02	0,014	0,041
		-100+200	7,99	1,659	0,175	26,79	0,88	3,96	10,52	2,61	1,65	0,015	0,037
	23	Total	61,175	0,653	0,155	55,56	1,409	3,317	1,767	1,133	0,493	0,008	0,035
Ciba Fija	80	+20	4,94										
		-20+100	11,208	1,867	0,413	24,56	0,58	3,45	3,97	3,91	4,58	0,027	0,033
		-100+200	6,174	2,387	0,403	29,18	0,22	3,26	4,54	2,48	4,45	0,032	0,018
	146	Total	77,678	1,496	0,001	47,878	0,909	3,053	5,295	0,991	4,13	0,015	0,028
		Total	100	1,593	0,072	44,11	0,83	3,11	5,1	1,41	0,42	0,017	0,028

## Anexo 12 Resumen general de los principales resultados

