

# EVALUACIÓN DEL PROCESO DE REDUCCIÓN DE MENA LATERÍTICA CON ALTA COMPLEJIDAD MINERALÓGICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE  
INGENIERO EN METALURGIA Y  
MATERIALES

**AUTOR(S):** José Carlos Marrón Mena

Moa, 2022  
Aniversario 64 de la Revolución



# EVALUACIÓN DEL PROCESO DE REDUCCIÓN DE MENA LATERÍTICA CON ALTA COMPLEJIDAD MINERALÓGICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE  
INGENIERO EN METALURGIA Y  
MATERIALES

**AUTOR(S):** José Carlos Marrón Mena      Firma \_\_\_\_\_

**TUTOR(S):** MSc. Hugo Javier Angulo Palma      Firma \_\_\_\_\_

Ing. Ángel Legrá Legrá      Firma \_\_\_\_\_

DrC. Pedro Enrique Beyris Mazar      Firma \_\_\_\_\_

Moa, 2022

Aniversario 64 de la Revolución



# PENSAMIENTO

## PENSAMIENTO

*"Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo dondequiera que vayas."*

**Josué 1:9**



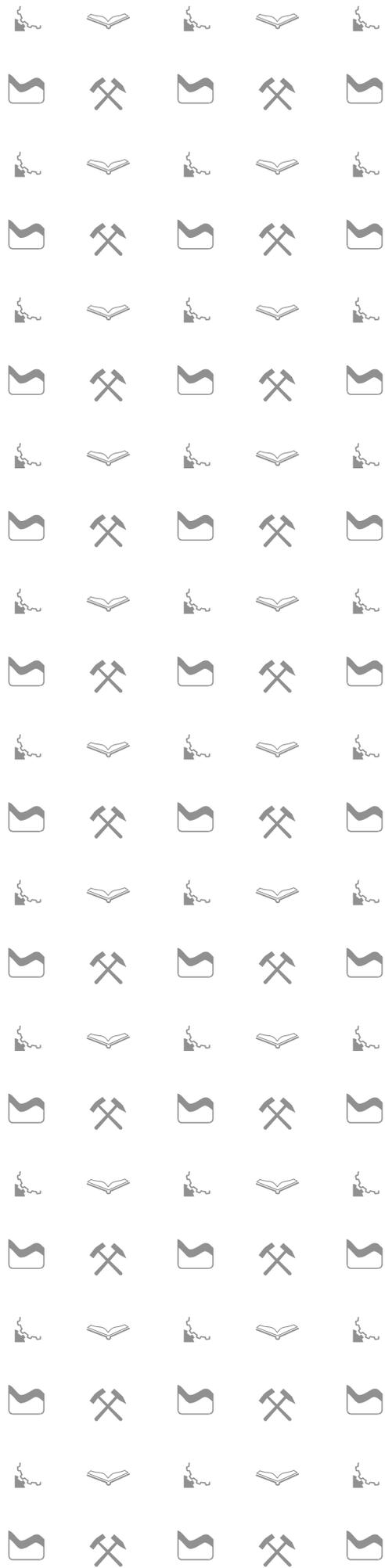
# DEDICATORIA

## DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado de manera general a toda mi familia, amigos y personas que contribuyeron en mi formación como persona y profesional, pero en especial a:

- Mis padres José Ángel Marrón Rivero y Miladis Mena Romero por tanto sacrificio, apoyo y motivación para poder estudiar y culminar esta larga carrera universitaria.
- Mi esposa Magbys González Roblejo por tanto amor, dedicación y ser realmente mi ayuda idónea para enfrentar los problemas que la vida nos da.
- Mis dos preciosos niños Matheo Marrón González y José Daniel Marrón González por ser la fuente de inspiración para lograr este sueño y poder darles así un mejor futuro.
- Mi hermano Addiel Marrón Mena por cada experiencia vivida y hoy juntos poder celebrar este gran éxito.
- Mis abuelos paternos y maternos por dejar en mí un gran legado de humanismo y ser la raíz de mi generación.
- Mis suegros por adoptarme como un hijo desde el principio y hacer suya esta gratificante experiencia.
- Todos mis compañeros de aula, especialmente a René Jimenez Legrá por tantas noches de estudio juntos y ayudarme en esta última etapa en la que los retos no dejaron de ser.

A cada uno de ustedes: ¡Muchísimas gracias!



# AGRADECIMIENTOS

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente por la realización de este importante trabajo a:

- Dios sobre todas las cosas porque nunca dejó de guiarme y bendecirme en toda mi vida, especialmente en el último mes de preparación de tesis, donde las adversidades quisieron imponerse en el camino más ÉL obró de una manera inexplicable poniendo en mi camino a las mejores e indicadas personas.
- Mi tutor MSc. Hugo Javier Angulo Palma y su hermosa familia por tenerme tanta paciencia, por ayudarme a salir adelante con la mejor actitud y por la gran preparación que me dio.
- Mi tutor DrC. Pedro Beyris Mazar por darme el privilegio de trabajar con él y compartirme sus exquisitos conocimientos tanto metalúrgicos como de otras materias. También agradezco a su esposa por impulsar mi esperanza en que más temprano que tarde culminaría la tesis de la mejor manera.
- Todos los profesores del Departamento de Metalurgia y Química.
- Los que impidieron y ayudaron a mi crecimiento profesional ya que esas experiencias hicieron de mí un mejor ingeniero.
- Mis compañeros de trabajo por tanta preocupación, apoyo y colaboración.



# RESUMEN

## RESUMEN

En esta investigación se evaluó el impacto que genera la alimentación de menas lateríticas con alta complejidad mineralógica en los extractables de níquel y cobalto que se logran durante la tostación/reducción selectiva del proceso Caron, mediante el uso de las instalaciones y procedimientos establecidos en la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel. En ella se demostró que la mena laterítica que se alimenta al proceso metalúrgico se caracterizó un complejo comportamiento mineralógico con predominio de las fases de los óxidos y oxi-hidróxidos de minerales de hierro, siendo descritas granulométricamente por los modelos Rosin–Rammler y la función Swabrec con errores residuales inferiores a 1,95 y coeficientes de determinación superiores a 0,9850. La evaluación del proceso de tostación/reducción demostró que las características químico-físicas-mineralógicas del mineral reducido se correspondieron a un proceso adecuado de reducción con valores de Ni, Co, Fe, S y C total que presentaron como regularidad el incremento de sus porcentajes en los rangos promedios de 0,22%, 0,01%, 7,46%, 0,45% y 0,45% respectivamente; con predominio de las fases mineralógicas de la magnetita, la maghemita y la fayalita. Los máximos extractables de níquel y cobalto que se lograron durante el proceso de reducción-lixiviación oscilaron en los rangos de 73-78% y 33-41% respectivamente, resultando más conveniente el uso del perfil térmico alto ya que permite el incremento de las utilidades en 81,73 millones de USD/a.

**Palabras Clave:** Mena laterítica, tostación/reducción selectiva, proceso Caron.

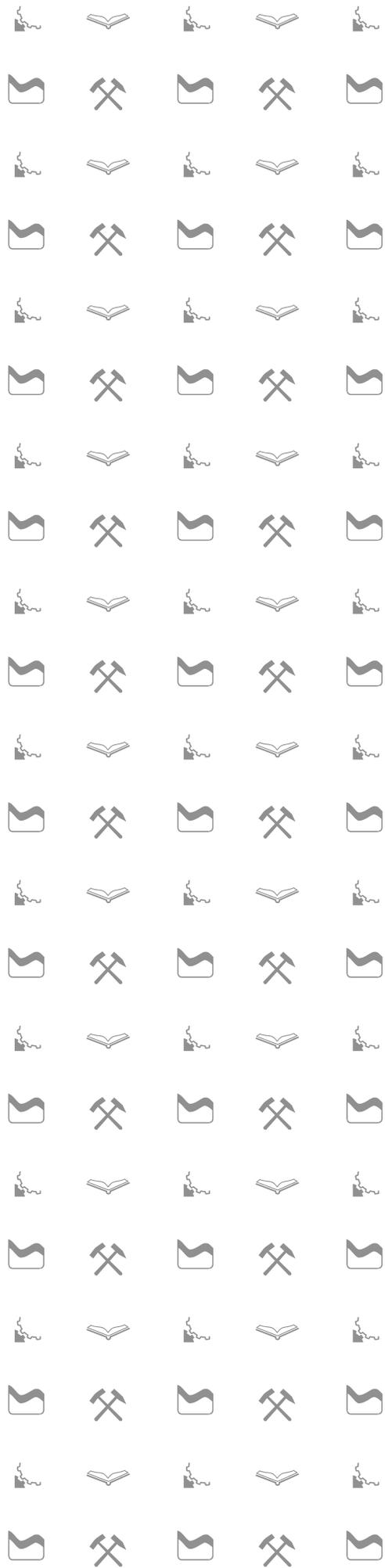


# ABSTRACT

**ABSTRACT**

In this research, the impact generated by the feeding of lateritic ores with high mineralogical complexity in the nickel and cobalt extractions that are achieved during the selective roasting/reduction of the Caron process, through the use of the facilities and procedures established in the pilot plant of the "Centro de Investigaciones del Niquel". It was shown that the lateritic ore fed to the metallurgical process had a complex mineralogical behavior with a predominance of the oxide and oxy-hydroxide phases of iron minerals, being described granulometrically by the Rosin–Rammler models and the Swebrec function with residual errors less than 1.95 and coefficients of determination greater than 0,9850. The evaluation of the roasting/reduction process showed that the chemical-physical-mineralogical characteristics of the reduced ore corresponded to an adequate reduction process with values of Ni, Co, Fe, S and total C that regularly increased their percentages in the average ranges of 0,22%, 0,01%, 7,46%, 0,45% and 0,45% respectively; with predominance of the mineralogical phases of magnetite, maghemite and fayalite. The maximum extractions of nickel and cobalt that were achieved during the reduction-leaching process ranged from 73-78% and 33-41% respectively, being more convenient to use the high thermal profile since it allows the increase of profits at 81,73 million USD/a.

**Keywords:** Lateritic ore, selective roasting/reduction, Caron process



# ÍNDICE

---

**ÍNDICE**

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
1.1 Menas lateríticas. Características químico-físicas-mineralógicas .....	4
1.2 Generalidades del proceso Caron .....	7
1.3 Regularidades del proceso de reducción en la tecnología carbonato amoniacal ..	8
1.5 Antecedentes de la investigación .....	13
1.6 Conclusiones parciales del Capítulo I .....	16
<b>CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
2.1 Descripción del flujo tecnológico de la Planta Piloto .....	18
2.1 Equipos y utensilios que se utilizaron .....	20
2.2 Materiales y soluciones.....	25
2.3 Técnicas Analíticas .....	26
2.4 Metodologías .....	28
2.5 Condiciones y parámetros de operación en el horno piloto .....	30
2.6 Datos que se consideraron para la valoración económica.....	31
2.7 Conclusiones parciales del Capítulo II .....	32
<b>CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>

---

3.1 Caracterización químico-físico-mineralógica de la mena laterítica bajo análisis..	33
3.2 Caracterización químico-físico-mineralógica del mineral reducido .....	38
3.3 Caracterización química del mineral reducido/lixiviado.....	41
3.4 Influencia del perfil térmico en las extracciones de níquel y cobalto.....	43
3.5 Valoración económica.....	45
3.6 Conclusiones parciales del Capítulo III .....	46
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>47</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>48</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>49</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>61</b>



# INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

El níquel (Ni) y el cobalto (Co) se consideran materias primas estratégicas y críticas. El Ni se utiliza en la producción de baterías como níquel-cadmio o níquel-hidruro metálico, pero su uso en baterías de iones de litio provocó un creciente interés en este metal ya que es capaz de entregar una mayor densidad de energía y más capacidad de almacenamiento para estas baterías. El Ni se ha convertido en el más importante para los cátodos de las baterías de iones de litio, lo que permite reducir el uso de Co, que es escaso y más caro. Sin embargo, el Co sigue siendo esencial para la fabricación de baterías de iones de litio y sus compuestos para electrodos de supercapacitores debido a la alta capacitancia específica y alta densidad de energía, así como a una mejor estabilidad cíclica del óxido de Co. Con el estallido de la producción de vehículos eléctricos, se pronostica que la demanda mundial de estos metales en baterías de vehículos eléctricos de 2018 a 2025 aumentará 10 veces. (Mitterecker et al., 2022)

Las principales reservas de estos metales se encuentran en las menas lateríticas y en las sulfurosas; donde la primera contiene el 72,2% de las reservas del Ni del mundo, con un incremento de la producción anual desde el 2004 hasta la actualidad de 42 a 69%. (Zevgolis & Daskalakis, 2022)

Una de las principales tecnologías que es capaz de extraer el Ni y el Co a partir de las menas lateríticas es el proceso Caron, comúnmente denominado tecnología carbonato-amoniaco. (Pintowantoro et al., 2021)

Específicamente en Cuba la entidad que utiliza el proceso Caron para extraer el Ni y el Co de las menas lateríticas es la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), identificada en la literatura especializada como la Planta de Punta Gorda. (Rojas et al., 2019).

Entre los procesos básicos que componen la cadena productiva de la ECG se encuentra la reducción química, ya que tiene incidencias significativas en sus índices técnicos económicos pues resulta determinante en los valores que se logran de eficiencia metalúrgica y consumo energético, siendo el petróleo tecnológico que se utiliza en los Hornos de Reducción un elemento determinante en este aspecto. (Angulo, 2018)

Actualmente la parte limonítica de los minerales lateríticos cubanos presenta un elevado grado de agotamiento. Este agotamiento ha sido provocado por la explotación minera irracional de estos recursos minerales durante más de 30 años, provocando problemas como el aumento de la distancia de transportación, la disminución del contenido de mineral útil, aumento del contenido de minerales nocivos para los procesos metalúrgicos, mayor variabilidad mineralógica de los yacimientos e incremento continuo del costo de minería. (Sariol, 2011)

La incorporación de menas lateríticas con una alta variabilidad mineralógica en la tecnología carbonato-amoniaca genera incertidumbre en las extracciones que se logran en el proceso de tostación/reducción selectiva, debido a que no se han realizado estudios hasta la fecha que relacionen su efecto. Teniendo en cuenta lo antes planteado se propone la ejecución de la siguiente investigación que presenta como **problema investigativo**: Insuficiente conocimiento del efecto que genera la alimentación de menas lateríticas con alta complejidad mineralógica en las extracciones de níquel y cobalto que se logran durante el proceso de tostación/reducción selectiva de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

**Objeto de Estudio:** Eficiencia en la tecnología carbonato-amoniaca.

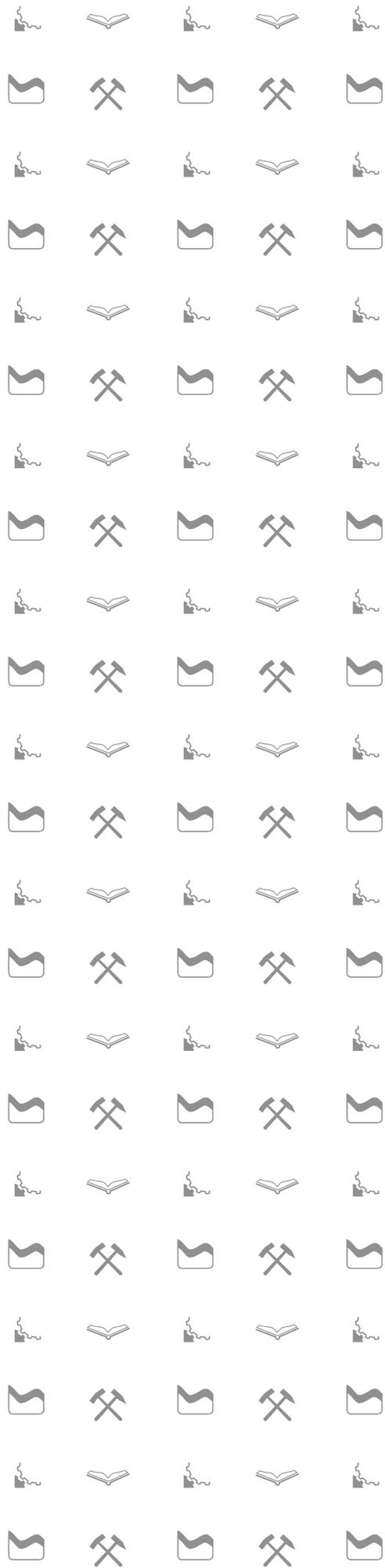
**Campo de Acción:** Proceso de tostación/reducción selectiva de la tecnología carbonato-amoniaca.

**Hipótesis:** Si se logra establecer la relación entre la alimentación de menas lateríticas con alta complejidad mineralógica y los extractables de níquel y cobalto, se logrará determinar el efecto en la eficiencia del proceso de tostación/reducción selectiva de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

**Objetivo General:** Evaluar el impacto que genera la alimentación de menas lateríticas con alta complejidad mineralógica en los extractables de níquel y cobalto que se logran durante el proceso de tostación/reducción selectiva de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

**Objetivos Específicos:**

1. Caracterizar químico-físico-mineralógicamente la mena laterítica con alta complejidad mineralógica antes y después del proceso de tostación/reducción selectiva de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".
2. Evaluar el efecto que genera la alimentación de la mena laterítica con alta complejidad mineralógica en los procesos de reducción-lixiviación de la tecnología carbonato-amoniaco.
3. Valorar desde el punto de vista económico el impacto que tiene la influencia del perfil térmico en las extracciones de níquel y cobalto durante el procesamiento de una mena laterítica con alta complejidad mineralógica en las condiciones actuales de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".



# CAPÍTULO I

## MARCO

## TEÓRICO

## CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los principales aspectos que se relacionan directamente con el comportamiento químico-físico-mineralógico de las menas lateríticas y del proceso Caron, a partir del énfasis de las particularidades del proceso de tostación/reducción selectiva y las principales variables que influyen en el mismo.

### 1.1 Menas lateríticas. Características químico-físicas-mineralógicas

Las lateritas de níquel son producto principalmente a la meteorización química de rocas máficas/ultramáficas asociadas con zonas activas de colisión de placas del Cretácico al Terciario Tardío o en ambientes estables desarrollados en rocas ultramáficas del Arcaico al Proterozoico. Su formación está controlada por muchos factores entre los que resaltan: la presencia de un protolito ultramáfico expuesto, climas tropicales y subtropicales suficientes para desarrollar un regolito profundo en las rocas protolíticas expuestas, la estructura del protolito, los sistemas de drenaje, el movimiento del agua subterránea y el grado de serpentización; siendo estos procesos de meteorización los que convierten a estos recursos económicamente valiosos por las concentraciones relativamente altas de Ni-Co que generalmente presentan. Pueden clasificarse como depósitos de silicatos hidratados, depósitos de silicatos de arcilla y depósitos de óxido en la base de la mineralogía del mineral. Los principales países con reservas de este tipo de menas son Nueva Caledonia, Cuba, Filipinas, Indonesia, Colombia, Australia, República Dominicana y Omán. (Al-Khribash, 2020; Fu et al., 2018; Gleeson et al., 2003; Ito et al., 2021; Putzolu, et al., 2018; Tupaz, et al., 2020)

De acuerdo a sus contenidos de hierro y magnesio las menas lateríticas se clasifican en limonitas y saprolitas. La capa más superficial y la base del depósito contienen los más bajos contenidos de níquel, valores inferiores a 0,8%, por lo que constituyen las zonas con menor potencial para la extracción del Ni y el Co. (Díaz Bello, 2016)

Las lateritas se caracterizan por presentar un complejo comportamiento químico-físico-mineralógico. Específicamente en Cuba las principales fases mineralógicas

---

identificadas son la goethita, la hematita, la gibbsita, la maghemita, la magnetita, la lizardita, el cuarzo, la espinela, la forsterita y la caolinita junto con esmectitas y las cloritas (Angulo et al., 2022; Domènech et al., 2017; Toirac & Rojas, 2021).

Se reconoce que estas complejas menas se dividen en cinco zonas del perfil: zona de ferricreta, zona de limonita, zona intermedia de transición, zona de serpentina y la zona de roca básica (Shoubao et al., 1999).

- Zona de Ferricreta: Esta zona se encuentra en la parte superior del depósito de laterita y se caracteriza por presentar una alta concentración de hierro. Ha sufrido la mayor cantidad de desgaste y gran parte del níquel de la roca madre original se ha lixiviado. Las menas principales en esta zona son la goethita y la hematita, que ha sido recristalizada como resultado de ataques repetidos por agencias naturales. Dado que el valor del mineral no es muy alto, esta zona generalmente se descarta durante la extracción.
- Zona de Limonita: Esta zona se encuentra debajo de la zona de protección de hierro y también ha sido sometida a una extensa intemperie. Esta zona tiene característicamente un tamaño de grano fino, bajo contenido de níquel y una composición química y mineralógica uniforme. La fase mineral primaria que contiene la mayor parte del níquel es goethita. Esta zona representa la parte superior de un mineral de laterita.
- Zona Intermedia de Transición: La zona cae entre las zonas de las menas de limonita y saprolita. La existencia de esta zona se debe a la dificultad de separar las zonas de limonita y saprolita durante la extracción.
- Zona de Serpentina: Esta zona se encuentra en la parte inferior del depósito de laterita y justo encima de la roca de la plataforma, representa una etapa de meteorización intencional. Las fases minerales ricas en níquel, como la serpentinita se encuentran en esta zona. Ambas composiciones químicas y mineralógicas en esta zona son extremadamente heterogéneas.

- Roca Básica: Esta es la roca original antes del inicio del proceso de laterización. Los minerales principales en la roca madre son serpentina y olivino. Los minerales menores son ortopiroxeno y clinopiroxeno.

Coello et al. (2019) demostraron que los modelos granulométricos más efectivos para caracterizar las menas lateríticas cubanas antes y después del proceso de molienda son los de Rosin–Rammler (RR), Gates–Gaudin–Schuhmann (GGS) y la función Swebrec (SWEF), descritos por las expresiones matemáticas 1.1, 1.2 y 1.3 respectivamente.

$$P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^n}\right) \dots (1.1)$$

$$P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{x}{k}\right)^m \dots (1.2)$$

$$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[ \frac{\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)} \right]^b} \right\} \dots (1.3)$$

donde:

$P_{(x)}$ : pasante acumulativo para un tamaño  $x$ , %.

$x$ : Tamaño de la partícula, mm o  $\mu\text{m}$ .

$a$ : Módulo de tamaño de RR para el cual el  $P(x)$  es igual a 63,2%

$n$  y  $m$ : Módulo de distribución de RR y G-G-S respectivamente.

$k$ : Módulo de tamaño de GGS para el cual  $P_{(x)}$  es igual a 100%.

$X_{max}$ : Tamaño de partícula límite para el cual  $P_{(x)}$  es igual al 100%.

$X_{50}$ : Tamaño de partícula media para el cual  $P_{(x)}$  es igual al 50%.

$b$ : Parámetro de ondulación de la función Swebrec.

Por su complejo comportamiento químico-físico-mineralógico, Oxley & Barcza (2013) reconocen que los métodos más adecuados para el tratamiento de este tipo de menas

son los piro-hidrometalúrgicos, siendo el proceso Caron uno de los más importantes, ver figura 1.1.

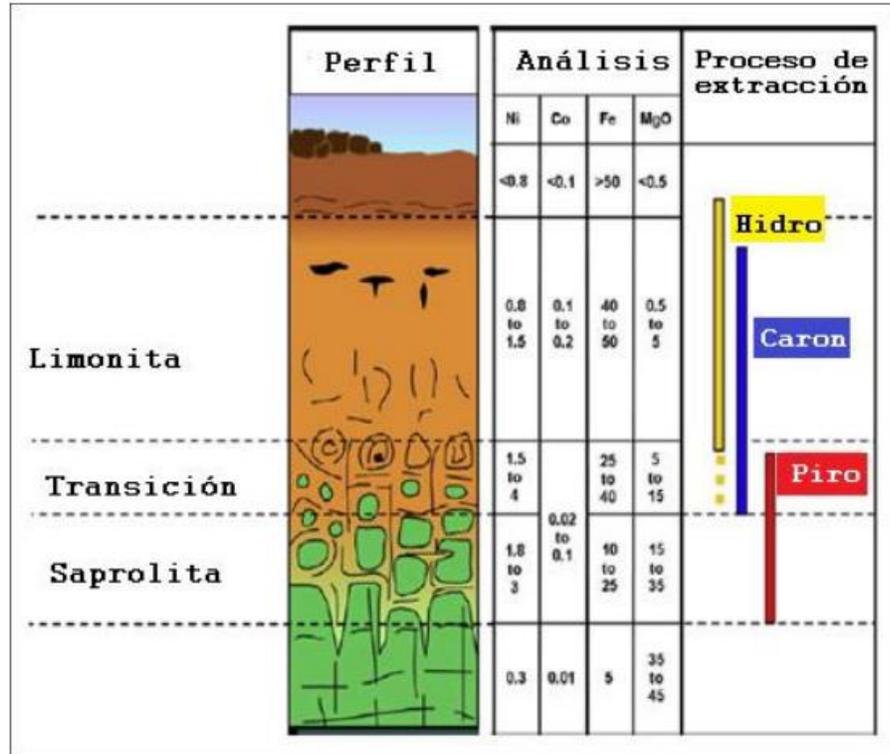


Figura 1.1. Perfil laterítico de níquel con sus opciones de procesamiento (Díaz, 2016)

## 1.2 Generalidades del proceso Caron

En 1924 la Oficina de Patentes de los Estados Unidos publica a Martinus Hendricus Caron una nueva invención que consistía en la recuperación de Ni y Co a partir de minerales lateríticos en forma de óxidos y silicatos hidratados. La nueva tecnología propuesta por Caron se basaba en lixiviar las menas lateríticas, previamente reducidas y enfriadas sin la presencia de oxígeno, con una solución carbonato-amoniaco con el objetivo de extraer el contenido de los metales de interés, aprovechando la gran selectividad que mostraba el licor amoniaco. (Hendricus Caron, 1924; 1950)

La primera planta industrial que utilizó la tecnología carbonato-amoniaco en la lixiviación de minerales lateríticos fue puesta en operación en Nicaro-Cuba en el año 1943 (Miranda, 2014).

Posteriormente a la planta de Nicaro surgieron cronológicamente las industrias de SERED: antigua Checoslovaquia en 1962, Marinduque en Filipinas conocida como NONOC en 1974, GREENVALE-Australia en 1974, TOCANTINS-Brasil en 1980 y Punta Gorda en Moa-Cuba en 1987 (Chang, 2004). Actualmente solo se encuentran en operación las tres últimas.

Se recomienda utilizar el proceso Caron cuando los contenidos de Ni, Fe y MgO, en la mena laterítica, superan los porcentajes de 0,9; 35,0 y 2,0% respectivamente (Angulo et al., 2022; Díaz, 2016).

Las principales secciones del proceso que presentan mayor incidencia en su eficiencia metalúrgica son: Preparación del Mineral, Hornos de Reducción y Lixiviación y Lavado. El área de Preparación del Mineral se basa en la transformación física de la mena laterítica, que consiste en eliminar parte de la humedad que posee (desde un porcentaje de humedad de 40 hasta menor de 5% aproximadamente) y de reducirle su tamaño hasta que presente una fineza  $-0,074$  mm para un porcentaje del 84 al 88%; dejándolo en las condiciones ideales para ser introducido en una atmósfera reductora. Los Hornos de Reducción se encargan de transformar químicamente la mena laterítica, previamente secado y molida, al eliminar parte de su contenido de oxígeno (O) al ponerlo en contacto con una atmósfera rica en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). La tercer sección se caracteriza por lixiviar al mineral reducido mediante el uso de una solución de carbonato amoniacal y un flujo de aire que permiten que la mayor cantidad del contenido de hierro (Fe) presente en el mineral precipite y que la mayor cantidad del contenido de Ni y Co pase a estado de solución en el licor; obteniéndose colas empobrecidas de Ni y Co, y licores con un despreciable contenido de Fe. (Angulo, 2018).

### **1.3 Regularidades del proceso de reducción en la tecnología carbonato amoniacal**

Coello (2015) reconoce que los Hornos de Reducción se caracterizan por consumir el 14% de toda la energía demandada por la tecnología carbonato-amoniacal (figura 1.2),

---

razón que justifica que sea una de las áreas más analizadas con el fin de lograr disminuciones energéticas.

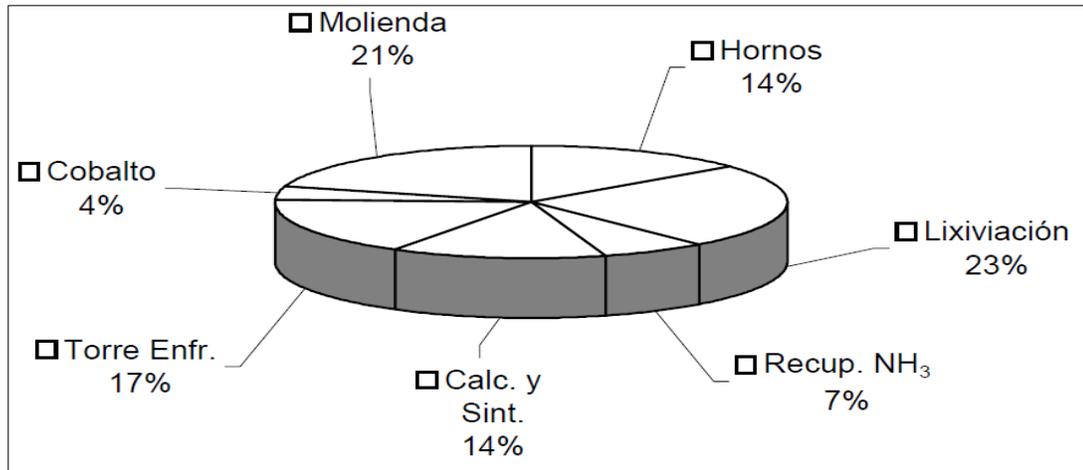


Figura 1.2. Consumo de la energía en el proceso Caron cubano.

La reducción del mineral mediante el uso de agentes reductores procedentes del *fuel-oil* es un fenómeno físico-químico heterogéneo, debido a que la materia que lo compone se encuentra en diferentes estados de agregación. Este proceso se realiza en hornos del tipo Herreshoff que están compuestos por un cilindro metálico en posición vertical y se encuentra revestido interiormente con ladrillos de chamota o alta alúmina, con protección exterior por una carcasa metálica, instalaciones para la agitación, alimentación y descarga del mineral y cámaras de combustión. Están formados interiormente por 17 hogares o soleras que tienen forma de bóvedas esféricas. El horno dispone de un eje central rotatorio al cual se le articulan 68 brazos, cuatro por cada hogar. Cada brazo posee, en dependencia del hogar, de ocho a 12 paletas o dientes inclinados que, en dependencia de la zona del horno, serán de retención o de barrido para permitir la descarga de un hogar a otro en forma de zigzag. En los hogares pares la descarga se realiza a través de 30 orificios localizados equidistantes en la periferia, mientras que en los hogares impares por un orificio localizado en el centro alrededor del eje central. Al horno se le acoplan cámaras de combustión que están equipadas con quemadores de petróleo. En la tabla 1.1 se presentan algunas especificaciones del horno industrial. (Montero, 2016)

Las principales variables que cuantifican la eficiencia de los hornos de reducción son el porcentaje de extractables de Ni y Co. El sentido físico de estas variables es determinar la cantidad de cada uno de esos elementos, que logra pasar a estado de solución tomando como base la cantidad que entró en la mena que se alimenta al horno. La manera en que suele determinarse es según la ecuación 1.4. (Angulo, 2018)

Tabla 1.1. Especificaciones del horno de reducción a escala industrial

Especificaciones	Unidad de Medida	Valores
Volumen	m <sup>3</sup>	387
Productividad	t/h	18
Diámetro interior	m	6,048
Diámetro exterior	m	6,780
Espesor del revestimiento	m	0,342
Espesor del revestimiento del eje	m	0,075
Altura total el horno	m	23,5
Altura de la parte cilíndrica	m	18,89
Velocidad de rotación del eje central	rad/s	0,023
Temperatura de los gases a la salida	°C	-400

$$\% Met_{ext} = \left[ 1 - \left( \left( \frac{Met_{min\ lix}}{Met_{alim}} \right) * \left( \frac{Fe_{alim}}{Fe_{min\ lix}} \right) \right) \right] * 100 \dots (1.4)$$

donde:

$\% Met_{ext}$  es el % de extractable del metal bajo análisis (Ni o Co).

$Met_{min\ lix}$  es el % del contenido del metal bajo análisis (Ni o Co) en el mineral luego del proceso de lixiviación

$Met_{alim}$  es el % del contenido del elemento analizado (Ni o Co) en el mineral que se alimenta a los hornos de reducción.

$Fe_{alim}$  es el % del contenido de hierro presente el mineral que se alimenta a los hornos de reducción.

$Fe_{min\ lix}$  es el % del contenido de hierro presente en el mineral luego del proceso de lixiviación.

Diferentes investigaciones reconocen que las características de la mena laterítica, el perfil de temperatura, las operaciones del horno y la concentración de la atmósfera

reductora constituyen las variables más importantes a controlar durante el proceso de tostación-reducción selectiva del proceso Caron (De Graaf, 1979; Pickles et al., 2014; Pickles & Elliott, 2015; Pickles & Anthony, 2018a; 2018b; Angulo et al., 2022)

La composición química de la materia prima influye directamente en los resultados de extracciones del horno ya que en dependencia de esta se fijan las temperaturas y el régimen de calentamiento de la mezcla de minerales. Cuando la mezcla de minerales es serpentinitico el régimen de temperatura cercano a los 800 °C; mientras que para los minerales limoníticos las condiciones de reducción pueden ser menos severas ya que se reducen a temperaturas en el intervalo de 550-650 °C. (De Graaf, 1979; Pickles & Anthony, 2018a; 2018b)

La granulometría del mineral influye directamente en la eficiencia del proceso de reducción. Las reacciones ocurren fundamentalmente en la interfase sólido gas y la velocidad de la reacción está determinada por la penetración del gas al interior de los poros de la partícula, por lo que si estas son pequeñas aumentara la superficie activa del mineral, será mayor el contacto entre las fases y se incrementará la conversión de la reacción. (Mestre, 2010) En la práctica se trabaja con un 84 a 88% de fracción menor de 0,074 mm (Coello et al. 2019).

El número de hogares presentes en el equipo ha sido un factor de importancia en el desarrollo de los hornos modernos. Se reconoce que el número de caídas de un hogar a otro influye directamente en los resultados de la reducción debido a que en ese instante ocurre mayor contacto entre las fases. (Guillén, 2007)

La inestabilidad en la alimentación al horno afecta seriamente el perfil de temperaturas y la operación del mismo. Todas las condiciones son fijadas para el tonelaje a procesar, por lo que si en este tiempo al horno se les suministra un flujo superior o inferior, las temperaturas comenzarán a bajar o a subir respectivamente, y ambas situaciones son inconvenientes para el proceso. (Fernández, 2008)

Rodríguez (2008) evaluó el efecto de la homogenización del mineral en las extracciones de Ni y Co del proceso de reducción. Concluyó que al aumentar la homogenización general del mineral en 28,9 grados se produce un incremento de 4,36 y 1,88% en las extracciones de Ni y Co respectivamente.

Meriño (2010) analizó la influencia de la disponibilidad de las cámaras del horno Herreshoff en función de los extractables de Ni y Co. Pudo demostrar que los hornos necesitan una disponibilidad de cámaras por encima de 85% para obtener buenos resultados en las extracciones.

Angulo et al. (2017) demostraron que el horno de soleras múltiples convencional presenta un comportamiento de acuerdo al modelo de flujo no ideal, con un tiempo de residencia en el rango de 70 a 80 minutos; ver figura 1.3. La determinación de los extractables de níquel en los hogares pares del horno permitió mostrar sus tres zonas fundamentales: zona de calentamiento, reducción parcial y total; ver figura 1.4.

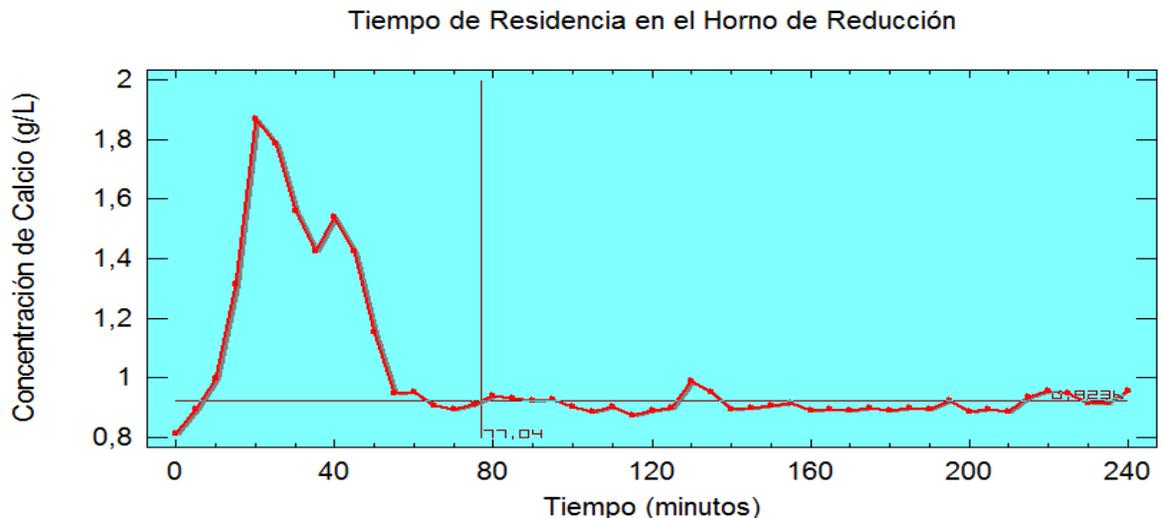


Figura 1.3 Determinación del tiempo de residencia en el horno piloto.

El aire de postcombustión que se introduce en la parte superior del horno Herreshoff se ha utilizado históricamente para controlar la composición de los gases residuales, preservar la integridad mecánica del horno y disminuir el consumo de energía. Angulo et al. (2022) demostraron el efecto negativo que genera el proceso de postcombustión

en el hogar seis del horno de reducción en las extracciones del Ni; ya que en el rango de 492 a 850 provoca una disminución de 1,3% de las extracciones del Ni por cada 71 °C que se incremente.

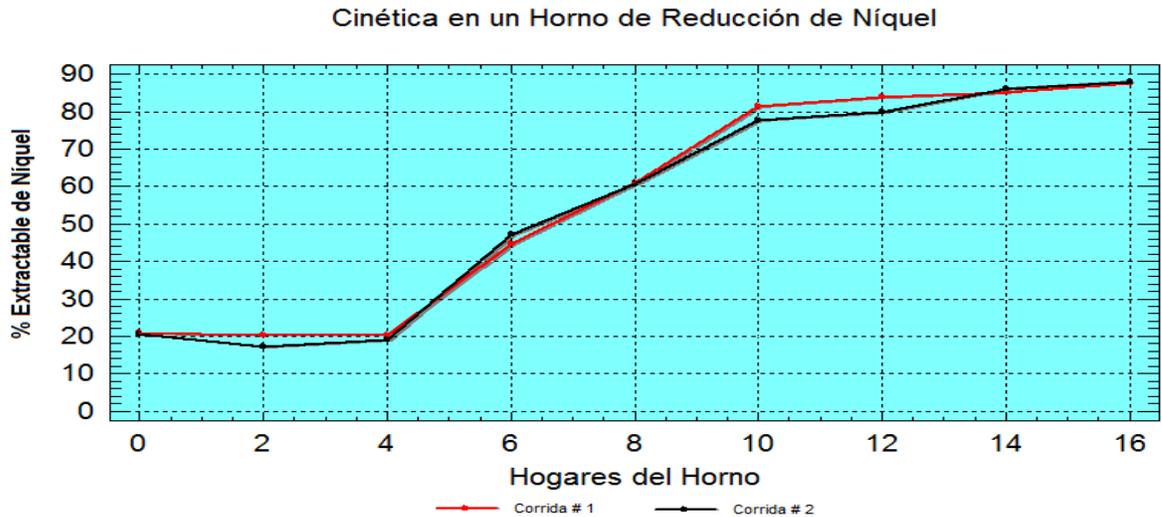


Figura 1.4 Comportamiento del extractable del níquel en el horno piloto.

Para economizar el proceso de reducción y mejorar la calidad de su atmósfera reductora se han evaluado diferentes aditivos reductores entre lo que resaltan:  $\text{FeS}_2$  (Caron, 1950),  $\text{NaCl}$  (Caron, 1950; De Alvarenga, 2019),  $\text{CaCl}_2$  (Caron, 1950), S (Ilyas et al., 2020; Valix & Cheung, 2002),  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Ilyas et al., 2020) y carbón (Angulo et al., 2021; Angulo, 2020a; 2020b; Angulo et al., 2018; Title, 2018); aunque hasta la fecha no ha sido posible reemplazar en escalas comerciales el 2,5% de fuel oil (Angulo et al. 2022; Canterford, 1983) que se emplea en la industria.

### 1.5 Antecedentes de la investigación

Caron (1950) descubrió que para menas de laterita del tipo de saprolitas y arcillas a 900 °C, la reducción de la mezcla de gases que contiene 90% de  $\text{H}_2\text{O}$  y 10% de  $\text{H}_2$  o 75% de  $\text{CO}_2$  más 25% de  $\text{CO}$  dará como resultado la alta extracción deseada de níquel.

De Graaf (1979) encontró que para diferentes tipos de menas, cuando se reducen con diferentes reductores gaseosos, hay una temperatura óptima que garantiza la

reducción en los rangos de potencial. En el estudio reporta que las extracciones de las menas limonitas pueden alcanzar el 95% de extracción, mientras que las menas saprolíticas solo alcanzan el 65%.

Chander & Sharma (1981) realizaron una investigación en la que demostraron que los resultados de la lixiviación, aunque permite extraer el níquel del mineral reducido a 600°C, es más sensible a la oxidación superficial que afecta negativamente a la extracción. Recomendaron en el estudio elegir una temperatura de aproximadamente 700°C en la que se reduzca la mayor parte del níquel, garantizando una baja o parcial reducción del hierro; ya que a altas temperaturas de reducción (>800 °C) la reducción del hierro es excesiva lo que provoca que la velocidad de extracción de níquel sea lenta, debido que el níquel queda atrapado en las fases de hierro.

Utigard & Bergman (1993) estudiaron la reducción de menas limoníticas y saprolíticas. Pudieron demostrar que la mena con la mayor concentración de Ni y Fe es la que se metaliza más fácilmente.

Reddy et al. (1995) demuestra que para lograr más del 90% de extracción de níquel, aproximadamente el 50% del hierro debe reducirse a la fase de wustita.

Aldana (1996) evaluó el proceso de reducción a escala piloto para una muestra tecnológica del yacimiento Yagrumaje Sur (YS). Las extracciones en el horno con el régimen bajo (735 °C en H-15) fueron de más de 85% y 62% para el Ni y el Co respectivamente.

Aldana (1997) realizó una prueba metalúrgica a escala piloto para evaluar el grado de reducción del mineral del Yacimiento de Cupey. Los extractables de Ni y Co oscilaron en los rangos de 82,30 a 86,90% y 55,80 a 64,60% respectivamente.

Aldana et al. (2003) determinaron el efecto que tiene el beneficio granulométrico de las fracciones superiores a 150 mm antes del proceso de secado. El estudio demostró que no es conveniente alimentar estas fracciones al proceso, ya que presentan bajos porcentajes de Ni y Fe y altos valores de los elementos nocivos.

---

Chang et al. (2006) realizaron una investigación que tuvo el propósito de determinar los modelos que con mayor efectividad pueden predecir el extractable de Ni al variar la composición química-mineral de la mena tecnológica que se alimenta a los Hornos Herreshoff. Como resultado se obtuvieron varios modelos multi-variables con efectividades de pronóstico del extractable de Ni superiores que 95 % en la Planta de Punta Gorda.

Legrá (2007) determinó las extracciones de Ni y Co en el proceso de reducción a escala piloto para la muestra remanente del yacimiento Punta Gorda (PG). El régimen óptimo fue el alto (770 °C en H-15), con el que se obtuvo extractables de Ni y Co de alrededor de 76 y 41% respectivamente.

Legrá (2008) determinó las extracciones de Ni y Co en el proceso de reducción a escala piloto para una muestra tecnológica del yacimiento Yagrumaje Oeste (YO). El régimen que se seleccionó como óptimo fue el bajo, con el que se obtuvo extractables promedios de Ni y Co de 84,6 y 41,9% respectivamente.

Pérez (2009) evaluó el proceso de reducción a escala de banco de tres muestras concernientes a los yacimientos Yagrumaje Norte (YN), Oeste (YO) y Sur (YS). La muestra de YN se caracterizó por presentar predominios de saprolitas con alto contenido de Ni y la de YO por el predominio de minerales limoníticos con altos porcentajes de Fe, mientras que la muestra de YS simuló el porcentaje de SiO<sub>2</sub> que alimentó la ECG en ese período. Los mejores resultados se lograron con 755 °C y 3% de petróleo aditivo al obtener extracciones de Ni y Co de 83-87% y 43-57% respectivamente.

Rhamdhani et al. (2009) y Cabrera et al. (2011) identificaron en el mineral reducido y lixiviado-lavado del proceso Caron respectivamente, el predominio de las fases mineralógicas magnetita, fayalita y maghemita.

Legrá & Rodríguez (2012) procesaron una muestra tecnológica a escala piloto, conformada con los minerales de los yacimientos YN y YS mezclados en las

proporciones que exigió la ECG para el 2012. Seleccionaron como régimen térmico óptimo el bajo al obtener extractables promedios de 82,10% y 41,01% para el Ni y Co respectivamente.

Legrá (2014) procesó una mezcla de menas lateríticas a escala piloto conformada por la yacimientos de YS, YN y PG. Por los resultados alcanzados se seleccionó el régimen térmico alto como el más conveniente al lograr extractables promedios de 82,87% y 38,51% de Ni y Co respectivamente.

Chang et al. (2014) obtuvieron a escala industrial las dependencias gráficas que demuestran la influencia del contenido de los principales minerales sobre los extractables de Ni y Co.

Legrá (2015) evaluó el proceso de reducción para la mena laterítica del Yacimiento Camarioca Este (CE) a escala piloto. Los resultados identificaron al régimen térmico alto como el más adecuado, al obtener extractables promedios para el Ni y el Co de 82,70% y 49,98% respectivamente.

Legrá & Lamorú (2016) analizaron el proceso reducción piloto para una mezcla de menas lateríticas conformadas por los yacimientos CE, YN y YS. Los mejores extractables de Ni y Co se alcanzaron con el régimen térmico alto, con valores promedios de 84,65% y 43,19% respectivamente.

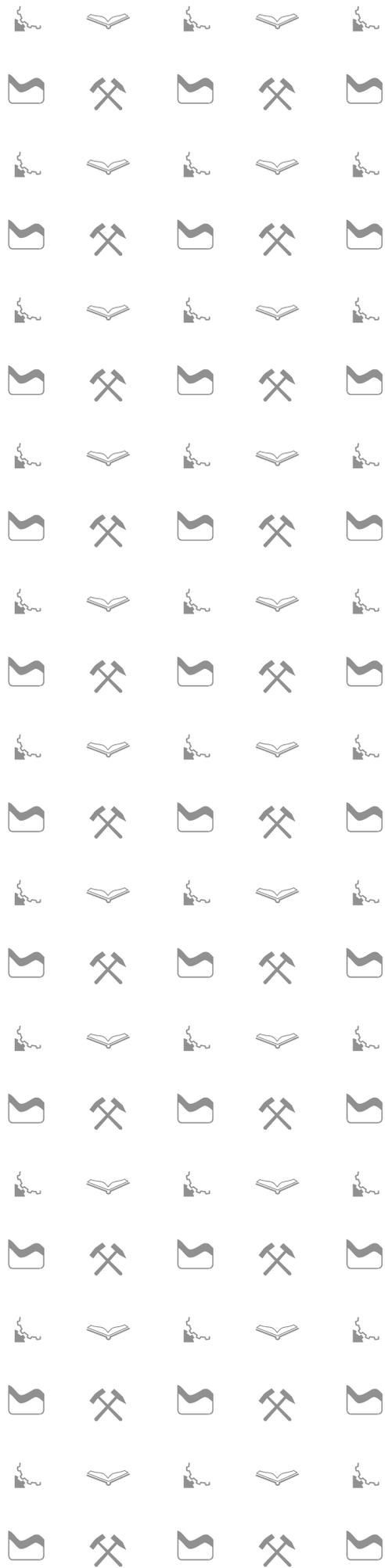
Rivas (2017) determinó los extractables de los elementos de interés al procesar una muestra tecnológica a escala piloto conformada por los yacimientos CE, PG, YN y YS según la planificación minera exigida por la ECG para el 2018. Los mejores resultados se lograron al utilizar el régimen térmico alto, al reportar extractables promedios de Ni y Co de 81,55% y 34,02% respectivamente.

## **1.6 Conclusiones parciales del Capítulo I**

- Las lateritas cubanas son actualmente una fuente importante de materia prima para la extracción del níquel y el cobalto que se caracterizan por presentar un

complejo comportamiento químico-físico-mineralógico, donde los modelos granulométricos más efectivos para caracterizarlas antes y después del proceso de molienda son los de Rosin–Rammmler, Gates–Gaudin–Schuhmann y la función Swebrec.

- El proceso Caron constituye una de las tecnologías más importantes para procesar actualmente las menas lateríticas, siendo la etapa de reducción una donde ocurren las principales transformaciones físico-químicas.
- El control de los extractables de níquel y cobalto constituyen la esencia del proceso de reducción en la tecnología carbonato-amoniaca, siendo las características de la mena laterítica, el perfil de temperatura, las características del horno y la concentración de la atmósfera reductora las variables que más influyen.



# CAPÍTULO II

# MATERIALES Y

# MÉTODOS

---

## CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar esta investigación se utilizaron instalaciones de la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca" (CEDINIQ), donde los equipos y materiales fundamentales son los que se relacionan a continuación.

### 2.1 Descripción del flujo tecnológico de la Planta Piloto

La planta piloto del CEDINIQ está conformada por las áreas de Preparación del Mineral, Hornos de Reducción y Lixiviación y Lavado.

Las principales funciones del área de Preparación del Mineral son el secado y la molienda de la mena laterítica que se alimenta a la planta. Consta de una sección para la preparación de la muestra tecnológica donde se homogeniza el mineral y se le separan las fracciones gruesas (mayores de 150 mm). Posteriormente el mineral es almacenado en una plazoleta techada (para protegerlo de la inclemencia del tiempo). La mena se alimenta a la planta mediante un cargador frontal, el cual deposita el mineral en una criba de barrotes fijos, donde ocurre la clasificación preliminar. Las fracciones -50 mm se alimentan directamente al proceso; mientras que las fracciones +50 y -150 mm se depositan en una trituradora de mandíbula, que las tritura hasta una granulometría inferior a 50 mm. Todo el material a secar converge en una banda transportadora que lo traslada hasta la tolva de alimentación al secador. El secador consiste en un tambor rotatorio de 7 500 mm de largo y 1 200 mm de diámetro; el movimiento del mineral dentro del tambor es paralelo al sentido del flujo de gases. El secado se efectúa con los gases provenientes de la cámara de combustión anexa al secador rotatorio y el calor producido por la combustión del petróleo (fuel-oil). El material secado se alimenta a la sección de molienda, donde se efectúa la primera clasificación de control de proceso (rechazo seco) en una zaranda vibratoria, que garantiza que todo el mineral que se alimenta al molino de bolas presente una fracción inferior a 10 mm. El mineral molido se transporta neumáticamente a un clasificador

---

mecánico, en el que se regula la calidad en cuanto a fineza del producto final. El mineral con las características de fineza exigidas por la investigación y el polvo colectado en los sistemas de limpieza de gases del secadero y del circuito de molienda (ciclones y filtros de mangas) se almacenan en dos silos con una capacidad de 35 toneladas cada uno. La sección cuenta con un sistema de recuperación de polvos de los gases remanentes, que consiste en un lavador tipo Ventury que garantizan que los gases sean expulsados a la atmósfera libre de partículas, mientras que la conformación del lodo se envía a la piscina de colas.

El mineral almacenado en los silos se alimenta a la balanza dosificadora y a la mezcladora de paleta, en la que se suministra el petróleo utilizado como aditivo reductor (2,5 %). La mena beneficiada se alimenta a un horno Herreshoff de 17 hogares enumerados desde el H-0 en la parte superior hasta el H-16 en la zona de descarga. El horno dispone de dos cámaras de combustión acopladas directamente a ductos que distribuyen los gases reductores mediante dámperes en los hogares 7, 8, 10, 12, 14 y 15; y un eje central al que se acoplan cuatro brazos en cada hogar con dientes que facilitan el traslado del mineral de un hogar a otro. En los hogares cuatro y seis se alimenta el aire de postcombustión con el objetivo de diluir la concentración de los gases reductores en la salida del equipo y de aprovechar la energía liberada por las reacciones exotérmicas del CO y H<sub>2</sub> al reaccionar con el O<sub>2</sub>. Durante su paso por el horno, al mineral se le elimina el agua de cristalización y es reducido bajo condiciones controladas de temperaturas y concentración de gases, con el fin de reducir selectivamente la mayor cantidad de níquel y cobalto, y la menor posible de hierro.

Los gases de salida del horno se alimentan a un ciclón; donde el polvo atrapado se recicla al hogar H-0. El gas residual es lavado en un lavador tipo Ventury, siendo expulsados a la atmósfera libre de partículas. El lodo formulado se envía a la piscina de colas. En la salida del H-16 el mineral reducido se transporta hasta el Enfriador Rotatorio donde se disminuye la temperatura del mineral desde 730-780 °C hasta 100-120 °C.

El mineral reducido que se enfría hasta 120 °C se alimenta al circuito de Lixiviación y Lavado. En la figura 2.1 se presenta el esquema de la instalación experimental piloto.

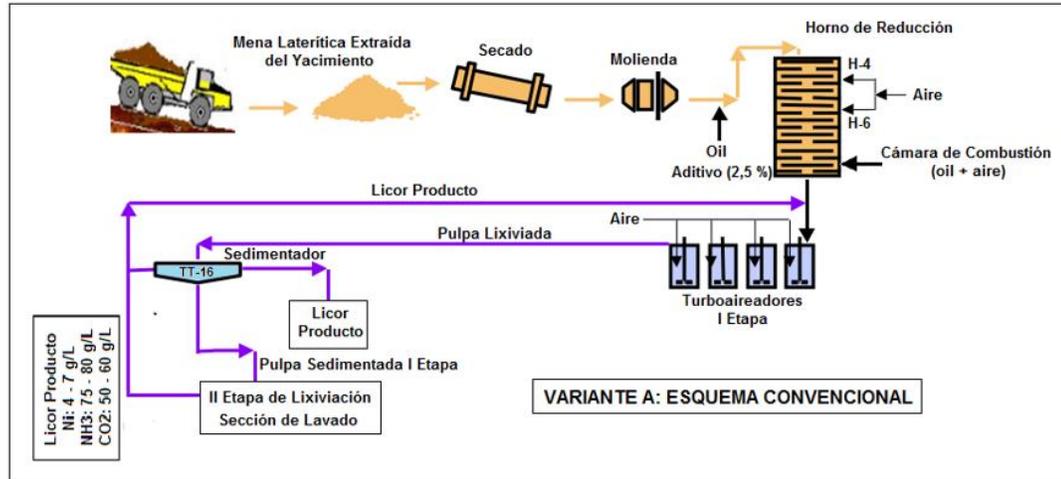


Figura 2.1 Instalación experimental piloto.

## 2.1 Equipos y utensilios que se utilizaron

### 1. Secador de Tambor Rotatorio.

El Secador de Tambor Rotatorio se utilizó para garantizar que la humedad de la mena laterítica bajo estudio sea inferior al 5%. En la figura 2.2 se presentan sus características principales.



Figura 2.2 Secador de Tambor Rotatorio piloto.

## 2. Molino de Bolas.

El molino de bolas se utilizó para garantizar la granulometría de la mena laterítica exigida por el proceso de reducción de la ECG (Coello et al., 2019). En la figura 2.3 se presentan sus características principales.



Figura 2.3 Molino de bolas piloto.

## 3. Silos de Almacenamiento

La sección de preparación del mineral piloto cuenta con dos silos de capacidad de 35 toneladas cada uno para almacenar la mena laterítica luego de los procesos de secado y molienda con el objetivo de garantizar la estabilidad de alimentación al horno de reducción.

## 4. Balanza y Mezcladora de Paletas

La Mezcladora de Paletas (figura 2.4) tiene la función de mezclar la mena laterítica y el petróleo tecnológico que se utiliza aditivo reductor, 2,5% utilizándose como base el flujo de mena que se alimenta al horno. Tiene acoplada una balanza con el objetivo de dosificar la mena laterítica al proceso de reducción.



Figura 2.4 Balanza y Mezcladora de Paletas.

#### 5. Horno de Reducción.

El horno de solera múltiples piloto se utilizó para evaluar el proceso de reducción de la tecnología carbonato-amoniaco cubana. En la figura 2.5 se presentan sus características principales.



#### Características técnicas

1. Suministro, Italia
2. Construcción, acero regular
3. Revestimiento interior de refractario
4. Dimensiones D x H, 2,51 x 11 m
5. Número de hogares, 17
6. Número de cámaras de combustión, 2
7. Quemadores instalados, Hauck 782
8. Área efectiva 0,83; m<sup>2</sup>/t día
9. Tiempo de residencia; 70 a 80 min

Figura 2.5 Horno de Reducción piloto.

## 6. Reactor de Lixiviación.

Los reactores utilizados para lixiviar (figura 2.6) se caracterizan por tener una capacidad de cuatro litros y una altura de 241 mm. A estos se le acopla un sistema de agitación mecánica con velocidad de rotación en el rango de 400 a 460 rpm.



Figura 2.6 Banco de reactores para lixiviar.

## 7. Estufa.

La marca de la estufa que se utilizó es MEMMERT, con una temperatura máxima de 250 °C y una capacidad de almacenamiento de mineral de 100 a 200 kg.

## 8. Tamizadora por vía húmeda.

La tamizadora (figura 2.7) que se utilizó en esta investigación es del modelo RX-29, tipo Rotap W.S Tyler Blvd, mentor OH4460. El motor que tiene acoplado tiene una potencia de 560 kW y presenta una protección para evitar que se introduzca el agua en su interior.



Figura 2.7 Tamizadora por vía húmeda.

#### 9. Balanza Analítica.

La balanza analítica utilizada es de marca Radwag, con pesaje máximo de 10 Kg, error de  $\pm 0,1$  gramos y corriente de 220 V.

#### 10. Tamices de Serie Tyler.

El juego de tamiz utilizado en la investigación se presenta en la tabla 2.2.

Tabla 2.1 Juego de tamices seleccionado para el análisis granulométrico

N°	Tamaño (milímetros)								
1	150,00	6	20,00	11	6,30	16	0,71	21	0,15
2	100,00	7	16,00	12	4,00	17	0,50	22	0,090
3	75,00	8	12,50	13	3,15	18	0,40	23	0,075
4	50,00	9	10,00	14	2,38	19	0,315	24	0,045
5	25,00	10	8,00	15	1,00	20	0,25	25	0,037

### 11. Cortador de Rifles.

Consiste en un recipiente en forma de V que tiene en sus costados una serie de canales que descargan alternativamente en dos bandejas ubicadas en ambos lados del cortador, ver figura 2.8. Sus funciones fundamentales son la de homogenizar y dividir.



Figura 2.8 Cortador de Rifle.

### 12. Cronómetro digital.

### 13. Kitasatos.

### 14. Mortero de porcelana.

## 2.2 Materiales y soluciones

Los principales materiales y soluciones que se utilizaron en este estudio fueron:

1. Muestra tecnológica de la mena laterítica.
2. Petróleo tecnológico.
3. Licor carbonato-amoniaco fuerte.
4. Argón.
5. Agua destilada.

La muestra tecnológica (MT-MO) que se utilizó para ejecutar los diferentes experimentos concebidos en la investigación se correspondió a la muestra metalúrgica de los minerales que procesa la ECG en el 2022, siendo conformada a partir de los yacimientos CE, PG, YN y YS. La MT-MO quedó constituida de aproximadamente 800 toneladas base seca de mineral, consideradas representativas y suficientes para ejecutar el programa de pruebas que se planificó.

El petróleo tecnológico que se utilizó para realizar los experimentos, presentó características similares al que se emplea en los secaderos y hornos de reducción de la ECG. En el Anexo A1 se muestran sus características principales.

El licor carbonato amoniacal fue suministrado por la ECG mediante un sistema de bombeo interconectado entre la Planta de Recuperación de Amoníaco y las instalaciones de la Planta Piloto. Para utilizarlo en la lixiviación del mineral reducido de acuerdo al procedimiento de QT, se diluyó hasta que presentó una concentración de amoníaco que osciló en el rango de 80 a 85 g/L. En el Anexo A2 se presentan sus características principales.

Los principales materiales y soluciones que se obtuvieron fueron el mineral reducido y la pulpa carbonato amoniacal.

El mineral reducido presenta una coloración negruzca. Es muy tóxico, abrasivo y pegajoso, que al ponerse en contacto con el aire toma una coloración rojiza indicando que se ha reoxidado. Su densidad es cercana a 4,0 t/m<sup>3</sup>.

La pulpa amoniacal formada al mezclar el mineral reducido y el licor carbonato amoniacal tiene una relación líquido/sólido de 10/1 aproximadamente y una temperatura que puede oscilar entre 33 a 38 °C.

### **2.3 Técnicas Analíticas**

Las técnicas analíticas que se emplearon durante la ejecución del estudio fueron la espectrometría de absorción atómica (EAA) y la difracción de rayos X (DRX).

---

La EEA se utilizó con el objetivo de determinar el contenido de los elementos químicos presentes en las muestras, ya que permite determinar con una alta confiabilidad, los contenidos de los siguientes elementos: hierro, níquel, cobalto, magnesio, y otros metales. Sus componentes principales son: la fuente de radiación, el atomizador, el monocromador y el detector. La base de esta técnica consiste en pasar el elemento a analizar a su forma atómica en estado libre por medio de la llama, a través de la cual se hace incidir una radiación continua, que es característica para cada elemento. A través de un dispositivo adecuado se realiza la selección de la radiación y la medida de la variación de la intensidad de la luz, relacionada directamente con la concentración del elemento. En la figura 2.9 se muestra el equipo de forma integral.



Figura 2.9 Equipo de Espectrometría de Absorción Atómica.

La DRX se utilizó para determinar las principales fases mineralógicas presentes en la mena laterítica que se alimentó al proceso y en el mineral reducido. Los difractogramas de DRX se realizaron por el método de polvo en un Difractómetro X'PERT<sup>3</sup> de PANalytical con las siguientes condiciones: Barrido tipo Gonio en  $[\theta]$  registro angular desde 4.0042 hasta 79.9962 con distancia de paso en  $2\theta$  de 0.0080 con radiación de Cu y filtro de níquel. La diferencia de potencial es de 40 kV y corriente de 30 mA. La

calibración del equipo se chequea con patrón externo de silicio. El análisis cualitativo de las fases se realiza con la utilización del programa HighScore de Panalytical. En la figura 2.10 se muestra el equipo de forma integral.



Figura 2.10 Equipo de Difracción de Rayos X.

## 2.4 Metodologías

Las metodologías que se utilizaron durante la investigación fueron:

1. Metodología para la toma y preparación de la mena laterítica.
2. Metodología para la determinación del extractable del níquel y el cobalto en las diferentes zonas del horno.

### 2.4.1 Metodología para la toma y preparación de la mena laterítica

La muestra tecnológica de la mena laterítica se conformó a partir de los minerales concebidos a la ECG de acuerdo a los porcentajes de participación exigidos.

Primeramente se mezclaron todos los tipos de menas que conformaron la muestra en una pila de aproximadamente 22 m de largo por 3,5 de alto, para la que se inició el proceso de prehomogenización mediante el uso del método de formación de pilas cónicas sucesivas con la utilización de un cargador frontal marca VOLVO modelo L-120. El proceso de prehomogenización se realizó en cinco pasos, aprovechándose en cada uno, el proceso de segregación que experimenta los tamaños mayores de partículas, con el objetivo de separar las rocas mayores de 150 mm. Luego del proceso de prehomogenización, se alimentó la mena laterítica a la sección de Preparación de Mineral de la Planta Piloto del CEDINIQ, con el objetivo de realizar el proceso de secado y molienda.

#### **2.4.2. Metodología para la determinación del extractable del níquel y cobalto**

Para determinar el extractable de níquel y cobalto en los hogares pares del horno se introduce en los toma de muestras 200 mL de licor carbonato-amoniaco con concentración de amoníaco de 80-85 g/L. A estos recipientes con licor se le determina su peso, y se les suministra una inyección de Argón que garantice eliminar todo el dióxigeno presente en los mismos. Con los recipientes con licor y Argón, se inicia el proceso de la toma de muestra de mineral reducido, comenzando desde el hogar 0 hasta el 16, considerando el tiempo de residencia que presenta el mineral dentro del equipo.

Luego de tomar la muestra de mineral reducido, se vuelven a pesar cada uno de los kitsatos para determinar el peso real de mineral reducido presentes en los recipientes. Una vez conocido el peso de mineral reducido presente en cada uno de los recipientes, se le añade un volumen de licor carbonato-amoniaco con una concentración de amoníaco de 80-85 g/L, logrando que las suspensiones resultantes contengan una relación: líquido (L)/sólido (S) de 10 a 1 respectivamente. Las suspensiones formadas con relación L/S de 10 a 1 se ponen a lixiviar durante dos horas en los reactores descritos en el epígrafe 2.2.

Las suspensiones lixiviadas se filtran, lavándose con 150 mL de tres soluciones. Las dos primeras con 7 y 3% de amoníaco respectivamente, mientras que la tercera se realiza con agua destilada con el objetivo eliminar del sólido todo el Ni que puede pasar a estado de solución.

El sólido húmedo empobrecido de Ni, correspondiente a cada hogar par del horno, es secado a 150 °C durante un período de dos horas. Las muestras de sólidos secos se trituran con un mortero para garantizar que tengan una granulometría inferior a los 0,150 mm. Las muestras preparadas se envían al laboratorio para realizarse las determinaciones de los metales de interés por la técnica analítica de EAA.

Finalmente los resultados de extractables que pertenecen a cada muestra que se tomó del horno se obtienen a partir de los valores que brinda el laboratorio, mediante la utilización de la ecuación 1.4.

## **2.5 Condiciones y parámetros de operación en el horno piloto**

Para evaluar el proceso de reducción de la mena laterítica con alta variabilidad mineralógica se utilizaron las condiciones de operación para los regímenes de temperatura alto (RTA) y bajo (RTB) que se reportan en la tabla 2.2 y en los Anexos A3 y A4.

Los principales parámetros controlados durante el estudio fueron:

- La granulometría (vía húmeda) del mineral alimentado utilizando las mallas 0,15 mm, 0,074 mm y 0,044 mm.
- El contenido de Ni, Fe, Co, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral alimentado al horno.
- El contenido de Ni, Fe y Co del mineral lixiviado (lixiviación estándar QT).
- Los extractables de níquel y cobalto.
- La concentración de NH<sub>3</sub> en el licor utilizado en la lixiviación estándar QT (80-85 g/L).

- El contenido de Ni<sub>T</sub>, Fe<sub>T</sub>, Co<sub>T</sub>, Ni<sup>0</sup>, Co<sup>0</sup>, Fe<sup>0</sup>, Fe<sup>2+</sup>, densidad y fracción magnética del mineral reducido.

Tabla 2.2 Principales condiciones de operación

Régimen	Estadígrafos	Flujo de Mineral, t/h	Temperatura; °C						Aditivo Reductor, %
			H-0	H-6	H-13	H-15	Cámara A	Cámara B	
RTA	Promedio	0,749	246	732	747	776	1 388	1 389	2,54
	Máximo	0,750	259	735	751	778	1 400	1 396	2,66
	Mínimo	0,746	235	730	743	773	1 378	1 381	2,39
	Desv. Est.	0,001	7,829	1,619	2,759	1,549	7,502	5,125	0,086
RTB	Promedio	0,749	235	731	709	735	1 390	1 389	2,53
	Máximo	0,751	242	736	713	739	1 399	1 398	2,6
	Mínimo	0,747	217	728	702	731	1 381	1 380	2,46
	Desv. Est.	0,001	7,391	2,263	3,335	2,983	5,646	6,106	0,047

## 2.6 Datos que se consideraron para la valoración económica

Para realizar la estimación económica se utilizaron los datos que se presentan a continuación:

- Precio del níquel: 26 911,33 USD/t (Suriz, 2022).
- Precio del cobalto: 79 133,93 USD/t (Suriz, 2022).
- Precio del petróleo: 668 USD/t
- Hornos en operación 22.
- Alimentación de mineral por horno, 18 t/h.
- Tonelaje que procesará la planta de Hornos de Reducción en la ECG (t<sub>HR</sub>): 3 037 478 t/a.
- Eficiencia Metalúrgica de la ECG (ξ): 70 %.
- % Ley de Ni o Co (% ley<sub>(Ni o Co)</sub>): depende del valor obtenido.
- % Extractables de Ni o Co (% Ext<sub>(Ni o Co)</sub>): depende del valor obtenido en los regímenes de operación.

- Consumo de petróleo RTB, t/a:  $Con_{fuel\ oil} = 72,7 \frac{kg}{t} * \frac{t_{HR}}{1000}$
- Consumo de petróleo RTA, t/a:  $Con_{fuel\ oil} = 78,0 \frac{kg}{t} * \frac{t_{HR}}{1000}$
- Costo del petróleo, USD/a:  $Cos_{fuel\ oil} = 700 * Con_{fuel\ oil}$
- Toneladas de (Ni o Co) alimentadas:  $t_{(Ni\ o\ Co)al} = \frac{\% (ley_{(Ni\ o\ Co)})}{100} * t_{HR}$
- Toneladas de (Ni o Co) producidas:  $t_{(Ni\ o\ Co)p} = \frac{\% (Ext_{(Ni\ o\ Co)})}{100} * t_{(Ni\ o\ Co)al} * \xi$

## 2.7 Conclusiones parciales del Capítulo II

- Los principales equipos, utensilios, materiales y soluciones que se utilizaron cumplen con las normas establecidas para el desarrollo de la investigación.
- Las técnicas analíticas que se emplearon fueron la espectrometría de absorción atómica (EAA) y la difracción de rayos X (DRX).
- Las metodologías propuestas en la investigación garantizan la representatividad y validez de los resultados.



# **CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

## CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados experimentales obtenidos durante el proceso de reducción de la mena laterítica a escala piloto, auxiliándose de tablas y figuras, realizadas con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurión XV y el Microsoft Excel, que muestran de un modo práctico los resultados.

### 3.1 Caracterización químico-físico-mineralógica de la mena laterítica bajo análisis

En la tabla 3.1 se presenta el comportamiento granulométrico de la muestra tecnológica *in situ* que se utilizó en la investigación.

Tabla 3.1. Comportamiento granulométrico de la muestra tecnológica *in situ*

Fracción (mm)	Muestra Mineral In Situ			
	Masa (gramos)	%	Acumulativo %	
			Retenido	Cernido
150,00	0,00	0,00	0,00	100,00
100,00	1 219,30	0,50	0,50	100,00
75,00	3 478,40	1,42	1,92	99,50
50,00	15 553,30	6,35	8,27	98,08
25,00	2 684,80	1,10	9,36	91,73
20,00	1 802,40	0,74	10,10	90,64
16,00	2 280,20	0,93	11,03	89,90
12,50	3 926,30	1,60	12,63	88,97
10,00	5 057,9	2,06	14,69	87,37
8,00	659,29	0,27	14,96	85,31
6,30	3 878,54	1,58	16,55	85,04
4,00	6 891,97	2,81	19,36	83,45
3,15	5 020,23	2,05	21,41	80,64
2,38	7 112,59	2,90	24,31	78,59
1,00	8 415,08	3,43	27,75	75,69
0,71	6 248,12	2,55	30,30	72,25
0,50	5 249,86	2,14	32,44	69,70
0,40	4 303,06	1,76	34,20	67,56
0,315	5 583,04	2,28	36,48	65,80
0,250	3 922,92	1,60	38,08	63,52
0,150	7 367,94	3,01	41,08	61,92
0,090	8 436,95	3,44	44,53	58,92
0,075	1 667,84	0,68	45,21	55,47
0,045	8 945,73	3,65	48,86	54,79
0,037	3 577,00	1,46	50,31	51,15
-0,037	121 717,24	49,69		49,69
Total	245 000,00	100,00		-

De los resultados mostrados en la tabla 3.1 se puede inferir que la muestra tecnológica que se utilizó para evaluar el proceso de reducción de la ECG cumple con los requerimientos establecidos por la entidad, al realizar el rechazo de las fracciones superiores a 150  $\mu\text{m}$ .

A partir de los resultados del porcentaje del Retenido Acumulativo en función del tamaño de las partículas que se reportan en la tabla 3.1 se analizó el comportamiento granulométrico que presenta la muestra *in situ*, ver las figuras 3.1 y 3.2.

La forma cóncava que presenta la curva característica de la distribución de los tamaños de partículas, ver figura 3.1, permite afirmar que existe un predominio de los granos finos de acuerdo a las tendencias explicadas por Namindo (2015).

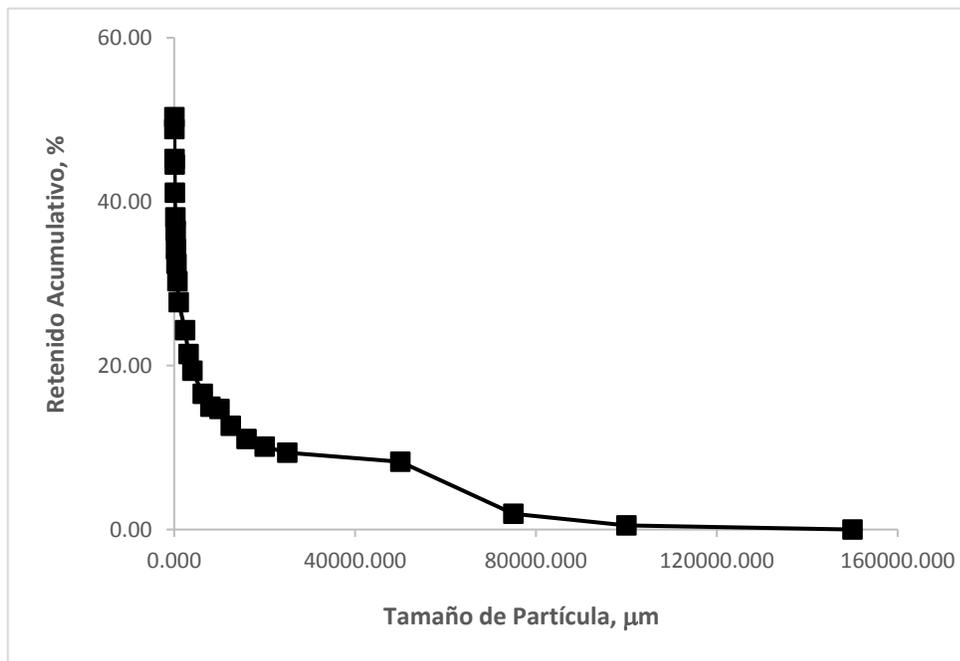


Figura 3.1. Comportamiento granulométrico de la muestra tecnológica

En la figura 3.2 se compara los resultados entre los porcentajes del Pasante Acumulativo experimental y calculados mediante el uso de los modelos granulométricos

de Gates–Gaudin–Schuhmann (GGS), Rosin–Rammler (RR) y la función Swebrec (SWEF).

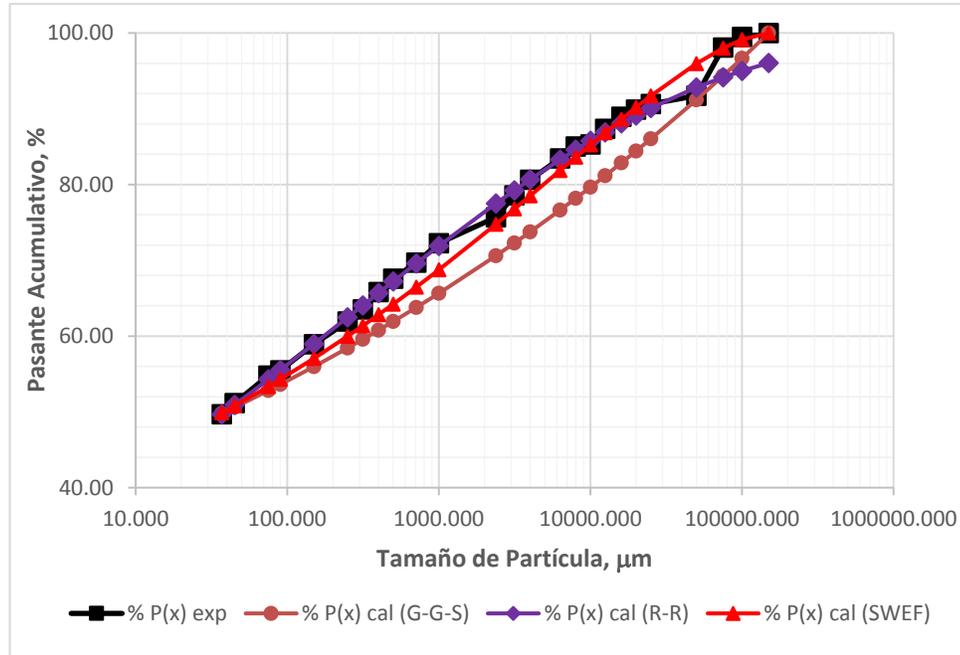


Figura 3.2. Comparación de los modelos granulométricos

El modelo de distribución granulométrica GGS, ver expresión 3.1, se caracterizó por ser el menos preciso con un coeficiente de determinación de 0,9806 y un error residual de 4,86; mientras que los resultados más exactos se lograron con los modelos granulométricos RR y SWEF, ver expresiones 3.2 y 3.3 respectivamente, con coeficientes de determinación superiores a 0,9850 y errores residuales inferiores a 1,95.

$$\%P_{(x)} = 100 \times \left( \frac{x}{150\,000} \right)^{0,084} \dots 3.1$$

$$\%P_{(x)} = 100 \times \left( 1 - e^{-\left[ \frac{x}{278,33} \right]^{0,1865}} \right) \dots 3.2$$

$$\%P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[ \frac{\ln\left(\frac{150\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{150\,000}{38,0189}\right)} \right]^{1,5692}} \right\} \dots 3.3$$

Estos resultados coinciden con los que obtuvieron Coello et al., 2019 al evaluar el uso de la función SWEF en la mena laterítica cubana perteneciente al yacimiento de Punta Gorda.

En la tabla 3.2 y en el Anexo B se presentan los resultados de la composición química y las características granulométricas de la mena que se alimentó al horno de reducción piloto. Los resultados que muestran los estadígrafos de la composición química y granulométrica permiten aseverar que todas las variables tuvieron un comportamiento estable.

Tabla 3.2. Estadígrafos de la composición química y granulométrica del mineral que se alimentó al horno piloto

Estadígrafos	Mineral entrada al Horno HR-1, %									Granulometría, %		
	Ni	Co	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	H <sub>2</sub> O	S	C	0,150	-0,074	-0,044
Promedio	1,07	0,126	39,40	9,08	6,17	5,10	3,23	0,23	0,09	2,83	86,37	75,01
Máximo	1,10	0,132	40,33	10,03	7,33	6,55	4,20	0,24	0,10	4,93	87,70	77,60
Mínimo	1,05	0,111	38,27	7,96	4,12	3,98	2,20	0,22	0,08	1,00	84,27	70,80
Desv. Est.	0,02	0,01	0,72	0,75	1,06	0,76	0,64	0,01	0,01	1,13	1,19	1,78

Los contenidos de Ni se comportaron en el rango de 1,05 a 1,10%, lo que muestra la considerable disminución de la calidad que tienen las menas actualmente concebidas a la empresa, con una ley inferior en 0,29% respecto a su valor de diseño (1,36%).

El Fe y el Co se caracterizaron por presentar un comportamiento adecuado para su procesamiento por la tecnología carbonato amoniacal con valores que oscilaron desde 38 a 41% y 0,111 a 0,132% respectivamente.

Los compuestos nocivos del proceso  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  mostraron valores promedios de 9,08, 6,17 y 5,10% respectivamente, aspecto que confirma la disminución de la calidad de la mena que se alimenta al proceso de reducción. Es importante resaltar que estos valores coinciden con los reportados durante la evaluación piloto del yacimiento Camarioca Este (Legrá, 2015), siendo indicativo de su predominio en el mineral que se alimenta a la empresa.

En el caso de los valores de humedad, S, C y comportamiento granulométrico oscilaron en los rangos permisibles por el proceso Caron.

Las principales fases mineralógicas que se identificaron en la muestra *in situ* se presentan en la figura 3.3.

El difractograma muestra compuestos característicos de menas lateríticas con predominio de los óxidos y oxi-hidróxidos de minerales de hierro y aluminio (goethita, hematita, maghemita y gibbsita); mezclados con reflejos intensos de serpentinas en forma de lizarditas, el cuarzo correspondiente fundamentalmente a la zona de transición y minerales arcillosos en forma de talco (hidróxido de silicato de magnesio) y cloritas (clinocloro).

Diferentes estudios realizados en las menas lateríticas de los yacimientos concebidos a la ECG reportan fases mineralógicas que coinciden con las que se identificaron en esta investigación. (Angulo et al., 2022; Domènech et al., 2017)

A juzgar por el difractograma de la mena tecnológica y la clasificación propuesta por Gleeson et al., 2003; se puede concluir que la muestra presentó un complejo comportamiento mineralógico, con considerable presencia de menas limoníticas y saprolíticas, minerales de las zonas de transición y escombros, mezclados con menas arcillosas.

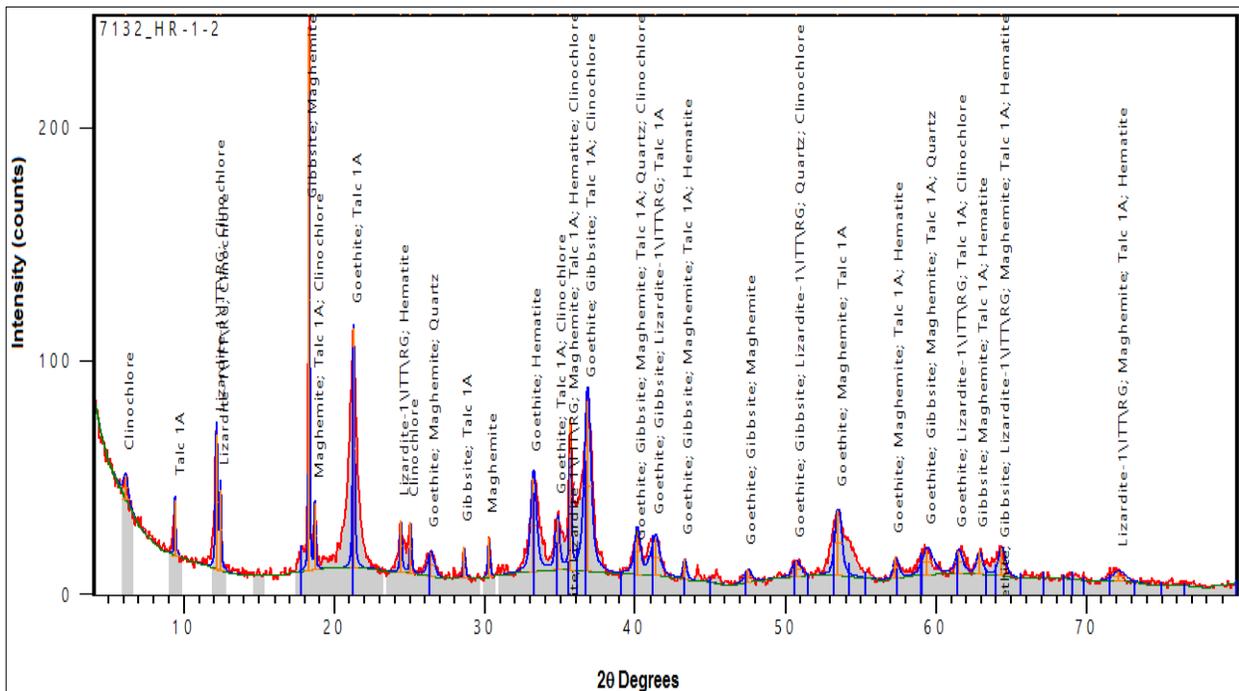


Figura 3.3. Fases mineralógicas identificadas en la muestra *in situ*.

### 3.2 Caracterización químico-físico-mineralógica del mineral reducido

Durante todo el periodo de realización de la evaluación piloto se tomaron muestras de mineral reducido con la precaución de suministrar una atmósfera inerte de argón en los kitsatos para evitar el proceso de reoxidación del mineral. Los estadígrafos de sus características químico-físicas se muestran en la tabla 3.3 y en el Anexo C.

Tabla 3.3. Características químico-físicas del mineral reducido

Estadígrafos	Características Químicas HR-3, %									$\rho$ ( $t/m^3$ )	FM (%)
	Ni <sub>total</sub>	Co <sub>total</sub>	Fe <sub>total</sub>	Ni°	Fe°	FeO	Fe <sup>2+</sup>	S	C		
Promedio	1,29	0,138	46,86	0,96	1,79	22,49	28,17	0,68	0,54	4,27	64,13
Máximo	1,32	0,147	48,97	1,05	2,37	23,96	31,83	0,69	0,65	5,42	69,46
Mínimo	1,26	0,127	44,57	0,86	1,43	18,33	25,11	0,67	0,40	3,28	55,47
Desv. Est.	0,02	0,006	1,20	0,06	0,26	1,64	1,84	0,01	0,09	0,54	4,73

Los resultados que se muestran en la tabla 3.3 se corresponden a un proceso adecuado de tostación-reducción selectiva en el que se maximiza la conversión del NiO en Ni<sup>0</sup>, al garantizar un estricto control de la formación del Fe<sup>0</sup> para que no supere un porcentaje superior a cinco.

Los valores de Ni, Co y Fe total presentaron como regularidad el incremento de sus porcentajes promedios en 0,22%, 0,01% y 7,46% respectivamente, relacionándose directamente los porcentajes de Fe<sup>0</sup>, FeO y Fe<sup>2+</sup> con la cantidad de Fe<sub>total</sub> que se reporta en el estudio.

Los porcentajes promedios de S y C se incrementaron en 0,45%, comportamiento lógico que se justifica debido a los contenidos de estos elementos que quedan como residuos de las reacciones de combustión incompleta del *fuel oil*.

En el caso de las características físicas se observa que la densidad de la mena laterítica reducida, para todos los experimentos que se efectuaron, presentaron un comportamiento similar con valores promedios que oscilaron en el rango 3,2 a 5,5 t/m<sup>3</sup>. Los resultados de la fracción magnética presentaron valores que oscilaron en el rango de 55 a 70%.

Es importante resaltar que las características químico-físicas que se reportan en esta investigación coinciden con los resultados que se obtuvieron en diferentes investigaciones (Chang & Rojas, 2013; 2014; Legrá et al., 2017) a escala de laboratorio y piloto.

A partir de los resultados que se reportan en la tabla 3.3 se determinaron los porcentajes de metalización del Fe y el Ni, ver figura 3.4.

Se observa que durante los diez días de evaluación piloto los porcentajes de metalización del Ni y el Fe fluctuaron de 66 a 81% y 2,92 a 5,10% respectivamente. Estos resultados coinciden con los que se reportan en diferentes pruebas metalúrgicas a escala piloto (Legrá, 2017; Legrá & Lamorú, 2016).

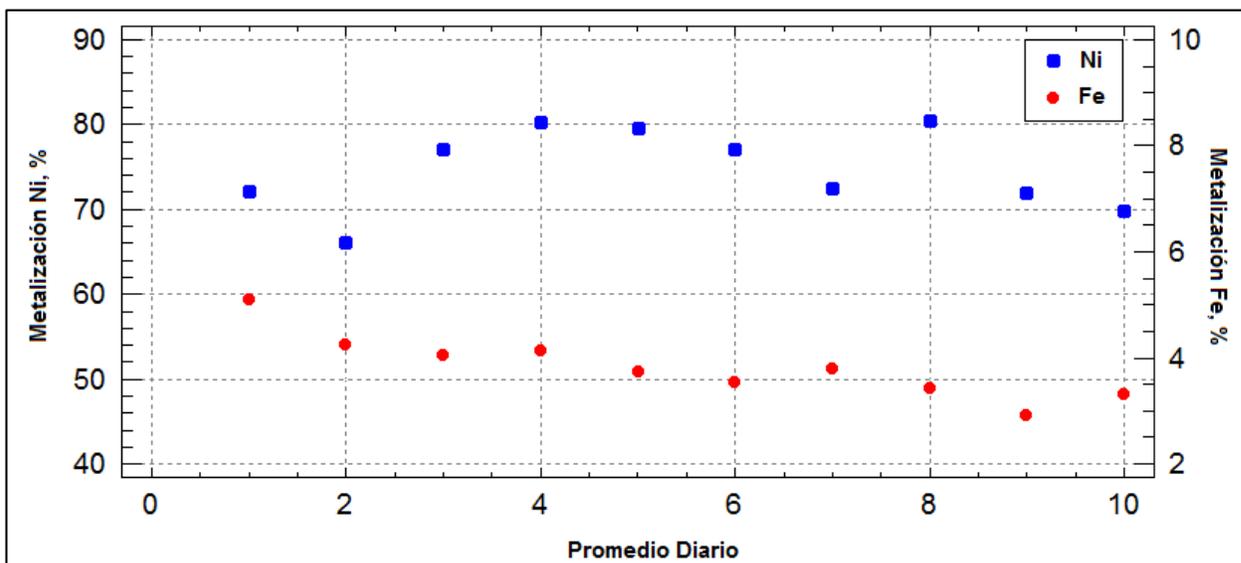


Figura 3.4. Porcentajes promedios de metalización del hierro y el níquel.

Las principales fases mineralógicas que se identificaron en el mineral reducido se presentan en la figura 3.5.

El difractograma muestra fases mineralógicas características de menas lateríticas previamente reducidas entre las que resaltan la magnetita, la maghemita, la fayalita, el silicato de aluminio y la arcilla en forma de talco.

En correspondencia con el proceso metalúrgico de transformación del mineral se evidencia la desaparición de los compuestos hidratados de hierro y aluminio característico de la pérdida de agua mineral cristalina debido al proceso de deshidroxilación, al utilizar temperaturas superiores a 400 °C (O'connor et al, 2006). La presencia de la fayalita y la forma de los picos evidencian el proceso de la recristalización de los silicatos característicos del proceso de reducción de menas lateríticas al utilizar temperaturas superiores a 700 °C (Ilyas et al., 2020; Rhamdhani et al., 2009).

Resulta importante señalar el hecho de que las fases de arcillas en forma de talco prácticamente no se transforman durante el proceso de reducción, lo que indica que su incremento en la mena laterítica que se alimenta a los hornos de reducción puede provocar una disminución de las extracciones de los metales de interés.

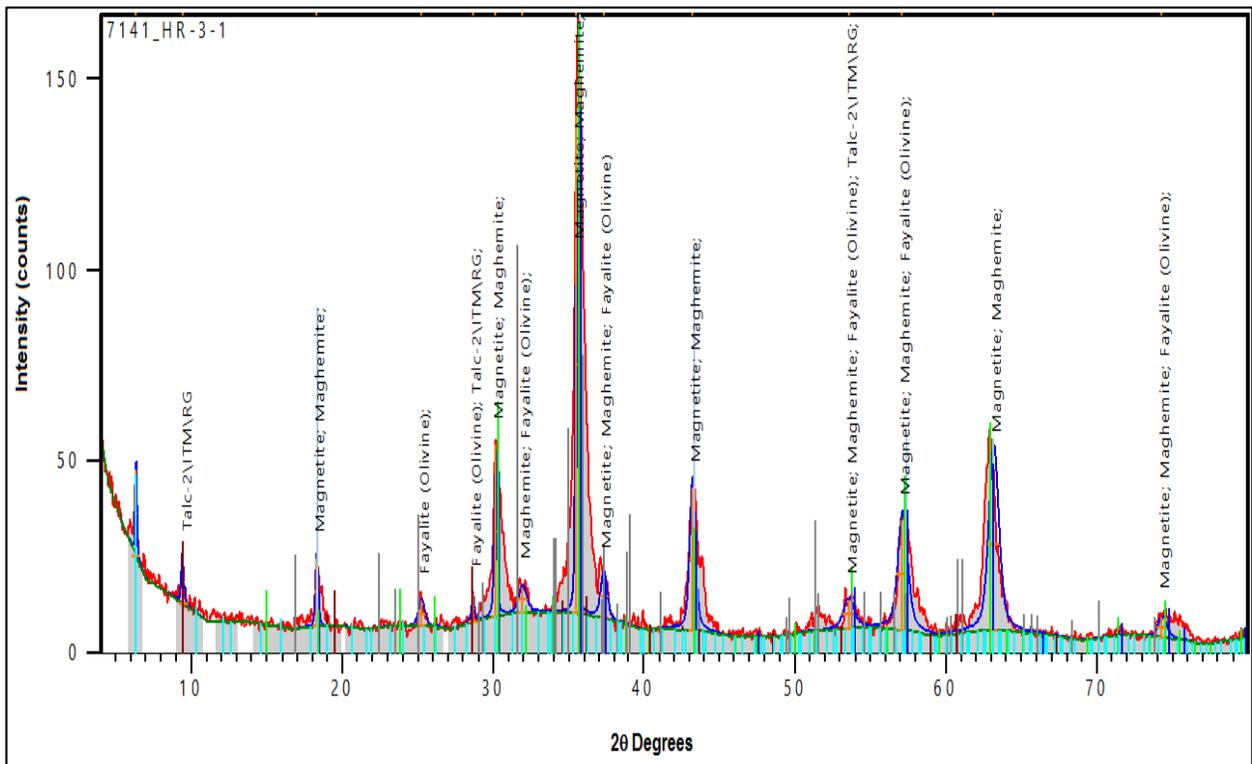


Figura 3.5. Fases mineralógicas identificadas en el mineral reducido.

### 3.3 Caracterización química del mineral reducido/lixiado

En la tabla 3.4 y en el Anexo D se presentan las características químicas de la mena laterítica luego de los procesos de reducción y lixiviación.

Se puede ver que los porcentajes de Ni, Co y Fe estuvieron comprendidos entre 0,28-0,35%, 0,088-0,098% y 45,66-48,04% respectivamente. Estos resultados coinciden con los que se lograron a escala piloto al evaluar el proceso de reducción/lixiviación del yacimiento de Camarioca Este y mezclas de menas concebidas a los yacimientos

de Punta Gorda, Camarioca Este, Yagrumaje Norte y Sur (Legrá, 2017; Rivas, 2017; Legrá & Lamorú; Legrá, 2015).

Tabla 3.4. Características químicas del mineral reducido/lixiviado

Estadísticos	Mineral Reducido y Lixiviado; %		
	Ni	Co	Fe
Promedio	0.31	0.092	46.34
Máximo	0.35	0.098	48.04
Mínimo	0.28	0.088	45.66
Desv. Est.	0.02	0.00	0.69

A partir de los valores reportados en la tabla 3.4 y en el epígrafe 3.1 se determinaron los porcentajes de extractables de Ni y Co, ver figura 3.6.

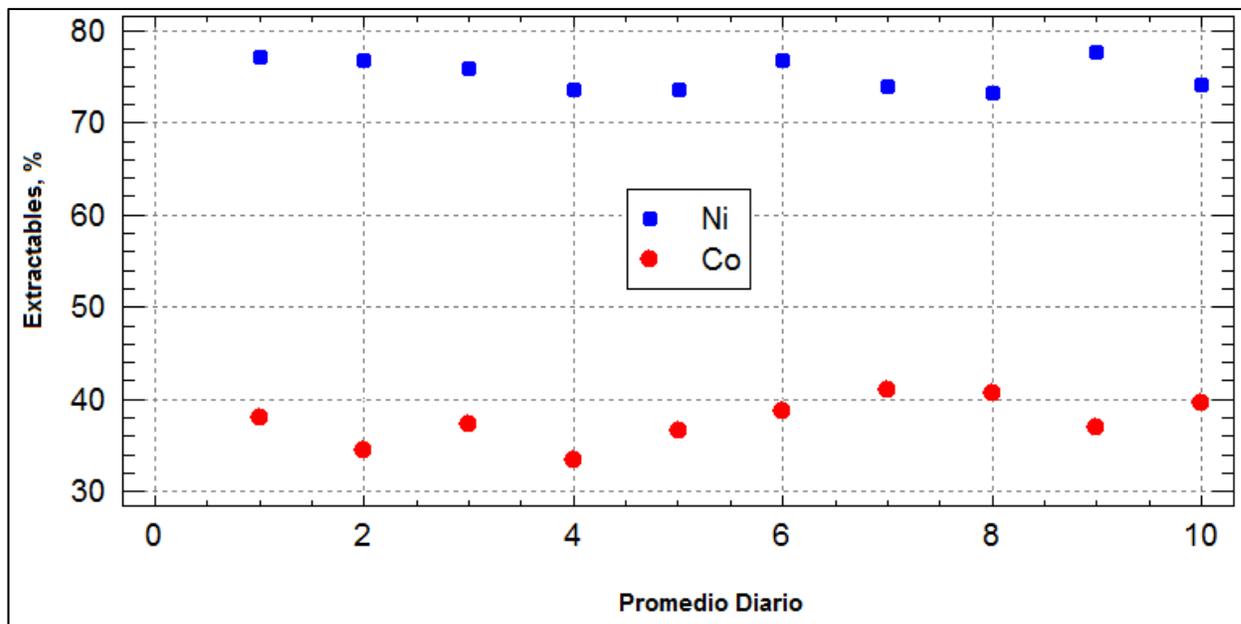


Figura 3.6. Porcentajes de extractables de níquel y cobalto.

Los extractables de Ni y Co presentaron una alta estabilidad durante todo el período de prueba metalúrgica, caracterizándose por fluctuar en los rangos de 73 a 78% y 33 a 41% respectivamente.

A pesar de que los resultados de las extracciones de Ni coinciden con los valores reportados en la literatura científico-técnica (Chang et al., 2014; Chang et al., 2006; Chang et al., 2005; De Graaf, 1979), llama la atención que no se lograron valores superiores al 80%, aspecto que confirma la disminución de la calidad que actualmente presenta la mena laterítica que procesa la tecnología carbonato-amoniaco cubana.

En el caso de las extracciones de Co, a pesar de coincidir con los valores que se logran a escala piloto (Rivas, 2017; Legrá, 2014; Legrá & Rodríguez, 2012), resultaron inferiores a los que reportan diferentes investigadores (Chang et al., 2005; Kawahara et al., 1988) debido a que la planta piloto no realiza la precipitación del Co del licor producto de primera y segunda etapa de lixiviación.

### **3.4 Influencia del perfil térmico en las extracciones de níquel y cobalto**

En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran los porcentajes de extractables de Ni y Co en las diferentes zonas del horno de reducción, durante la utilización de los perfiles de temperatura bajo (RTB) y alto (RTA).

En el caso de los extractables de Ni (figura 3.7), independientemente del régimen de trabajo bajo análisis, los extractables se incrementaron a medida que el mineral pasó por los diferentes hogares del horno de reducción; comportamiento lógico y que permite mostrar las zonas de secado (H-0 hasta H-4), reducción parcial (H-6 hasta H-10) y reducción total (H-12 hasta H-16) descritas por Angulo et al. (2017).

Al comparar las extracciones de Ni en los regímenes RTA y RTB se observa una diferencia significativa promedio de 12,87% en los diferentes hogares del horno, lo que indica que resulta más conveniente reducir la mena laterítica al utilizar el perfil alto de temperatura (770 a 780 en el H-15). Los extractables finales que se lograron en las condiciones de trabajo de los perfiles RTB y RTA fueron de 63,69 y 77,62% respectivamente. Estos resultados son lógicos, y se justifican por la considerable presencia de mena saprolítica que presentó la muestra tecnológica.

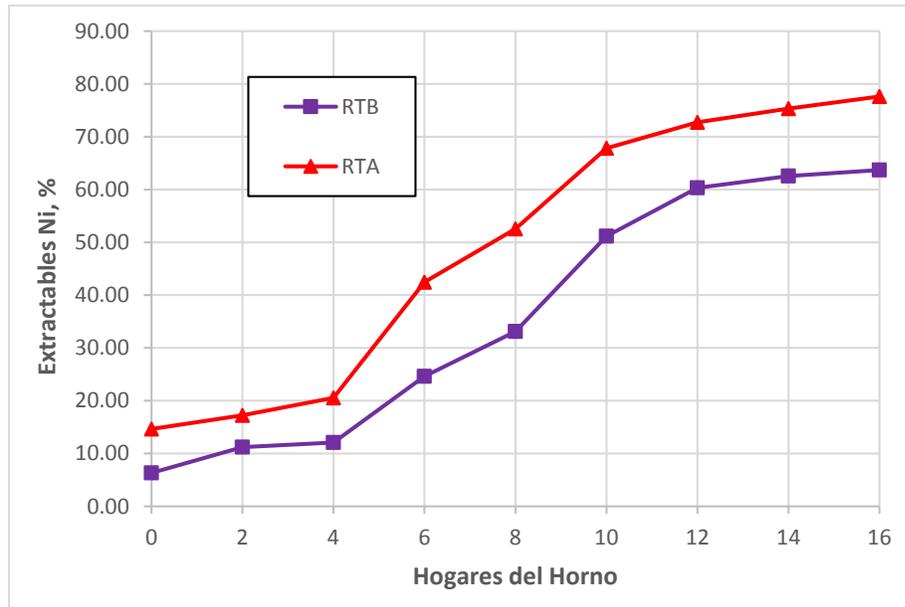


Figura 3.7. Comportamiento del extractable de níquel en el horno de reducción.

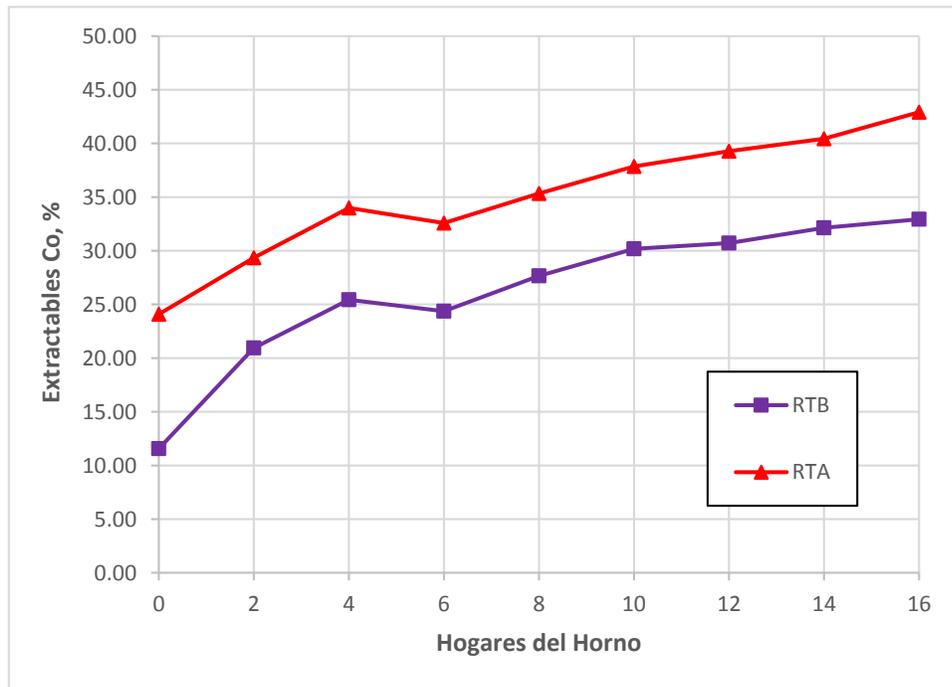


Figura 3.8. Comportamiento del extractable de cobalto en el horno de reducción.

Respecto a los extractables de Co (figura 3.8), se observa que el comportamiento que presentó en los diferentes regímenes de trabajo fue irregular, resaltando el efecto negativo que ejerce la introducción del aire de postcombustión en el H-6 (Angulo et al., 2022) al disminuir las extracciones de Co y la tendencia de la velocidad de reacción.

La comparación de los extractables de Co en los regímenes RTA y RTB muestra un comportamiento similar al que presentó las extracciones del Ni, con una diferencia significativa promedio de 8,88% en los diferentes hogares del horno. Las extracciones finales que se lograron en las condiciones de trabajo de los perfiles RTB y RTA fueron de 32,93 y 42,91% respectivamente.

### 3.5 Valoración económica

La valoración económica se realizó a partir de los resultados que se obtuvieron en el epígrafe 3.4.

En la tabla 3.5 se presentan los resultados de la valoración económica. Para su determinación se utilizaron los datos reportados en el epígrafe 2.6.

Tabla 3.5. Estimación económica

Variables	Condiciones de Operación	
	RTB	RTA
$t_{Ni\text{ al.}} (t/a)$	32 501	
$t_{Co\text{ al.}} (t/a)$	3 827	
Consumo de Petróleo (t/a)	220 825	236 923
Costo de Petróleo (M USD/a)	147,51	158,26
$t_{Ni\text{ p.}} (t/a)$	14 490	17 659
$t_{Co\text{ p.}} (t/a)$	882	1 150
Ingresos (M USD/a)	266,17	347,90
Diferencia Ingresos (M USD/a)	-	<b>81,73</b>

<sup>1</sup>M USD/a: millones de USD/a

El análisis económico preliminar indica que resulta más factible utilizar el RTA para reducir la mena laterítica con alta complejidad mineralógica debido a que por concepto

de incremento de los extractables de Ni y Co, se pueden ingresar más de 81 millones de USD/a.

### **3.6 Conclusiones parciales del Capítulo III**

- La mena laterítica que se evaluó se caracterizó por presentar un complejo comportamiento mineralógico y una disminución de su calidad en función de sus porcentajes de níquel.
- El proceso de tostación-reducción selectiva de la mena laterítica con alta complejidad mineralógica fue adecuado, mostrando como regularidad el incremento de los porcentajes del Ni, Co, Fe, S y C.
- Los extractables de Ni y Co fueron inferiores a 78 y 41% respectivamente, siendo más adecuado el uso del régimen térmico alto durante el proceso de tostación/reducción selectiva.



# CONCLUSIONES

---

## CONCLUSIONES

1. La mena laterítica que se utilizó en la investigación se caracterizó por un complejo comportamiento mineralógico con predominio de las fases de los óxidos y oxihidróxidos de minerales de hierro y aluminio mezclados con reflejos intensos de serpentinas, descrita granulométricamente por los modelos Rosin–Rammler y la función Swebrec con errores residuales inferiores a 1,95 y coeficientes de determinación superiores a 0,9850; mientras que el mineral reducido mostró regularidades de un proceso adecuado con predominio de las fases mineralógicas de la magnetita, la maghemita y la fayalita y valores de Ni, Co, Fe, S y C total que incrementaron sus porcentajes en los rangos promedios de 0,22%, 0,01%, 7,46%, 0,45% y 0,45% respectivamente.
2. Los extractables de níquel y cobalto característicos de la mena laterítica con alta complejidad mineralógica, luego del proceso de reducción-lixiviación, oscilaron en los rangos de 73-78% y 33-41% respectivamente.
3. La valoración económica mostró que resulta más beneficioso la utilización del régimen térmico alto para procesar las menas lateríticas con alta complejidad mineralógica ya que se logra un incremento de las utilidades de la empresa de 81,73 millones de USD/a.



# RECOMENDACIONES

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar a escala piloto el efecto que tiene la alimentación de la mena laterítica con alta complejidad mineralógica en los procesos de lixiviación y sedimentación de la tecnología carbonato-amoniaco.
2. Evaluar el efecto que tiene el incremento de los porcentajes de las fases mineralógicas arcillosas en forma de talco en los principales indicadores técnico-económicos del proceso Caron.



# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDANA-SÁNCHEZ, E., et al. 2003: *Corrida en Planta Piloto para evaluación de las condiciones de procesamiento del mineral de la Empresa "Ernesto Che Guevara". Etapa 02: Estudio de la clasificación húmeda a una muestra de 120 toneladas de mineral.* Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- ALDANA-SÁNCHEZ, E., et al. 1997: *Resumen del Informe Final de Investigaciones sobre el procesamiento de los minerales del yacimiento Cupey en las instalaciones del CIL.* Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- ALDANA-SÁNCHEZ, E., et al. 1996: *Corrida experimental a escala de planta piloto de la muestra tecnológica N°1 del mineral de "Las Camariocas".* Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- AL-KHIRBASH, S. A. 2020: Mineralogical characterization of low-grade nickel laterites from the North Oman Mountains: Using mineral liberation analyses–Scanning electron microscopy-based automated quantitative mineralogy. *Ore Geology Reviews*, 120: 103429. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103429>.
- ANGULO-PALMA, Hugo Javier, et al. 2022: Post-combustion Effect on Nickel and Cobalt Extractions from the Caron Process. In: Bindhu V., R. S. Tavares J.M., Ţălu Ş. (eds) *Proceedings of Fourth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology.* Springer, Singapore, 515-527. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43).

- ANGULO-PALMA, Hugo Javier; et al. 2021: Modelos para determinar variables importantes en el proceso caron. Parte I: consumo específico de energía en molienda. *Opuntia Brava*, 13(3): 149-157.
- ANGULO-PALMA, Hugo Javier; et al. 2020a: Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Sinergia Académica*, 3(2): 22-31.
- ANGULO-PALMA, Hugo Javier; et al. 2020b: Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo. *Tecnología Química*, 40(1): 91-101.
- ANGULO-PALMA, Hugo Javier. 2018: *Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en los procesos de reducción y molienda de lateritas*. Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Ingeniería de Procesos Químicos. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía.
- ANGULO-PALMA, et al. 2018: Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en el proceso de reducción de lateritas. *Tecnología Química*, 38(3), 613-625.
- ANGULO-PALMA, Hugo Javier; et al. 2017: Análisis especiales en un horno de reducción de níquel a escala de Planta Piloto. *Tecnología Química*, 37(3): 445-460.
- CABRERA, G. et al. 2011: Different strategies for recovering metals from Caron process residue. *Journal of Hazardous Materials*, 189, 836–842. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.048>.
- CANTERFORD, J. 1983: Oxide Ores of Nickel—The Australian Situation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1(1-2): 85-109. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/08827508308952590>.
-

- CHANG-CARDONA, A. R., & ROJAS-VARGAS, A. 2014: Comportamiento electroquímico del Fe y sus iones durante la lixiviación estándar QT de minerales reducidos en el proceso "Caron" con diferentes aireaciones. *Tecnología Química*, 34(2), 117-127.
- CHANG-CARDONA, A. R., & ROJAS-VARGAS, A. 2013: Optimización del flujo de aire específico para la lixiviación estándar QT del mineral reducido en el proceso Caron. *Minería y Geología*, 29(1), 1-16.
- CHANG-CARDONA, A. R. et al. 2014: Influencia sobre el extractable de níquel de los minerales oxidados del yacimiento Punta Gorda. *Minería y Geología*, 30(4), 70-88.
- CHANG-CARDONA, A. R. et al. 2006: Modelos multivariantes para predecir el extractable de níquel por la composición química de la mena tecnológica en el proceso Caron. *Minería & Geología*, 22(2), 1-29.
- CHANG-CARDONA, A. R. et al. 2005: Modelos multivariantes para predecir el extractable de níquel por la composición mineralógica de la mena tecnológica en el proceso Caron. *Minería & Geología*, 21(1), 32.
- CHANG-CARDONA, A. R. 2004: Tecnología carbonato-amoniacoal de menas lateríticas. Programa de Acreditación de Operadores de Planta. Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. "Antonio Núñez Jiménez": 1-10.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L. et al. 2019: Use of the Swebrec Function to Model Particle Size Distribution in an Industrial-Scale Ni-Co Ore Grinding Circuit. *Metals*, 9(8), 882. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/met9080882>.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L. 2015: Procedimiento para la determinación de la carga circulante en circuitos cerrados de trituración y molienda. *Minería y Geología*, 31(2), 66-79.
-

- DE ALVARENGA OLIVEIRA, V. et al. 2019: Assessing the influence of NaCl on the reduction of a siliceous laterite nickel ore under Caron process conditions. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(3), 1309-1321. doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01552-w>.
- DE GRAAF, J. 1979: The treatment of lateritic nickel ores—A further study of the Caron process and other possible improvements. Part I. Effect of reduction conditions. *Hydrometallurgy*, 5(1), 47-65.
- DÍAZ-BELLO, S. C. 2016: *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. Doctorado en Ingeniería- Ciencia y Tecnología de los Materiales. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57494/35261639.2016.pdf?sequence=1>.
- DOMÈNECH, C., et al. 2017: Reactive transport model of the formation of oxide-type Ni-laterite profiles (Punta Gorda, Moa Bay, Cuba). *Mineralium Deposita*, 52(7), 993-1010. doi: <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0713-0>.
- FERNÁNDEZ-PERICHE, Francisco. 2008: *Aproximación funcional mediante redes de funciones de base radial, una alternativa para la predicción en el proceso de reducción de mineral de la tecnología Caron de producción de níquel*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática Universidad de Granada, Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadoras.
- FU, W., et al. 2018: Garnierite mineralization from a serpentinite-derived lateritic regolith, Sulawesi Island, Indonesia: Mineralogy, geochemistry and link to hydrologic flow regime. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, 240-256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.01.022>.

- GLEESON, S. A. et al. 2003: Nickel laterites: a review. *SEG Discovery*, (54), 1-18. doi: <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2003-54.fea>.
- GUILLÉN-PERALES, Alberto. 2007: *Diseño de Sistemas Inteligentes en Plataformas de Computo Paralelas*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática Universidad de Granada, Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadoras.
- HENDRICUS-CARON, M. 1924: Process of recovering values from nickel and cobalt-nickel ores. U.S. Patent No. 1,487,145.
- HENDRICUS-CARON, M. 1950: Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores. *JOM-Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2, 67-90. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03398981>.
- ILYAS, S., et al. 2020: Extraction of nickel and cobalt from a laterite ore using the carbothermic reduction roasting-ammoniacal leaching process. *Separation and Purification Technology*, 232: 115971. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115971>.
- ITO, A., et al. 2021: Geochemical constraints on the mobilization of Ni and critical metals in laterite deposits, Sulawesi, Indonesia: A mass-balance approach. *Resource Geology*, 71, 255-282. doi: <https://doi.org/10.1111/rge.12266>.
- KAWAHARA M, et al. 1988: Reducibility of laterite ores. *Metall Trans B*, 19(2):181–186.
- LEGRÁ-LEGRÁ, A., 2017: *Proyecto 600193 Sustitución de petróleo aditivo por carbón bituminoso. Etapa 05 Evaluación a escala piloto*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.

- LEGRÁ-LEGRÁ, A. & LAMORÚ-URGUPELLÉS, A. 2016: *Evaluación integral del mineral alimentar en la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara en el 2016*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- LEGRÁ-LEGRÁ, A. 2015: *Evaluación del comportamiento durante el proceso de reducción y lixiviación de los minerales del yacimiento Camarioca Este*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- LEGRÁ-LEGRÁ, A. 2014: *Evaluación del comportamiento durante el proceso de reducción y lixiviación de los minerales a procesar por la ECG en el año 2014*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- LEGRÁ-LEGRÁ, A & RODRÍGUEZ-VIAMONTE, K. 2012: *Evaluación del comportamiento durante el proceso de reducción y lixiviación de los minerales a procesar por la ECG en el año 2012*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- LEGRÁ-LEGRÁ, A. 2008: *Evaluación de la reductibilidad y el comportamiento de la lixiviación de los minerales del yacimiento Yagrumaje Oeste*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- LEGRÁ-LEGRÁ, A. 2007: *Evaluación de la reductibilidad y el comportamiento en la lixiviación de nuevos yacimientos de los minerales de Punta Gorda (Minerales Especiales)*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
-

- MERIÑO-CESAR, L. 2010: *Disponibilidad de cámaras en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa Ernesto Guevara*. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- MESTRE-MESTRE, C. M. 2010: *Impacto del beneficio de la mena en los procesos de molienda y hornos de reducción de la Empresa Comandante Ernesto Guevara*. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- MIRANDA, J. L. 2014: Breve historia del surgimiento de la tecnología hidrometalúrgica del proceso de lixiviación carbonato-amoniaco del Ni y Co. *Tecnología Química*, 34(3), 262-265.
- MITTERECKER, J., et al. 2022: Electrochemical investigation of lateritic ore leaching solutions for Ni and Co ions extraction. *Metals*, 12(2), 325. doi: <https://doi.org/10.3390/met12020325>.
- MONTERO-GÓNGORA, D. 2016: *Modelación de la postcombustión en un horno de múltiples hogares utilizando redes neuronales artificiales*. Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- NAMINDO-NAMINDO, M. 2015: *Cinética de la molienda del carbón bituminoso*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

- O'CONNOR, F. et al. 2006: Reduction roasting of limonite ores: effect of dehydroxylation. *International Journal of Mineral Processing*, 80(2-4), 88-99. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2004.05.003>.
- OXLEY, A., & BARCZA, N. 2013: Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 54, 2-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.012>.
- PÉREZ-MELO, N. C. 2009: *Etapas 04 Procesamiento tecnológico a escala de banco. Proyecto 600108 Estudio geoquímico y mineralógico del depósito de lateritas níquelíferas Yagrumaje Norte, Oeste y Sur. Implicaciones en el proceso de extracción y procesamiento de las menas.* Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Moa, Holguín-Cuba.
- PICKLES, C. A., & ANTHONY, W. 2018a: A Thermodynamic Study of the Reduction of a Limonitic Laterite Ore by Methane. *High Temp. Mater. Proc.* doi: <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0106>.
- PICKLES, C. A., & ANTHONY, W. 2018b: Thermodynamic modelling of the reduction of a saprolitic laterite ore by methane. *Minerals Engineering*, 120, 47-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.006>.
- PICKLES, C. A., & ELLIOTT, R. 2015: Thermodynamic analysis of selective reduction of nickeliferous limonitic laterite ore by carbon monoxide. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min Metall. C)* 124(4), 208-216. doi: 10.1179/1743285515Y.0000000009.

- PICKLES, C. A., et al. 2014: Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*, 65, 33-40. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.006>.
- PINTOWANTORO, S., et al. 2021: Sodium thiosulfate and natural sulfur: novel potential additives for selective reduction of limonitic laterite ore. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(2), 481-494. doi: <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00352-4>.
- PUTZOLU, F. et al. 2018: Mineralogical association and Ni-Co deportment in the Wingellina oxide-type laterite deposit (Western Australia). *Ore Geology Reviews*, 97, 21-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.05.005>.
- REDDY, B. et al. 1995: Correlation of nickel extraction with iron reduction in oxidic nickel ore by a thermogravimetric method. *Thermochimica acta*, 264, 185-192. doi: [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02380-K](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02380-K).
- RHAMDHANI, M. A., et al. 2009: *Advances in research on nickel production through the Caron process*. Paper presented at the Proceedings of EMC, 1-16.
- RIVAS-ROMERO, S. 2017: *Evaluar a escala piloto el comportamiento durante el proceso de reducción y lixiviación de una mezcla de los minerales de los yacimientos Camarioca Este, Punta Gorda, Yagrumaje Norte y Yagrumaje Sur*. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Moa, Holguín-Cuba.
- RODRÍGUEZ-REYES, Yoandry. 2008: *Influencia de la Homogenización del Mineral en el Proceso de Reducción*. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

ROJAS-VARGAS, A., et al. 2019: Lixiviación carbonato amoniaca: estimación del níquel disuelto en el efluente de destilación. *Revista de metalurgia*, 55(3), e149-e149. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.149>

SARIOL-LÓPEZ, E., et al. 2011: Procedimiento para estabilizar la calidad del mineral que se suministra al proceso metalúrgico en la planta niquelífera Pedro Soto Alba, MOANICKEL SA. *IV Congreso Cubano de Minería, V Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas*. ISBN: 978-959-7117-30-8.

SHOUBAO, L., et al. 1999: *Study of nickeliferous laterite reduction*. A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master Engineering. University of Science and Technology, Beijing.

TITTLE BASULTO, Leonardo. 2018: *Evaluación de la sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita como aditivo en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``, Facultad de Metalurgia y Electromecánica

TOIRAC-LEYVA, V., & ROJAS-PURÓN, A. 2021: Caracterización mineralógica de perfiles lateríticos del sector 048 en el yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. *Ciencia & Futuro*, 11(4), 23-37.

TUPAZ, C. A. J., et al. 2020: Ni-Co Mineralization in the Intex Laterite Deposit, Mindoro, Philippines. *Minerals*, 10(7), 579. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/min10070579>.

UTIGARD, T. & BERGMAN, R. 1993: Gaseous reduction of laterite ores. *Metallurgical transactions B*, 24(2), 271-275. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02659129>.

VALIX, M. & CHEUNG, W. 2002: Effect of sulfur on the mineral phases of laterite ores at high temperature reduction. *Minerals Engineering* 15, 523–530. doi: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00069-9).

ZEVGOLIS, E. N., & DASKALAKIS, K. A. 2022: The Nickel Production Methods from Laterites and the Greek Ferronickel Production among Them. *Materials Proceedings*, 5(1), 104. doi: <https://doi.org/10.3390/materproc202100510>.



# ANEXOS

## ANEXOS

### ANEXO A. Características del petróleo tecnológico

Tabla A1. Características del petróleo tecnológico utilizado

Índice	Unidad	Método analítico	Especificación contratada	Certificación laboratorio químico ECG
Visc. a 50 °C	CSTOK	D-445	450 Máx.	680,76
Visc. a 80 °C	CSTOK		69 Máx.	113,36
Densidad API		D-1298	10,5 Mín.	13,66
Pto. Inflamación	°C	D-93	65 Mín.	68,00
Agua	%	D-95	1 Máx.	0,54
Azufre	%	D-197	3,5 Máx.	2,90
Valor Calórico	kcal/kg	D-4698	9 600 Mín.	10 204,79
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	-	0,9846 Máx.	970,00

Tabla A2. Características del licor carbonato-amoniaco fuerte

Compuestos	% másico	Propiedades	Unidad	Rango
NH <sub>3</sub>	13,0-14,0	Temperatura	°C	30,0-40,0
CO <sub>2</sub>	6,0-7,0	pH	-	8,0-9,0
H <sub>2</sub> O	79,0-81,0	Viscosidad	cP	~1,0-1,1

Tabla A3. Perfil térmico alto utilizado en la investigación

Estadígrafo	Flujo de Mineral t/h	Temperatura; °C						Aditivo Reductor, %
		H-0	H-6	H-13	H-15	Cámara A	Cámara B	
1	0,750	244	732	747	775	1 400	1 396	2,57
2	0,750	243	733	745	773	1 392	1 384	2,66
3	0,749	235	735	750	776	1 385	1 390	2,57
4	0,75	243	734	749	777	1 378	1 387	2,49
5	0,748	253	732	747	778	1 388	1 383	2,48
6	0,750	237	731	745	776	1 385	1 394	2,62
7	0,748	256	730	751	777	1 383	1 381	2,65
8	0,746	259	732	743	778	1 386	1 386	2,49
9	0,749	243	733	744	777	1 379	1 393	2,39
10	0,750	245	730	744	775	1 399	1 392	2,52
Promedio	0,749	246	732	747	776	1388	1 389	2,54
Máximo	0,750	259	735	751	778	1 400	1 396	2,66
Mínimo	0,746	235	730	743	773	1 378	1 381	2,39
Desv. Est.	0,001	7,829	1,619	2,759	1,549	7,502	5,125	0,086

Tabla A4. Perfil térmico bajo utilizado en la investigación

Estadígrafo	Flujo de Mineral t/h	Temperatura; °C						Aditivo Reductor, %
		H-0	H-6	H-13	H-15	Cámara A	Cámara B	
1	0,750	232	732	709	733	1 393	1 383	2,47
2	0,749	217	728	713	732	1 385	1 390	2,55
3	0,750	240	732	709	733	1 390	1 398	2,46
4	0,750	232	736	706	738	1 383	1 395	2,52
5	0,750	242	730	712	738	1 399	1 385	2,56
6	0,748	241	729	711	738	1 389	1 396	2,60
7	0,749	237	730	708	737	1 381	1 380	2,49
8	0,751	237	732	706	731	1 396	1 385	2,53
9	0,747	239	731	702	739	1 391	1 393	2,54
10	0,748	231	733	711	734	1 392	1 387	2,59
Promedio	0,749	235	731	709	735	1 390	1 389	2,53
Máximo	0,751	242	736	713	739	1 399	1 398	2,60
Mínimo	0,747	217	728	702	731	1 381	1 380	2,46
Desv. Est.	0,001	7,391	2,263	3,335	2,983	5,646	6,106	0,047

## ANEXO B. Caracterización químico-granulométrica de la mena que se alimentó al horno piloto

Tabla B1. Composición química y granulométrica de la mena que se alimentó al horno

Estadígrafos	Mineral entrada al Horno HR-1, %									Granulometría, %		
	Ni	Co	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	H <sub>2</sub> O	S	C	0,150	-0,074	-0,044
1	1,08	0,130	38,27	8,40	5,80	4,55	2,60	0,22	0,10	1,00	84,27	77,60
2	1,09	0,124	39,40	7,96	4,12	3,98	4,20	0,24	0,09	1,83	86,90	70,80
3	1,07	0,131	39,16	9,66	6,43	4,86	4,10	0,24	0,08	3,70	86,90	75,80
4	1,05	0,132	39,77	9,34	6,42	4,79	3,40	0,24	0,09	2,70	86,47	74,80
5	1,06	0,131	38,96	8,58	7,33	4,46	2,20	0,22	0,09	2,80	84,47	76,40
6	1,05	0,132	39,19	9,59	7,31	4,92	3,20	0,23	0,10	4,93	85,70	75,40
7	1,05	0,111	38,51	10,03	6,85	6,55	2,60	0,22	0,08	3,90	86,70	74,10
8	1,09	0,123	40,33	9,76	6,91	5,71	3,40	0,24	0,08	2,50	87,50	75,40
9	1,10	0,123	40,33	8,12	5,64	5,71	3,40	0,23	0,10	2,90	87,70	75,30
10	1,06	0,119	40,09	9,37	4,88	5,50	3,20	0,22	0,09	2,00	87,10	74,50
Promedio	1,07	0,126	39,40	9,08	6,17	5,10	3,23	0,23	0,09	2,83	86,37	75,01
Máximo	1,10	0,132	40,33	10,03	7,33	6,55	4,20	0,24	0,10	4,93	87,70	77,60
Mínimo	1,05	0,111	38,27	7,96	4,12	3,98	2,20	0,22	0,08	1,00	84,27	70,80
Desv. Est.	0,02	0,01	0,72	0,75	1,06	0,76	0,64	0,01	0,01	1,13	1,19	1,78

## ANEXO C. Caracterización químico-física del mineral reducido

Tabla C1. Características químico-físicas del mineral reducido

Estadígrafos	Características Químicas HR-3, %									$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	FM (%)
	Ni <sub>total</sub>	Co <sub>total</sub>	Fe <sub>total</sub>	Ni°	Fe°	FeO	Fe <sup>2+</sup>	S	C		
1	1,29	0,144	46,43	0,93	2,37	22,96	29,53	0,69	0,40	4,21	67,74
2	1,30	0,135	46,59	0,86	1,97	22,85	29,32	0,67	0,65	4,28	59,65
3	1,31	0,127	46,45	1,01	1,87	23,96	28,50	0,67	0,65	3,28	62,41
4	1,31	0,136	46,40	1,05	1,92	23,24	27,93	0,69	0,50	3,97	55,47
5	1,27	0,135	46,89	1,01	1,75	22,07	28,04	0,68	0,49	3,96	62,23
6	1,26	0,147	46,97	0,97	1,66	21,43	25,11	0,67	0,55	4,16	60,83
7	1,27	0,133	44,57	0,92	1,69	22,83	31,83	0,67	0,60	4,47	65,76
8	1,28	0,140	48,46	1,03	1,66	23,64	26,31	0,69	0,60	5,42	69,09
9	1,32	0,142	48,97	0,95	1,43	18,33	27,45	0,67	0,44	4,37	69,46
10	1,29	0,142	46,83	0,90	1,55	23,59	27,67	0,69	0,48	4,56	68,66
Promedio	1,29	0,138	46,86	0,96	1,79	22,49	28,17	0,68	0,54	4,27	64,13
Máximo	1,32	0,147	48,97	1,05	2,37	23,96	31,83	0,69	0,65	5,42	69,46
Mínimo	1,26	0,127	44,57	0,86	1,43	18,33	25,11	0,67	0,40	3,28	55,47
Desv. Est.	0,02	0,010	1,20	0,06	0,26	1,64	1,84	0,01	0,09	0,54	4,73

## ANEXO D. Extractables del níquel y cobalto y características del mineral reducido y lixiviado

Tabla D1. Composición química del mineral reducido y lixiviado

Estadígrafos	Mineral Reducido y Lixiviado				
	Ni	Co	Fe	Extractables, %	
				Ni	Co
1	0,29	0,092	46,60	77,08	38,07
2	0,29	0,096	45,89	76,73	34,37
3	0,30	0,092	45,96	75,96	37,20
4	0,33	0,098	46,09	73,63	33,30
5	0,33	0,093	46,05	73,61	36,65
6	0,29	0,090	46,00	76,79	38,62
7	0,33	0,088	46,78	74,02	40,99
8	0,35	0,091	48,04	73,17	40,58
9	0,28	0,093	46,29	77,73	36,97
10	0,32	0,088	45,66	74,19	39,54
Promedio	0,31	0,092	46,34	75,29	37,63
Máximo	0,35	0,098	48,04	77,73	40,99
Mínimo	0,28	0,088	45,66	73,17	33,30
Desv. Est.	0,02	0,00	0,69	1,72	2,49