



**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR  
UNIVERSIDAD DE MOA Dr. Antonio Núñez Jiménez**

**TESIS EN OPCION AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y  
MATERIALES**

**Título del trabajo:** Obtención de FeCrNi a partir de materias primas residuales de la región de Moa.

**Autor:** Yosnelvis Borrero Rueda

**Tutores:**

Dr.C José Alberto Pons Herrera

M.Sc. Hugo Javier Angulo Palma

Dr.C María caridad Ramírez Pérez

Moa, 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

- Primeramente quiero agradecer a Dios por darme las fuerzas, la energía y sabiduría para llegar a vencer esta gran batalla.
- También agradezco a todos mis familiares y amigos que hicieron posible esta victoria.
- Muchas gracias a todos mis profesores que con su gran esfuerzo contribuyeron al desarrollo de mi formación profesional, especialmente a mis tutores por su guía y colaboración.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta investigación a toda mi familia, especialmente a mis hijos, esposa, padres y hermanos en Cristo.

## RESUMEN

Este trabajo de tesis tiene como objetivo, la obtención de FeCrNi, a partir de materias primas localizadas en la región de Moa. Fueron utilizadas materiales principales contenedores de los metales principales, escombros lateríticos, colas de la tecnología CARON en Moa, cromitas de las antiguas minas de Merceditas, Amores y Cayo Guam, así como fundente (cieno carbonatado) y reductores sólidos (carbón antracita y carbón bituminoso), las cuales fueron caracterizadas, y procesadas a escala de laboratorio y de banco empleando un proceso de fusión reducción, empleando un horno de corriente directa instalado en el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), perteneciente a la Universidad Central Martha Abreu de las Villas (UCLV). Esta investigación es parte del proyecto sectorial, PS104HO001-015, “Obtención de FeCrNi a partir de materias primas de la región de Moa”, el cual financió todas las etapas de este trabajo. Se desarrollaron varias colas con diferentes proporciones de mezclas metalúrgicas, obteniéndose por primera vez en Cuba, una ferroaleación a partir de residuos de las industrias del níquel y el cromo en Moa, con vistas a la obtención futura de materiales de carga para la producción de aceros en Cuba, lo que garantizaría además la reducción de la contaminación ambiental que actualmente generan estos residuales a la región de Moa.

**Palabras Claves:** FeCrNi, Colas proceso CARON, Cromitas, Escombros lateríticos, Fundente, Reductores.

## **ABSTRACT**

This thesis work aims to obtain FeCrNi, from raw materials located in the Moa region. Main materials containing the main metals were used, lateritic rubble, tailings from the CARON technology in Moa, chromites from the old mines of Merceditas, Amores and Cayo Guam, as well as flux (carbonated silt) and solid reducers (anthracite coal and bituminous coal), which were characterized, and processed on a laboratory and bench scale bench using a reduction melting process, using a direct current furnace installed at the Welding Research Center (CIS), belonging to the Martha Abreu de las Villas Central University (UCLV). This research is part of the sectoral project, PS104HO001-015, "Obtaining FeCrNi from raw materials in the Moa region", which financed all stages of this work. Several glues with different proportions of metallurgical mixtures were developed, obtaining for the first time in Cuba, a ferroalloy from waste from the nickel and chromium industries in Moa, with a view to obtaining loading materials for the production of steels in Cuba, which would also guarantee the reduction of the environmental pollution currently generated by these wastes in the Moa region.

**Keywords:** FeCrNi, CARON process Residual, Chromites, Lateritic residual, Flux, Reducers.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE FIGURAS .....	IX
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS .....	X
INTRODUCCIÓN.....	1
Situación problemática .....	1
Problema científico.....	2
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos.....	2
Objeto de estudio .....	3
Campo de investigación .....	3
Hipótesis .....	3
Materias primas empleadas en la investigación .....	3
Infraestructura para el desarrollo de la investigación.....	3
Aportes de la investigación .....	4
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN .....	5
1.1 Principales materias primas siderúrgicas para la producción de FeCrNi .....	5
1.1.1 Cromitas de la región Moa-Baracoa.....	5
1.1.2 Escombros lateríticos.....	5
1.1.3 Colas residuales del proceso Caron en Cuba.....	9
1.2 Aleaciones de FeCrNi .....	11
1.3 Fundentes .....	13
1.4 Reductores .....	14
1.5 Conclusiones capítulo I.....	15

CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	17
2.1 Principales métodos de investigación empleados .....	17
2.2 Metodología de investigación utilizadas .....	18
2.2.1 Metodología para la selección y preparación de muestras experimentales ....	18
2.2.2 Metodología para la conformación de mezclas metalúrgicas.....	20
2.2.2.1 Técnicas analíticas empleadas .....	21
2.2.2.2 Análisis de los metales obtenidos .....	23
2.3 Diseño experimental empleado.....	24
2.4 Pruebas de fusión reductora .....	25
2.5 Procesamiento de las informaciones .....	26
2.6 Conclusiones capítulo II .....	27
CAPÍTULO III. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	28
3.1 Resultados de la caracterización química de las mezclas metalúrgicas conformadas	28
3.1.1 Caracterización química de los reductores y fundente empleados en la	
investigación.....	29
3.2 Resultados experimentales los productos metalizados obtenidos.....	30
3.3 Transcendencia ambiental y social de los resultados obtenidos .....	32
3.4 Conclusiones capítulo III.....	32
CONCLUSIONES GENERALES .....	33
RECOMENDACIONES .....	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de variación (%) de las muestras principales de investigación. ....	24
Tabla 2. Matriz experimental empleada en las pruebas de fusión reductora.....	25
Tabla 3. Composición química (%) de las mezclas conformadas con los materiales principales (cromitas+escombros+colas). ....	28
Tabla 4. Composición química promedio (%) de los reductores empleados, antracita (A) y bituminoso (B).....	29
Tabla 5. Composición química promedio (%) del fundente empleado en la fusión reductora. ....	30
Tabla 6. Composición química (%) de los productos (FeCrNi) obtenidos .....	31



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las colas de las tecnologías CARON y HPAL para el desarrollo de este proyecto. Fuente: (Pons Herrera, Perdomo, & al, 2023). .....	10
Figura 2. Acomodo de los átomos de a) un elemento puro, b) una aleación de dos elementos y c) una aleación de alta entropía con seis elementos. Fuente: Adaptado de (Eißmann, Klöden, & Weißgärber, 2017). .....	12
Figura 3. Clasificación de las familias de las aleaciones de alta entropía. Fuente: Adaptado de (Changning & al, 2015). .....	13
Figura 4. Proceso de toma de muestras experimentales, (a- Cromitas, b- Colas; c- Cieno). 19	
Figura 5. Estufa utilizada para el secado de las muestras experimentales. ....	19
Figura 6. Triturador de mandíbula. ....	20
Figura 7. Cuarteadores utilizados para la preparación de las muestras. ....	20
Figura 8. Equipo de espectrometría de absorción atómica empleado en la caracterización química. Fuente: (CEDINIQ, 2024). ....	22
Figura 9. Equipo de difracción de Rayos X empleado en la caracterización mineralógica. Fuente: (CEDINIQ, 2024). ....	22
Figura 10. Espectrómetro de masa empleado en la caracterización química de los metales obtenidos. ....	23
Figura 11. Equipamiento utilizado en las pruebas de fusión reductora en el CIS de Villa Clara. ....	26
Figura 12. Horno de arco eléctrico empleado en las pruebas de fusión reductora. ....	26

## **ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS**

**CARON:** Tecnología de producción de níquel basada en la lixiviación carbonato amoniacal

**CA:** carbón antracita

**CB:** Carbón bituminoso

**FeCrNi:** Ferroaleación de cromo y níquel

**CIS:** Centro de Investigación de Soldadura

**UCLV:** Universidad Central Martha Abreu de las Villas

**ECG:** Empresa Che Guevara de Moa

## **INTRODUCCIÓN**

### **Situación problemática**

Este proyecto tesis pretende la obtención de ferroaleaciones de níquel y cromo (FeCrNi) en Moa, a partir de materias primas localizadas en esta zona del país. Las materias primas serán caracterizadas, y procesadas a escala de laboratorio y de banco empleando un proceso pirometalúrgico que permitirá la obtención de esta ferroaleación, utilizada para la producción de aceros inoxidable en Cuba.

El trabajo incluye el uso de diferentes tipos de reductores, para determinar la prefactibilidad de la tecnología propuesta. Se integran en este proyecto los especialistas e instalaciones de las Universidades y Empresas del Níquel en función de la diversificación de la producción de Níquel en Cuba.

La región de Moa posee importantes reservas de minerales cromitas y lateríticos. Esta última utilizada, principalmente, en las operaciones metalúrgicas de las dos tecnologías existentes, carbonato amoniacal basada en la lixiviación atmosférica, utilizada en la Empresa comandante Ernesto Che Guevara (ECG) y la tecnología de lixiviación ácida a alta presión, en la Empresa comandante Pedro Sotto Alba (PSA). “Existen perspectivas de producción de FeNi, utilizando mezclas de minerales lateríticos y serpentiniticos, lo que brindará la posibilidad de producir otras ferroaleaciones, tomando en cuenta la existencia de otros minerales importantes como las cromitas refractarias, con las cuales se han desarrollado estudios investigativos”, (Pons Herrera, 2022, p. 7).

A partir del tratamiento pirometalúrgico de las cromitas y lateritas se han obtenido semiproductos siderúrgicos, cuyas investigaciones demandan de una mayor profundidad científica, que permitan fundamentar la futura implementación de una planta metalúrgica para la obtención de ferroaleaciones en Moa.

Como resultado del trabajo conjunto de especialistas de la Universidad de las Villas y de Moa, se han desarrollado diversas investigaciones, con los minerales de esta región del país, destacan en este sentido la obtención de arrabio enriquecido con Níquel, llamado internacionalmente como Nickel Pig Iron (NPI), (Ortiz Barcenás, 2015), lupias de hierro, (Guerrero, 2013), oxidantes para el proceso de descarburización del acero HK-40, (Ramírez

Pérez, 2010), producto metalizado base hierro a partir de las colas rojas de Moa, (Pons Herrera, 2018), entre otros.

Durante el primer semestre del 2022 se desarrollaron pruebas preliminares empleando una tecnología de fusión reductora, con hornos de corriente directa y el uso de materias primas nacionales (muestras de colas de la producción de níquel), que permitieron obtener un producto metalizado con un promedio de 92% de Fe metálico y que constituye una motivación y justificación para el desarrollo de este proyecto, en función de garantizar un uso sostenible de los recursos minerales existentes en la región de Moa-Baracoa.

Por tanto, el objetivo principal de esta investigación es definir la tecnología más efectiva desde el punto de vista técnico-económico para la obtención de FeCrNi, que facilite la toma de decisiones sobre la futura producción de ferroaleaciones en Moa, con la sustitución parcial o total de esta materia prima siderúrgica para la producción de aceros en Cuba al utilizar materias primas nacionales que actualmente limitan el desarrollo de la economía circular en la industria cubana del níquel.

### **Problema científico**

¿Cómo obtener FeCrNi a partir de las materias primas residuales, existentes en la región de Moa?

### **Objetivo general**

Obtener FeCrNi, a partir de diferentes mezclas metalúrgicas, conformadas con materias primas residuales, existentes en la región de Moa.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar las materias primas (cromitas, colas y escombros lateríticos), así como las mezclas metalúrgicas a desarrollar, para la obtención de FeCrNi.
2. Definir y conformar las mezclas metalúrgicas para la obtención de FeCrNi a escala de laboratorio.
3. Evaluar el proceso de obtención de FeCrNi a partir del uso de las mezclas metalúrgicas propuestas.

## **Objeto de estudio**

Obtención de Ferrocromo-níquel

## **Campo de investigación**

Tecnología para la producción de FeCrNi, a partir de materias primas de la región de Moa.

## **Hipótesis**

Con el desarrollo de una tecnología basada en la fusión-reducción, a partir de diferentes mezclas metalúrgicas conformadas con diferentes materias primas residuales, existentes en la región de Moa, será posible obtener FeCrNi, de gran demanda en las empresas siderúrgicas cubanas.

## **Materias primas empleadas en la investigación**

- ✓ Cromitas refractarias de la región de Moa
- ✓ Escombros lateríticos diferenciados
- ✓ Colas de la tecnología CARON en Moa
- ✓ Carbón reductor (bituminoso y antracita)
- ✓ Fundente (cieno carbonatado)

## **Infraestructura para el desarrollo de la investigación**

El trabajo se desarrollará como parte del programa sectorial del Níquel PS104HO001-015. PSNi “Aprovechamiento integral de los recursos minerales en la Industria Cubana del Níquel” y financiado por el proyecto PS104HO001-015 “Obtención de FeCrNi a partir de materias primas de la región de Moa”.

Se desarrollará en las instalaciones de laboratorio del departamento de Metalurgia y Materiales de la UMoa, el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) y el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), perteneciente a la Universidad Central Martha Abreu de las Villas (UCLV).

## **Aportes de la investigación**

**Practico:** Se busca con esta tesis, investigar más a fondo las materias primas de la región de Moa, para conformar mezclas metalúrgicas que incluyan, reductor + colas + cromitas + escombros lateríticos + fundente, para la obtención de un producto metalizado (FeCrNi), para la producción de aceros en Cuba.

**Ambiental:** Por la parte ambiental se lograría reducir el impacto que provocan las materias primas a utilizar que todas constituyen residuales de los procesos de níquel y cromo en el municipio de Moa. a partir de un uso más sostenible de los recursos minerales en esta región del país.

**Social:** Formación y superación de nuevos técnicos y especialistas en el tratamiento y mezcla metalúrgicas de diferentes componentes, que incluyen: reductor + colas + cromitas + escombros + fundentes para la obtención de FeCrNi en Moa.

**Económico:** Desde el punto de vista económico tiene gran importancia ya que se quiere implementar el método de economía circular, reaprovechando residuos minero-metalúrgicos de la región de Moa, los cuales se pueden usar mezclándolos con otros productos que se tienen con igual concepto y lograr obtener como resultado una materia prima para la obtención de aceros en Cuba.

## **CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Principales materias primas siderúrgicas para la producción de FeCrNi**

En este epígrafe se describen los principales resultados de los trabajos investigativos desarrollado con las materias primas que contienen los elementos que conformaran las ferroaleaciones a obtener, en este caso, las cromitas, los escombros lateríticos y las colas de la producción de Níquel en Cuba.

#### **1.1.1 Cromitas de la región Moa-Baracoa**

A lo largo de la región del Caribe afloran rocas ultramáficas-máficas de afinidad ofiolítica. Estas rocas abundan en Cerro Colorado, Venezuela y Cuba, las cuales contienen cuerpos de cromitas, (Mendi, González, & et al, 2020). Otros autores, como, Hui-Chao Rui; Jing-Sui Yang y otros, (2021), concluyen que las composiciones de harzburgitas de Cuba, son altamente refractarias con  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.21–0.81% en peso) y  $\text{TiO}_2$  (~0.04% en peso) y muestran patrones de elementos de tierras raras (REE). Los olivinos tienen un tejido tipo E y una gama estrecha de composiciones ( $\text{Fo} = 90,6\text{--}91,6$ ).

Los cuerpos de cromitas de la región de Moa-Baracoa, principalmente, los yacimientos Merceditas y Amores, presentan geometría lenticular y están encajados en dunitas y harzburgitas, y contienen cuerpos tabulares de gabros pre-cromitita, dispuestos concordantemente con los lentes de cromitas. La presencia de cromitas y gabros es significativa en estas zonas, (Proenza Fernández, Gervilla, & al, 1998, p. 208). El autor reconoce que, estos depósitos son pobres en elementos del grupo del platino (EGP), siendo el Ru el más abundante.

Las variaciones composicionales del olivino y la cromita en las harzburgitas, dunitas y cromitas de la región de Moa-Baracoa, fueron estudiadas por Pons Herrera, (2000), quien las evaluó como material refractario en diferentes talleres de fundición de Cuba.

#### **1.1.2 Escombros lateríticos**

El tratamiento de minerales de baja ley y de residuales sólidos mineros constituye un desafío para la comunidad científica, teniendo en cuenta el impacto negativo que tiene la

acumulación de los mismos en los ecosistemas, (Govin Sanjudo, Ramírez Pérez, Pons Herrera, & al, 2022).

Los escombros lateríticos están formados por óxidos de hierro y además presentan níquel, cobalto, cromo y aluminio. Estos se consideran pasivos ambientales mineros y tienen un impacto negativo en el medio ambiente (Ramírez Pérez, Herrera, José, & Ortiz Barcenás, 2019). Estos residuales se sitúan en las cercanías de la propia mina y forman las conocidas escombreras las que, se estima, alcanzan volúmenes mayores de  $90 \times 10^6$  toneladas, (Palacios Rodríguez & García, 2014).

La búsqueda de alternativas que posibiliten la utilización de los escombros lateríticos cubanos en procesos tecnológicos, sin afectar la calidad de los productos, e intentando dar solución a problemas medioambientales, ha constituido objetivo de diversas investigaciones.

La obtención de concentrados de hierro para la producción de arrabio y acero a partir de los escombros de Pinares de Mayarí y mina Martí estuvo liderada en la década del 60 por el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), (Swardjo, 1969), tomando como referencia los estudios mineralógicos desarrollados por (Ostroumov, Rojas, & Sánchez, 1985), que confirmaron predominio de las fases goethita, hematita, magnetita, maghemita e hidrargilita, en correspondencia con los elevados contenidos de hierro y aluminio.

En relación a la característica granulométrica los escombros, se ha demostrado que están constituidos por partículas mayores de  $80 \mu\text{m}$ , es decir, en este horizonte entre el 40 y el 60 % de las partículas corresponden a las mayores de  $0,83 \text{ mm}$ , (Almaguer, 1995); (García, Samora, & Mojena, 1989). Es precisamente en estas fracciones donde se concentran los mayores contenidos de hierro y cromo.

En la búsqueda de otros métodos para separar y concentrar elementos metálicos del resto de los constituyentes del material, se utilizó el método de separación magnética, (Ramírez B. , 1994); (Durán & Angulo, 1994); (Ramírez M. , 2002). Los autores lograron concentrar al cobalto y al manganeso en la fracción  $-0,44 + 0,074 \text{ mm}$ , aplicando el análisis fraccional magnético.



Otros métodos de beneficio se han empleado en el tratamiento de estos desechos mineros para obtener concentrados metálicos; (Peña & Rubio, 1990) utilizaron un esquema de preparación mecánica que combinaba operaciones de trituración y cribado. En los productos obtenidos se alcanzaron contenidos de hierro entre 20 % y 50 %.

(García, Samora, & Mojena, 1989), aplicando la separación granulométrica de los escombros lateríticos de Pinares de Mayarí, identificaron dos fracciones, que por su composición química las consideraron: una, como materia prima metalúrgica y la otra, compuesta por las fracciones mayores de 0,83 mm y con contenido de hierro igual a 52 %, la denominaron materia prima siderúrgica. En ese mismo año, (Días & Mojena, 1989) concluyeron que la separación granulométrica se puede considerar el primer paso de cualquier proceso de beneficio para los escombros de Pinares de Mayarí.

La literatura recoge importantes resultados acerca de los métodos utilizados para establecer las regularidades físico-químicas y geológicas de los escombros lateríticos cubanos, como un aporte importante al conocimiento y a la fundamentación de las propuestas de uso industrial, especialmente para la industria cubana del acero.

Una caracterización físico – química más amplia de estos escombros, es realizada por (Ramírez & Pons, 2001), en la que los resultados del estudio granulométrico, mineralógico y químico, corroboran los obtenidos por (Ostroumov, Rojas, & Sánchez, 1985); (Almaguer & Zamarzry, 1993); (Durán & Angulo, 1994); (Pons & Hernández, Estudio de la posible utilización de la fracción gruesa (+2 mm) de escombros lateríticos en los procesos de fusión, 1997) entre otros, a partir de los cuales es posible establecer las principales regularidades de los escombros de la región de Moa:

Este horizonte laterítico está constituido principalmente por oxihidróxidos de hierro y aluminio, en correspondencia con la presencia mayoritaria de estos elementos.

- ✚ Las partículas mayores de 0,83 mm representan entre el 40 y el 60 % del total, en las que el contenido de hierro oscila entre 45 y 53 %.
- ✚ Mientras que en la fracción -0,4+0,074 mm predominan los minerales de manganeso.

Estas regularidades indican la posibilidad de estimar estos residuos, junto a otros de la región, materia prima siderúrgica. En tal sentido, (Ortiz J. , 1990) empleó los escombros lateríticos de Pinares de Mayarí en la obtención de concentrados de cromo e hierro a través de un proceso de tostación reductora, mientras que (Guerra & Bismaris, 1991); (Pons, Pando, & Sosa, 1995) realizaron un trabajo similar con los de Atlantic en Moa, para la recuperación de cromo y hierro y la producción de ferrocromo.

Los resultados de las investigaciones en este campo revelaron la posibilidad de utilizar los escombros lateríticos como oxidante del carbono en la elaboración de aleaciones ferrosas. (Ramírez P. M., 2010) demostró que las partículas mayores de 0,83 mm de los escombros de Zona A, Yacimiento Moa Occidental, pueden ser utilizadas como oxidantes en la descarburización del acero ACI HK-40 producido en un horno de arco eléctrico, sin necesidad de incluir una etapa de lavado en el esquema de preparación mecánica, lo que elevaría los costos de las operaciones del beneficio de esta materia prima. Se estableció, además, el procedimiento para la utilización a nivel industrial.

Los fundamentos termodinámicos y cinéticos de las transformaciones que experimenta el material cuando se expone a altas temperaturas e interactúan con el baño líquido, fueron expuestos por (López, Ramírez, Pons, López, & Alguacil, 2008) y (Ortiz B. J., 2015).

Por su parte, (Ortiz B. J., 2015) expone la factibilidad de utilizar los escombros de Pinares de Mayarí como materia prima para la obtención de arrabio con níquel (NPI), aprovechando los contenidos de Hierro y otros metales importantes para la industria siderúrgica, principalmente, Cromo; Níquel, Silicio y Manganeso, presentes en los escombros cubanos.

En la perspectiva de utilizar escombros lateríticos y minerales de baja ley para dar solución a la actual situación relacionada con la variabilidad de las menas procesadas hoy en día por la tecnología CARON, que genera comportamientos disímiles en cuánto a la eficiencia metalúrgica y operativa a escala comercial, (Véliz & Miranda, 2022) exponen los resultados de investigaciones que deben ser observados para resolver tales dificultades.

### 1.1.3 Colas residuales del proceso Caron en Cuba

La composición sustancial de las lateritas niquelíferas cubanas es compleja, pues presentan asociaciones mineralógicas diversas que varían entre los diferentes tipos genéticos y litológicos de menas en los yacimientos. Por otro lado, y de forma paralela, tuvo lugar también la gradual acumulación de residuales sólidos en depósitos artificiales, con peculiaridades mineralógicas específicas entre sus minerales constituyentes durante más de cuatro décadas de procesamiento industrial de extracción de (níquel + cobalto) de las menas lateríticas mediante la aplicación de las tecnologías CARON y HPAL, (Garcia & Giselle, 2013).

Con la apertura de las operaciones de la ECG, se inició el proceso de generación de residuales sólidos (colas), los que son depositados en presas de colas conteniendo aún una importante reserva de elementos valiosos, considerados “un yacimiento de baja ley de níquel (0,36 %) con un alto contenido de cobalto (0,08 %), contenido fundamentalmente en las asbolanas, máximo portador de manganeso” (García, Palacios, & al, 2013, p. 19). García Peña, et al, (2013), al estudiar estas colas lograron extraer el 72,78 % del cobalto, el 62,53 % del níquel y el 60,61% del manganeso empelando una lixiviación con ácido sulfúrico.

Ariza Borges, et al, (2004) desarrollan un estudio a escala de laboratorio para la aplicación del ácido oxálico, cítrico, tartárico, acético reactivo, en la lixiviación del níquel y cobalto presentes en las colas producidas por la lixiviación carbonato amoniacal del mineral laterítico, donde, los mejores resultados fueron usando ácido cítrico, con extracciones de Ni de 77,4 % y Co 82,2 % para el Co. Así como, extracciones apreciables de Mn, Mg y Fe, de 77,5 %; 75,3%; 65,7 %, respectivamente.

Penedo Medina, et al, (2009), evaluaron el comportamiento del Níquel y el Cobalto durante la lixiviación de las colas de la ECG, utilizando ácido piroleñoso y su combinación con ácido sulfúrico. Los resultados arrojaron extracciones de Ni (44,3 %) y Co (62,24 %), y una selectividad con ácido piroleñoso y la combinación con ácido sulfúrico, de 2,24 y 1,59, respectivamente.

Los óxidos de Fe maghemita y/o magnetita constituyen las fases minerales principales que componen las colas derivadas de los procesos tecnológicos en la ECG. “La formación de maghemita durante las etapas iniciales del proceso, inciden en la baja eficiencia de reducción de las fases ferrosas y baja recuperación del níquel, al quedar este metal retenido dentro de la estructura de la maghemita”, (Rojas Puron & Turro Breff, 2003, p. 27).

Por su parte, las colas de la tecnología HPAL, en Moa comenzó sus operaciones en el año 1960, por lo que la cantidad de colas rojas acumuladas en la región superan los 200.00 MMt, repartidas en varias presas. Para un mejor estudio de estas la hemos agrupado en 1 activas, dividida en dos secciones (Norte y Sur) y una pasiva a partir del año 1968, (Pons Herrera & Ramírez Pérez, 2022).

Para el desarrollo de este proyecto, las colas a utilizar para la obtención de FeCrNi, se clasificarán, según Pons Herrera, et al, (2023), en las colas negras Viejas y Nuevas de la tecnología CARON, y las colas rojas, viejas y nuevas de la tecnología HPAL, en Moa, según se muestra en la figura siguiente. Así, la mayoría de las investigaciones realizadas hasta el momento, con las colas de las tecnologías CARON y HPAL, han estado dirigidas, ver figura 1.



**Figura 1.** Clasificación de las colas de las tecnologías CARON y HPAL para el desarrollo de este proyecto. **Fuente:** (Pons Herrera, Perdomo, & al, 2023).

Cruz Crespo; Perdomo y Pons, (2023), demostraron la viabilidad en la obtención de arrabio aleado con Ni y Cr mediante la reducción carbotérmica en horno de arco de corriente continua de colas sin beneficiar de la producción de Ni en Nicaro, empleando carbón antracita como reductor, para la sustitución de chatarra en la obtención de aceros aleados.

Los autores comprobaron que, el recobrado de los elementos fue adecuado, principalmente, Ni y Cr como elementos de aleación, además que, los contenidos de Mn y Si en el arrabio son favorables para su empleo en la obtención de aceros aleados, ya que actúan como desoxidantes. Con vistas a mejorar las propiedades del acero a obtener, el S puede ser disminuido por aumento de la basicidad en la obtención del arrabio o por desulfuración directamente en el horno de aceración.

## 1.2 Aleaciones de FeCrNi

Las ferroaleaciones son de gran importancia para las plantas siderúrgicas, pues aportan elementos aleantes sin impurezas que puedan contaminar los baños metálicos. Estos materiales están definidos como sistemas con gran desorden molecular o atómico, o sea, entropía en aleaciones, significa que entre mayor es el número de elementos, mayor será la entropía. Cada elemento presenta diferentes propiedades físicas y químicas que inciden sobre la entropía de la aleación, (Ruiz-Esparza Rodríguez, Gamaliel Garay, & Martínez Sánchez, 2023). La figura 2 muestra una representación del acomodo de átomos en aleaciones múltiples.

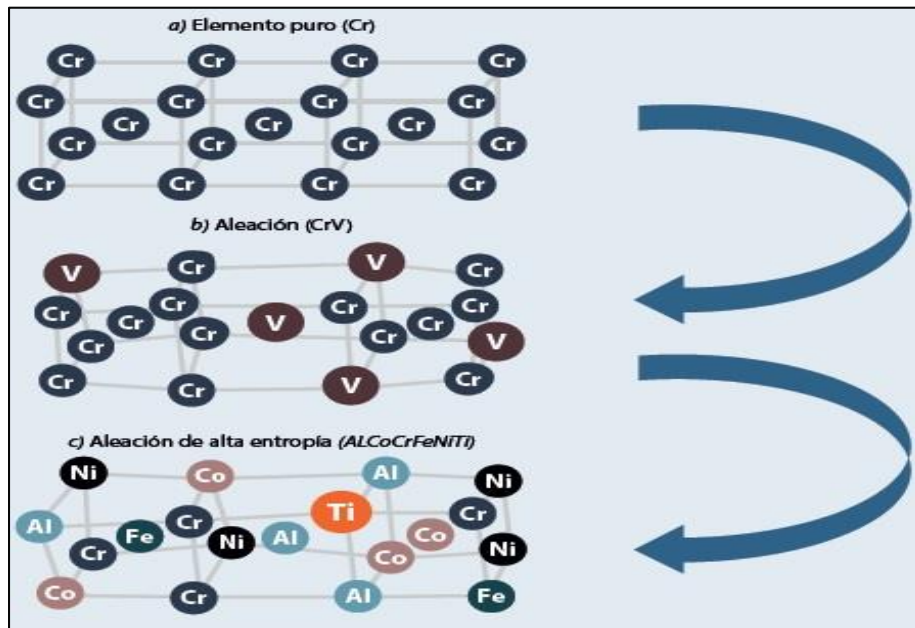
Las aleaciones de varios elementos, representan familias que corresponden a propiedades similares entre los elementos que la conforman, es decir, tamaño similar del átomo, estructura cristalina (forma en que se acomodan los átomos) y electronegatividad (afinidad de unirse por fuerzas de enlace con otros elementos), es por eso que se clasifican en las siguientes familias, de acuerdo con Changning et al. (2015):

- 1) **Ligeras**: este tipo de aleaciones utilizan principalmente elementos ligeros, entre los cuales están: Li, Be, Mg, Sc, Y, B, C, N, Si, Ge, Sn, Bi.
- 2) **De transición**: estas aleaciones se forman principalmente, por elementos de transición tales como el: Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Al, Ru, Pd, Ag, Au.

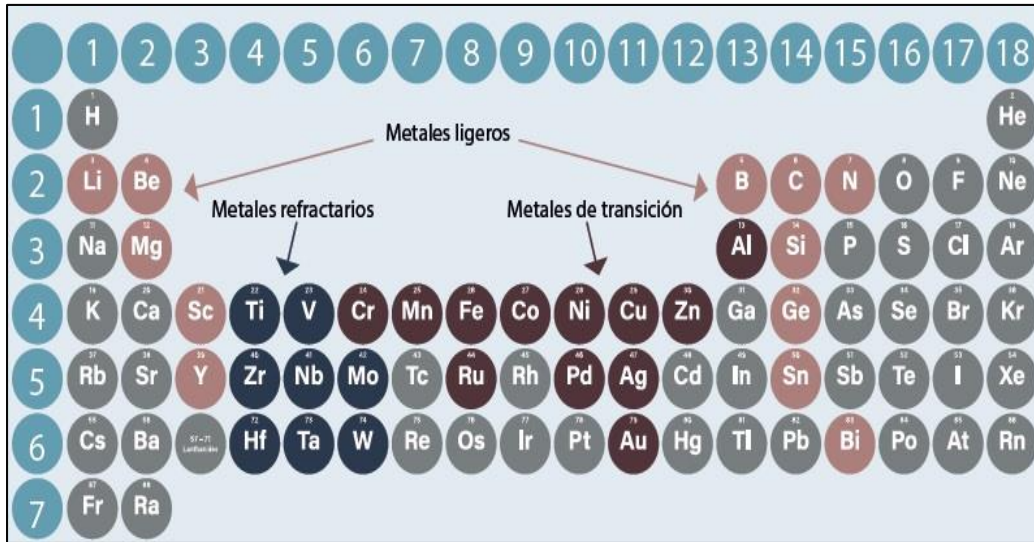
3) **Refractarias:** estas aleaciones se caracterizan por estar formadas principalmente por elementos con alto punto de fusión tales como: Ti, V, Zr, Nb Mo, Hf, Ta, W.

Una representación de estos tipos de aleaciones se muestra en la figura 3.

Las aleaciones de alta entropía, son muy utilizadas en las industrias aeroespacial, automotriz, de energías limpias y transporte, las cuales están en constante innovación, pues su demanda de crecimiento es proporcional a la cantidad de población que necesita un medio de transporte seguro y amigable con el medio ambiente, lo cual, demandan nuevos materiales que tengan alta resistencia a esfuerzos y que, a su vez, se mantengan ligeros para reducir el impacto ambiental en el consumo de combustibles fósiles, (Murty, Yeh, & al., 2019).



**Figura 2.** Acomodo de los átomos de a) un elemento puro, b) una aleación de dos elementos y c) una aleación de alta entropía con seis elementos. **Fuente:** Adaptado de (Eißmann, Klöden, & Weißgärber, 2017).



**Figura 3.** Clasificación de las familias de las aleaciones de alta entropía. **Fuente:**

**Adaptado de (Changning & al, 2015).**

Si bien el costo de fabricación de las aleaciones de alta entropía es mayor en comparación a la de las aleaciones comerciales comúnmente usadas; éstas pueden utilizarse para materiales especializados en la industria aeroespacial que requiere de materiales con una mayor resistencia a condiciones extremas, (Eißmann, Klöden, & Weißgärber, 2017).

### 1.3 Fundentes

Para optimizar el proceso de ferroaleaciones, principalmente, ferroníquel y ferrocromo-níquel, las escorias del proceso son controladas a través de la disminución de los puntos de fusión de los materiales adicionados. Entre estos, los más utilizados son los básicos, principalmente, CaO y MgO, (Formoso et al., 2010).

En aleaciones de Fe-Ni-Cr la adición del CaO provoca una disminución de la viscosidad de la escoria, mejorando el proceso cinético de reducción. (Yanhui Liu, Pingsheng Lai, Xuewei Lv, Chenguang Bai; 2016).

Zhang et al. (2016), analizaron el efecto del  $P_2O_5$  y CaO/SiO<sub>2</sub> en la viscosidad de las escorias. Demostraron que el incremento del contenido de  $P_2O_5$  aumenta la viscosidad de la escoria, debido a que  $P^{5+}$  actúa como formador de estructuras más complejas; mientras que al

aumentar la basicidad la viscosidad disminuye, con una relación crítica para controlar la viscosidad cuando  $\text{CaO/SiO}_2$  es inferior e igual a 1,5.

Liu et al. (2016), analiza la viabilidad de la producción de una aleación (Fe-Ni-Cr) de acero inoxidable mediante reducción directa por fundición. En el estudio evaluaron el efecto de los fundentes CaO, SiO<sub>2</sub> y MgO. Demostraron que la adición del CaO de 20 a 35% resulta en un aumento en las recuperaciones superiores a 7,48%. En el caso de la utilización del SiO<sub>2</sub>, se observa que mejora las recuperaciones de Fe y Ni, pero no favorece la recuperación de Cr debido a un aumento de CrO y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dentro de la escoria. La adición de MgO condujo al aumento de partículas sólidas y de la viscosidad efectiva; por lo que recomendaron eliminar la adición de minerales que contienen MgO durante la sinterización, debido a que no favorece la reducción cinética del sinterizado Fe-Ni-Cr.

Para mejorar el beneficio de níquel y hierro a partir de la mena de saprolita de bajo grado con 1,29% de Ni y 16,31% de Fe, Tian et al. (2020) adoptaron como medidas de refuerzo la co-reducción con mineral de laterita limonítica y la optimización de la basicidad. Identificaron que la adición de CaCO<sub>3</sub> puede disminuir significativamente la presión parcial de CO según sea necesario para mejorar la reducción de los silicatos.

Dave & Samvatsar (2023) analizaron la producción de piezas fundidas sonoras de aleación UNSN08120 (aleaciones de Fe-Ni-Cr) mediante fusión por inducción sin vacío mediante la adición de reactivos a base de calcio (CaC<sub>2</sub>, CaO y CaF<sub>2</sub>) y realizar un estudio comparativo. Demostraron que este método es eficaz para eliminar gases e impurezas no deseados de forma sencilla.

#### **1.4 Reductores**

Sommerfeld & Friedrich (2021) reconocen que los principales agentes reductores que se utilizan en la producción de ferroaleaciones son los diferentes tipos de carbono fósil.

Yape (2014) estudia la producción de aleaciones crudas de Fe-Cr-Ni a partir de la fundición directa de minerales de cromita y laterita. Demuestra que la ley y la composición de los minerales de cromita y laterita son los principales factores para producir la aleación, al utilizar como reductor al carbón activado.



Liu et al. (2016) reportan la utilización de finos de carbón puro, como agente reductor, para obtener aleaciones de aceros inoxidable mediante la reducción por fundición de sinterizados de Fe-Ni-Cr.

Liu et al. (2016) utiliza finos de coque como reductor para producir una aleación (Fe-Ni-Cr) de acero inoxidable mediante reducción directa por fundición. Las principales características del coque resultaron en 15,20% de agua, 76,11% de carbón, 13,15 de volátiles, 0,08% de fósforo y 0,43% de azufre.

Balango et al. (2018) realizaron un estudio con el objetivo de investigar la fundición simultánea de minerales que contienen níquel y cromo para producir una aleación cruda de Fe-Ni-Cr. Como agente reductor utilizaron carbón de coco con un contenido de carbono fijo de 72,46% en peso.

Machulec et al. (2019) informaron que se pueden utilizar astillas de madera para ajustar la resistencia de la carga y mejorar la permeabilidad al gas para producir aleaciones Fe-Si-Cr. Como principal agente reductor en este estudio se utilizó la hulla.

Nikhil et al. (2022) produjeron con éxito una aleación cruda de Fe-Cr-Ni-Mn con 71,6% de Fe, 22,69% de Cr, 1,02% de Ni, 0,972% de Mn y 2,41% de C; a partir de la utilización de desechos mineros de baja ley como materia prima, mediante la utilización de coque como reductor.

Cruz Crespo, et al, (2023), demostraron, que la existencia de residuales de la producción de níquel en Cuba, que pueden ser usados para obtener materiales metalizados en la producción de acero, junto a la insuficiente disponibilidad de coque, lleva a pensar en procesos alternativos sustentables, basados en reductores de mayor accesibilidad, como carbones no coquificables.

## **1.5 Conclusiones capítulo I**

1. La reutilización de los residuales generados por las empresas del níquel (tecnología CARON) y el cromo en Moa, a pesar de haber sido estudiados por diferentes investigadores, aún son insuficientes los trabajos investigativos, sobre su posible uso para la obtención de materias primas siderúrgicas cubana.

2. La obtención de la ferroaleación, específicamente, FeCrNi, a partir de las colas de la tecnología CARON en Moa, cromitas refractarias y escombros diferenciados, constituye una gran posibilidad de reaprovechar los contenidos significativos de Fe, Si, Mn, C, que poseen estos residuales, elementos indispensables para la elaboración de aceros.
3. La existencia en Moa de importantes recursos que actualmente, son residuales (Finos de carbón reductor, Cieno carbonatado y Colas), brindan las posibilidades de aplicar la economía circular para la obtención de ferroaleaciones al país, actualmente muy demandadas para la obtención de aceros especiales en Cuba

## CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de obtener más información de las materias primas a utilizar en esta investigación (colas del proceso Caron, Cromitas, Escombros, Reductores y Fundente), se realizaron análisis desde el punto de vista físico-químico, mineralógico y térmico. En este capítulo se analizan las principales investigaciones desarrolladas en este sentido, para la obtención de FeCrNi, para su futura utilización en la producción de aceros aleados para la industria siderúrgica cubana.

### 2.1 Principales métodos de investigación empleados

Para darle cumplimiento a la tarea propuesta en esta etapa se utilizaron métodos empíricos, teóricos y experimentales.

#### **Métodos empíricos**

El principal método empírico que se utilizó fue la entrevista a especialistas que laboraban en las antiguas minas de cromitas de las zonas de Merceditas, Amores y Cayo Guam, así como con el resto de los materiales a utilizar (colas, escombros, fundentes y reductores), lo que permitió orientar el proceso de selección, toma y procesamiento de las muestras de investigación.

#### **Métodos teóricos**

Los principales métodos teóricos que se utilizaron fueron el histórico-lógico, análisis-síntesis, inducción-deducción e hipotético-deductivo, para el levantamiento y procesamiento de las informaciones necesarias para la conformación del informe investigativo.

**Histórico-lógico:** Para estudiar la trayectoria de los fenómenos que se vinculan al proceso de toma, preparación y caracterización de las muestras y mezclas conformadas, se utilizó este método de investigación.

**Análisis-síntesis:** Este método se utilizó para analizar la información vinculada al tratamiento y uso de las diferentes muestras de investigación, reportadas en la literatura científica, así como la que se obtuvo durante la ejecución de la investigación.

**Inducción-deducción:** Para realizar generalizaciones a partir de los hechos singulares, que se identificaron durante el análisis de la preparación y caracterización química-física y tecnológica de las muestras de investigación.

**Hipotético-deductivo:** Para establecer conclusiones particulares y generales, a partir de la hipótesis propuesta en el diseño de la investigación.

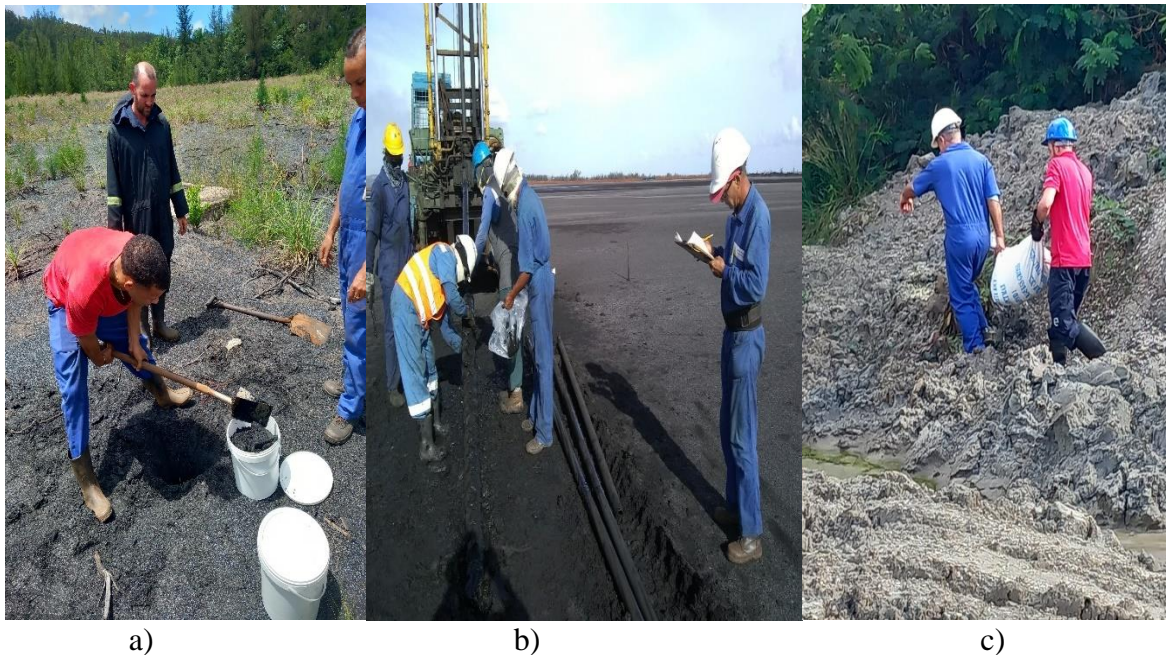
## **2.2 Metodica de investigación utilizadas**

Las metodologías de investigación utilizadas, se resumen en:

1. Metodología para la selección y preparación de muestras experimentales.
2. Metodología para la conformación de las mezclas metalúrgicas, a partir de la caracterización de las materias primas seleccionadas.
3. Metodología para la obtención de FeCrNi, a partir de las de las mezclas metalúrgicas conformadas y caracterizadas

### **2.2.1 Metodología para la selección y preparación de muestras experimentales**

Las muestras de cromitas refractarias de las antiguas minas de Merceditas y Amores, las colas nuevas de la empresa Che Guevara y del resto de las materias primas utilizadas (escombros lateríticos, reductores y fundente), fueron seleccionadas y tomadas, como parte del proyecto sectorial del grupo empresarial Cubaníquel, PS104HO001-015 “Obtención de FeCrNi a partir de materias primas de la región de Moa”. En la figura 4 se muestran momentos de este proceso de investigación.



**Figura 4.** Proceso de toma de muestras experimentales, (a- Cromitas, b- Colas; c- Cieno).

Para procesar las muestras experimentales se utilizaron como equipos fundamentales la estufa, cuarteadores de cruceta y de Johnson. La estufa eléctrica utilizada en la investigación es de marca MEMMERT, logrando temperaturas en su interior que oscilan desde (30 a 250) °C. Una imagen de este equipo se puede observar en la figura 5.



**Figura 5.** Estufa utilizada para el secado de las muestras experimentales.

Mediante el uso de un triturador de mandíbula (Figura 6) se garantizó que todas las muestras presentaran un tamaño máximo de partícula inferior a 8 mm.



**Figura 6.** Triturador de mandíbula.

Las muestras experimentales fueron preparadas utilizando cuarteadores tipo cruceta y Johnson, ilustrados en la figura 7.



**Figura 7.** Cuarteadores utilizados para la preparación de las muestras.

### 2.2.2 Metodología para la conformación de mezclas metalúrgicas

Las mezclas metalúrgicas fueron conformadas, según los niveles de variación de las variables de entrada, teniendo en cuenta los trabajos desarrollados con anterioridad por Pons Herrera, José, et al (2023).

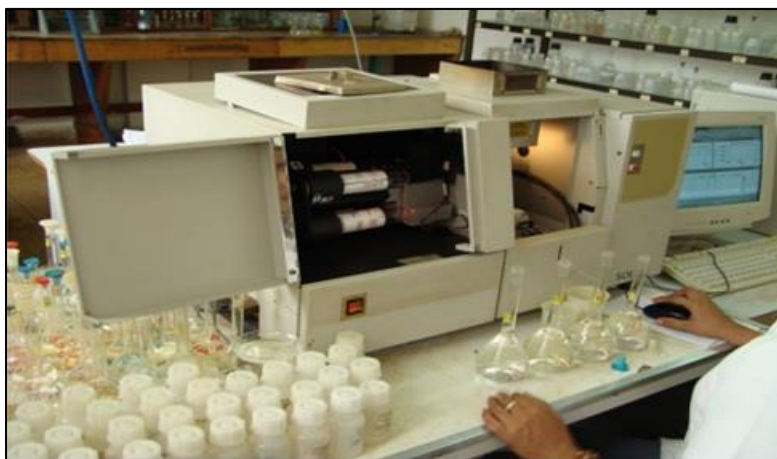
Para todas las mezclas conformadas, se utilizó una relación de reductores de 80/20 de CA/CB, (Angulo Palma, 2024) y un exceso de 15 % por encima del cálculo estequiométrico realizado, para garantizar una basicidad de 0,8 a 1,2, (Pons Herrera, Perdomo, Cruz, & al, 2023), lo cual garantiza una mayor estabilidad y durabilidad del refractario utilizado a base de magnesita, (Perdomo González & al, 2023). De esta forma, las mezclas de las diferentes materias primas utilizadas en la investigación, fueron preparadas en el CEDINIQ y analizadas químicamente según se describe a continuación.

#### **2.2.2.1 Técnicas analíticas empleadas**

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 EAA se utilizó con el objetivo de determinar el contenido de los elementos químicos presentes en las colas nuevas, ya que permite determinar con una alta confiabilidad, los contenidos de los siguientes elementos: hierro, níquel, cobalto, magnesio, y otros metales.

Los componentes principales del equipo de EAA 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 8 se muestra el equipo de forma integral.



**Figura 8.** Equipo de espectrometría de absorción atómica empleado en la caracterización química. Fuente: (CEDINIQ, 2024).

La DRX se utilizó para determinar las principales fases mineralógicas presentes en el escombro diferenciado que se alimentó al proceso de molienda. El difractograma de DRX se realizó por el método de polvo en un Difractómetro X'PERT3 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 9 se muestra el equipo utilizado en esta etapa de la investigación.



**Figura 9.** Equipo de difracción de Rayos X empleado en la caracterización mineralógica. Fuente: (CEDINIQ, 2024).



### 2.2.2.2 Análisis de los metales obtenidos

Los metales obtenidos como resultado de las pruebas de fusión-reducción realizadas en el CIS de la UCLV, fueron preparados y analizados químicamente en el espectrómetro de masa de la empresa Acinox Las Tunas, el cual se muestra en la figura 10.



**Figura 10.** Espectrómetro de masa empleado en la caracterización química de los metales obtenidos.

Las características técnicas del equipo empleado en la caracterización química de los metales obtenidos se resumen a continuación:

- ✓ Fabricante: OBLF Spektrometrie.
- ✓ Modelo: QSG750-11. Versión 01
- ✓ Nro. de serie 1064.
- ✓ Datos electrónicos: 230v AC 50/60Hz.
- ✓ Identificación de equipo: Cuánto metro de emoción óptica OBLF QSG 7504.
- ✓ Versión del software: OBLF Win Versión 1.5.15k3.

- ✓ Referencia a la aptitud para su uso previ6: IEN -0102.ASTM E415, ASTM E1086, Analyzer QSG750 Operation manual validation de la determinaci6n de la composici6n qu6mica, por espectrometr6a de emisi6n 6ptica, utilizando el cuantometro OBLF QSG 750-11 y ARL 3460.
- ✓ Ubicaci6n: Local de ensayo del grupo de laboratorio.
- ✓ Referencia a MR: Certificado de los MR.
- ✓ Referencia de mantenimiento: DCA 09121 Plan anual del MPP.
- ✓ Referencia a situaci6n a mal funcionamiento: DCA 0906 ``Registro de EIME no calibrado o fuera de servicio " y Libro de incidencias.

### 2.3 Dise1o experimental empleado

Las mezclas metal6rgicas fueron conformadas, seg6n los niveles de variaci6n de las variables de entrada de las muestras principales (cromitas, escombros y colas), que se muestran en la tabla 1. Se emple6 el software estad6stico profesional Statgraphics Centurion XV para la conformaci6n de las diferentes mezclas. Estos niveles fueron escogidos teniendo en cuenta los trabajos desarrollados con anterioridad por Pons Herrera, Jos6, et al (2023).

**Tabla 1.** Niveles de variaci6n (%) de las muestras principales de investigaci6n.

C6digo	Variables de entrada	C6digo	Nivel Inferior	Nivel superior
X1	Cromitas	X1	20	30
X2	Escombros	X2	20	40
X3	Colas	X3	30	50

**Fuente:** (Pons Herrera, Angulo Palma, & Ram6rez P6rez, Informe de Avance del Proyecto PS104HO001-015. Etapa 02: Caracterizaci6n de muestras de materias primas de la Regi6n de Moa, 2024).

Para la conformaci6n de las mezclas metal6rgicas se emple6 el dise1o Mac Lean Anderson, que establece que los ensayos o experimentos (n) deben cumplir la condici6n de normalidad siguiente,

$$n = \text{Sumaria experimentos} = 100 \dots\dots\dots (1)$$

Por tanto, la matriz experimental de las mezclas a conformar, se define en la tabla 2.

**Tabla 2.** Matriz experimental empleada en las pruebas de fusión reductora.

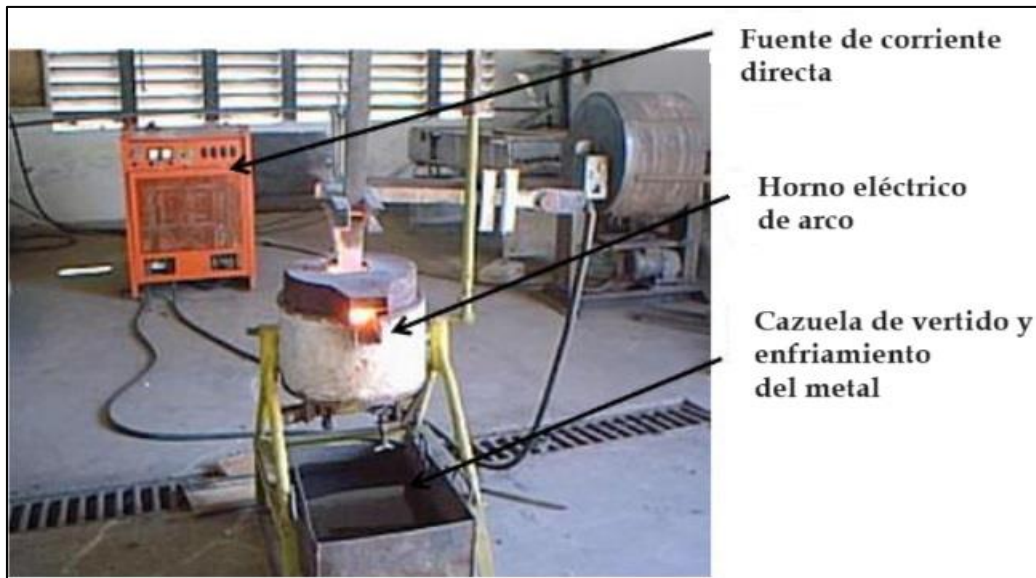
No	X1	(X <sub>2</sub> )	Cola	Sumatoria
1	30	40	30	100
2	20	40	30	100
4	30	20	50	100
3	20	20	50	100
6	30	40	30	100

Para el desarrollo de estas coladas se utilizaron proporciones de reductores, con una proporción de 80 % de carbón antracita + 20 % de carbón bituminoso, tomando como base los trabajos de Angulo Palma, (2024), utilizando la combinación de estos reductores en los minerales lateríticos cubanos.

#### **2.4 Pruebas de fusión reductora**

Estas pruebas fueron desarrolladas en las instalaciones experimentales del Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), pertenecientes a la Universidad Central Martha Abreu de las Villas (UCLV).

El procesamiento se realizó en un horno eléctrico de arco con crisol de grafito (ver figura 1), el cual tiene un volumen útil de  $1,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , correspondiéndole una capacidad de aproximadamente 5,3 kg de acuerdo con la densidad promedio de la mezcla a procesar (3,81 g/cm<sup>3</sup>). Durante el procesamiento se mantuvieron los parámetros tecnológicos en el entorno de 823 A y 35 V. La temperatura medida con un pirómetro óptico de fabricación checa marca Pyromet Metra con una precisión de  $\pm 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , realizándose el vertido entre 1500 – 1600 ° C sobre un molde metálico enfriado de manera natural, con un tiempo de fusión promedio de 20 minutos. La energía al horno fue suministrada por una fuente de corriente directa Mansfeld, de 500 A de corriente máxima y 48 V de voltaje en vacío. Imágenes del equipamiento empleado en las pruebas experimentales se muestran en la figura 11.



**Figura 11.** Equipamiento utilizado en las pruebas de fusión reductora en el CIS de Villa Clara.

En la figura 12 se muestran momentos del desarrollo de las pruebas experimentales durante la fusión de las colas en el horno de arco de C.D.



**Figura 12.** Horno de arco eléctrico empleado en las pruebas de fusión reductora.

## 2.5 Procesamiento de las informaciones

Los resultados de la investigación fueron procesados empleando la paquetería Microsoft Word 2021, básicamente el Excel, Word para la tabulación, graficado y escritura de esta tesis

## **2.6 Conclusiones capítulo II**

1. Los principales equipos, utensilios, materiales utilizados cumplen con las normas establecidas para el desarrollo de la investigación.
2. Las técnicas analíticas que se emplearon fueron la espectrometría de absorción atómica (EAA), Espectrometría de masa y la difracción de rayos X (DRX).
3. La metodología experimental diseñada e implementada para el desarrollo de los ensayos, garantizan la representatividad y validez de los resultados.

## CAPÍTULO III. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 3.1 Resultados de la caracterización química de las mezclas metalúrgicas conformadas

Los resultados de los análisis químicos de las mezclas conformadas con cromitas + escombros lateríticos + colas del proceso CARON en Moa, se caracterizaron por contenidos significativos de Fe y Cr, elementos fundamentales para la obtención de la ferroaleación prevista. En la tabla 3 se exponen los resultados de estos análisis.

**Tabla 3.** Composición química (%) de las mezclas conformadas con los materiales principales (cromitas+escombros+colas).

Código	Ni	Co	Fe	Mn	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr	SiO <sub>2</sub>
MM-1	0.481	0.086	21.66	0.394	9.161	4.087	8.93	18.98
MM-2	0.842	0.109	31.78	0.599	13.58	5.971	7.6	23.77
MM-3	0.834	0.101	28.53	0.535	8.051	5.365	5.16	12.87
MM-4	0.796	0.093	27.79	0.513	7.657	5.26	5.08	12.84
MM-5	1.044	0.139	37.46	0.706	12.05	7.038	6.86	23.74
MM-6	0.96	0.121	35.60	0.661	11.45	6.675	8.02	23.00
<b>Promedio</b>	<b>0.895</b>	<b>0.113</b>	<b>32.232</b>	<b>0.603</b>	<b>10.558</b>	<b>6.062</b>	<b>6.544</b>	<b>19.244</b>

Los contenidos promedios de cromo (6,5 %) y níquel (0.89 %), aunque son relativamente bajos para las expectativas investigativas, sí resultan importantes para los objetivos de obtener una ferroaleación de baja ley, con la presencia de estos elementos, capaz de ser utilizada para la producción de aceros aleados, como los deseados producir en la Empresa Acinox Las Tunas, (Acinox Las Tunas, 2022).

Se utilizó una relación de reductores de 80/20 de CA/CB y un exceso de 15 % por encima del cálculo estequiométrico realizado, (Angulo Palma, 2024), para garantizar una basicidad de 0,8 a 1,2, que garantice la estabilidad del refractario y la estabilidad del horno de arco eléctrico empleado en la investigación, (Perdomo González & al, 2023).

### 3.1.1 Caracterización química de los reductores y fundente empleados en la investigación

Las características de las muestras de carbón antracita y bituminoso se presentan en la tabla 4. La relación de material volátil, carbón fijo y capacidad calorífica se corresponden a la clasificación reportada en la literatura especializada (Angulo Palma, 2024). Es importante resaltar que los valores de S inferiores a 1% convierten en reductores ideales para ser utilizados en las pruebas de fusión reductora.

**Tabla 4.** Composición química promedio (%) de los reductores empleados, antracita (A) y bituminoso (B).

(A)			(B)		
Características	Unidad de medida	Base seca	Características	Unidad de medida	Base seca
Humedad total	%	3.37	Humedad total	%	10.1
Cenizas	%	4.68	Cenizas	%	11.8
Material volátil	%	6.87	Material volátil	%	32.6
Carbón total	%	77.96	Carbón total	%	69.95
Carbón fijo	%	85.08	Carbón fijo	%	55.4
Azufre	%	0.46	Azufre	%	0.55
H <sub>2</sub>	%	3.45	H <sub>2</sub>	%	4.58
Capacidad calorífica (gruesa)	kJ/kg kcal/kg	33 654.4 8 090	Capacidad calorífica (gruesa)	kJ/kg kcal/kg	29 088 6 948

Las características del fundente empleado (cieno carbonatado) se muestran en la tabla 5. El contenido de CaCO<sub>3</sub>, en este residual fue el motivo fundamental de su uso por primera vez, como fundente en Cuba, por tanto, su utilización en este sentido, contribuiría a la reducción de la contaminación ambiental que este provoca a la zona de Moa, principalmente, al reparto Rolo Monterey.

**Tabla 5.** Composición química promedio (%) del fundente empleado en la fusión reductora.

Muestras	Fe	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cr	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>Cieno Carbonatado</b>	0.63	1.559	1.42	0.3	0.01	88,9	23,65

### 3.2 Resultados experimentales los productos metalizados obtenidos

Estas mezclas fueron fundidas empleando la tecnología de fusión reductora, utilizando la proporción definida (80 CA/20CB) y una basicidad entre 0,8-1,2. Los resultados de los diferentes productos obtenidos (FeCrNi), se muestran en la tabla 6.

Los resultados demuestran la posibilidad de obtener FeCrNi, con contenidos de cromo promedio de 9,7 % y níquel de 1,2 %, los cuales pueden constituir una materia prima fundamental, para la producción de esta ferroaleación en Cuba.

Resultan significativos los contenidos de elementos fundamentales para la conformación de esta ferroaleación, o sea, carbono, con valores promedio de 4,1 %. Este contenido es ideal para este tipo de ferroaleación, ya que sirve de elemento de sacrificio, para evitar la oxidación del cromo durante la elaboración de aceros aleados.

Por su parte, presencia de Mn (0,41 %); Si (0,68 %) e Fe (83,57 %), completan los elementos principales que deben estar en este tipo de productos siderúrgicos. Adicionalmente, se aprecian contenidos pequeños, pero importantes de Co, Ti y V, elementos de gran importancia para la elaboración de aceros aleados en Cuba.

Las principales impurezas contenidas en este producto, azufre (0,12 %) y fósforo (0,016 %), no representan una gran preocupación, pues pueden ser controlados, variando los contenidos de fundentes a utilizar, elemento a analizar y resolver con la continuidad de esta investigación.



**Tabla 6.** Composición química (%) de los productos (FeCrNi) obtenidos

<b>Códigos</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Mg</b>	<b>Fe</b>
MM-1	2.964	0.221	0.018	0.205	0.070	1.361	11.042	0.020	0.193	0.003	0.0512	0.0006	83.928
MM-2	4.770	0.766	0.017	0.009	2.548	0.840	9.140	0.139	0.133	0.221	0.1611	0.0173	81.776
MM-3	4.042	0.284	0.015	0.247	0.121	1.475	8.452	0.020	0.187	0.005	0.0524	0.0006	85.178
MM-4	4.570	0.579	0.014	0.034	1.167	1.049	10.398	0.046	0.144	0.068	0.0886	0.0053	82.045
MM-5	3.310	0.176	0.015	0.162	0.001	1.501	7.840	0.014	0.201	0.003	0.0251	0.0006	86.794
MM-6	5.081	0.417	0.015	0.057	0.200	1.033	11.353	0.092	0.139	0.023	0.1066	0.0054	81.705
<b>Promedio</b>	<b>4.123</b>	<b>0.407</b>	<b>0.016</b>	<b>0.119</b>	<b>0.684</b>	<b>1.210</b>	<b>9.704</b>	<b>0.055</b>	<b>0.166</b>	<b>0.054</b>	<b>0.081</b>	<b>0.005</b>	<b>83.571</b>

### **3.3 Transcendencia ambiental y social de los resultados obtenidos**

La gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales constituye una prioridad para la industria cubana del níquel, razón que incrementa la importancia de estos resultados. Actualmente la Empresa Che Guevara de Moa, es la única que utiliza la tecnología CARON para la producción de concentrados de Ni+Co en Cuba, sin embargo, genera más de 2 millones de toneladas de colas anuales que son consideradas como pasivos ambientales, por lo que su utilización para producir materias primas siderúrgicas (ferroaleaciones, arrabios, etc.), unida a otros residuales contenedores de elementos importantes, como los escombros lateríticos y la cromitas, de las minas abandonadas de Merceditas, Amores y Cayo Guam en Moa, constituye una valiosa alternativa para la recuperación de metales con alta importancia en el contexto económico cubano.

También es importante reconocer que las reservas residuales de las industrias de níquel en Moa (cieno carbonatado y carbón antracita) utilizadas en la investigación; fortalecen la aplicación de la economía circular de recursos naturales en desuso, la disminución de importaciones durante la futura obtención de este tipo de ferroaleaciones y la reducción del impacto ambiental que actualmente provocan sobre el ecosistema de la región.

La futura reutilización de estos residuales en función de obtener materias primas siderúrgicas, permitirán la generación de nuevas fuentes de empleo en esta región del país, lo cual beneficiara a muchas familias, principalmente, jóvenes, que serán los que llevarán adelante este proyecto de desarrollo local en Moa.

### **3.4 Conclusiones capítulo III**

1. La obtención de FeCrNi a partir de materias primas residuales de las industrias del níquel y el cromo en Moa, abren nuevas posibilidades para la aplicación de la economía circular en esta región del país y reducir la contaminación que estos provocan al ambiente.
2. Los contenidos de Fe, Si, Mn, C, Cr y Ni, en la ferroaleación obtenida, garantizan la obtención de una materia prima siderúrgica con posibilidades reales de ser utilizada como alternativa para la producción de aceros en Cuba.

## CONCLUSIONES GENERALES

1. Las características químicas de las materias primas principales utilizadas (cromitas, colas y escombros lateríticos), del fundente (cieno carbonatado) y reductores (carbón antracita +bituminoso), permitieron conformar mezclas metalúrgicas que cumplieron la condición de normalidad y obtener a partir de ellas FeCrNi.
2. A partir de las mezclas de colas+cromitas+escombros lateríticos de la región de Moa, fue posible la obtención de FeCrNi, con contenidos significativos de cromo, utilizando la tecnología de fusión-reductora.
3. La obtención de FeCrNi a partir de materias primas residuales de las industrias del níquel y el cromo en Moa, abren nuevas posibilidades para la aplicación de la economía circular en esta región del país; resultado de gran trascendencia ambiental y social para Moa.
4. Los contenidos de los principales elementos de uso siderúrgico (Fe, Si, Mn, C, Cr y Ni), presentes en la ferroaleación obtenida, garantizan la futura obtención de una materia prima siderúrgica necesaria para la producción de aceros aleados en Cuba.

## RECOMENDACIONES

1. Continuar el desarrollo de esta investigación, evaluando el uso de otros reductores nacionales, como el carbón vegetal.
2. Desarrollar un estudio de prefactibilidad para evaluar las posibilidades técnico-económicas del uso de materias primas de la región de Moa, para la obtención de FeCrNi.
3. Evaluar alternativas tecnológicas para el tratamiento de las mezclas de colas+cromitas+escombros, que incluyan la aglomeración, fusión-reductora, granulación, como procesos principales.
4. Analizar variantes tecnológicas a aplicar para el control de los contenidos de impurezas, principalmente, azufre contenido en el FeCrNi obtenido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acinox Las Tunas. (2022). *Perspectivas para la Obtención de Aceros Aleados en Acinox Las Tunas*. Las Tunas: Acinox Las Tunas.
- Almaguer, A. (1995). Corteza de intemperismo. Algunas características de sus partículas finas. . *Revista Minería y Geología*. XII (1), 9-19.
- Almaguer, A., & Zamarzy, V. (1993). Distribución del hierro, níquel y cobalto en los tamaños de los granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. *Revista Minería y Geología*. XI (2), 17-24.
- Angulo Palma, H. J. (2024). *Sustitución del Petroleo Aditivo ´por Carbón Bituminoso en el Proceso de Tostación/Reducción de la Tecnología CARON*. Santiago de Cuba: Tesis Doctoral. Universidad de Oriente.
- Angulo Palma, H. J. (2024). *Sustitución del Petroleo Aditivo ´por Carbón Bituminoso en elProceso de Tostación/Reducción de la Tecnología CARON*. Santiago de Cuba: Tesis Doctoral. Universidad de Oriente.
- Angulo Palma, H. J. (2024). *Sustitución del Petroleo Aditivo por Carbón Bituminoso en el Proceso de Tostación/Reducción de la Tecnología CARON*. Santiago de Cuba: Tesis Doctoral. Universidad de Oriente.
- Angulo Palma, H. J. (2024). *Sustitución del Petróleo Aditivo por Carbón Bituminoso en el Proceso de Tostación/Reducción de la Tecnología CARON*. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente. Tesis Doctoral.
- Ariza Borges, S., Salazar Infante, Y., Capote Flores, N., & al, e. (2004). Lixiviación Química de las Colas Producto del Proceso Carbonato-Amoniacal con Ácidos Orgánicos. *Tecnología Química, Vol XXIV, No. 3*, 32-37.
- CEDINIQ. (2024). *Caracterización de Colas del Proceso CARON en Moa. PS104HO001-27: Obtención de Metales y Productos siderúrgicos a partir de las colas de la Producción de Níquel en Moa*. Moa: Laboratorio Análisis CEDINIQ.
- Changning, N., & al, e. (2015). *First Principles Studies of NiFeCrCoMn High Entropy Alloys*. Carolina del Norte: Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Estatal de Raleigh, Carolina del Norte. Tesis Doctoral.

- Cruz Crespo, A. P., & Pons Herrera, J. e. (2023). Obtención de Arrabio Aleado con Ni y Cr por Reducción Carbotérmica en un Horno de Arco de Corriente Continua de Colas de Nicaro de la Producción de Níquel. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, Vol. 46, 1-13.
- Días, C., & Mojena, L. (1989). *Informe sobre el estudio mineralógico por microsondas de las fracciones granulométricas del escombros laterítico de Pinares de Mayarí*. Madrid: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid. 50p.
- Durán, E., & Angulo, L. (1994). *Análisis fraccional magnético de los escombros lateríticos*. Moa: Informe técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa .
- Eißmann, N., Klöden, B., & Weißgärber, T. (2017). High-entropy alloy CoCrFeMn-Ni Produced by Powder Metallurgy. *Powder Metallurgy*, 60 (3), 184-197.
- García, E., Palacios, A., & al, e. (2013). Lixiviación Ácida de Residuales Sólidos de la Tecnología Carbonato Amoniacal. *Minería y Geología*, V 29 (1), 17-28.
- García, L., Samora, J., & Mojena, L. (1989). *Informe sobre la preparación pre – metalúrgica de los escombros lateríticos de los yacimientos Pinares de Mayarí y Martí para su fusión*. Madrid: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid. 42p.
- García, V., & Giselle, e. a. (2013). *Actualización del Conocimiento Mineralógico de Menas Lateríticas y Residuos Sólidos de las Industrias Niquelíferas Cubanas*. La Habana: V Congreso Cubano de Minería. Geociencias 2013.
- Govin Sanjudo, A., Ramírez Pérez, M., Pons Herrera, J., & al, e. (2022). Solubilización de Níquel y Cobalto Presente en un Escombros Laterítico Mediante el Empleo de *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Rev. CENIC Cienc. Biol.*; Vol. 53. (2), 197-206.
- Guerra, N., & Bismaris, B. (1991). *Caracterización fraccional magnética de los escombros lateríticos de Atlantic*. Moa: Informe técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Departamento de Metalurgia.
- Guerrero, Y. (2013). *Obtención de Lupias de Hierro como carga para la Producción de Aceros en Cuba a partir de las Colas de la Empresa Rene Ramos Latour de Nicaro*. Moa: Universidad de Moa.
- López, F., Ramírez, Pons, J., López, A., & Alguacil, F. (2008). Kinetic study of the thermal decomposition of low-grade nickeliferous laterite ores. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 94 (2), 517-522.

- Mendi, D., González, J., & et al. (2020). Petrogenesis of the chromitite body from the Cerro Colorado ophiolite, Paraguaná Peninsula, Venezuela - Petrogénesis del cuerpo de cromitita de la ofiolita del Cerro Colorado, península de Paraguaná, Venezuela. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 1-27.
- Murty, B., Yeh, J., & al., e. (2019). A Brief History of Alloys and the Birth of High-Entropy Alloys. *High-Entropy Alloys*, 1-12.
- Ortiz Barcenas, J. (2015). *Obtención de Arrabio con Níquel (NPI) a partir de los Escombros Lateríticos de la Mina Marti en Nicaro*. Moa: Universidad de Moa.
- Ortiz, B. J. (2015). *Obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (nickel pig iron) a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de Mina Martí de Nicaro*. Moa: Tesis Doctoral. Universidad de Moa.
- Ortiz, J. (1990). *Obtención de concentrados de cromo y hierro a partir de los escombros lateríticos de Pinares de Mayarí*. Moa: Informe Técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Ostroumov, N., Rojas, A., & Sánchez, C. (1985). Estudio de la composición mineralógica de las lateritas de Moa por el método de difracción de rayos X. *Revista Minería y Geología*. III (1), 23 – 30.
- Palacios Rodríguez, A., & García, E. (2014). Extracción de Cobalto de Escombros Lateríticos mediante Lixiviación Ácida. *Minería y Geología*, 30 (2), 73-86.
- Penedo Medina, M., & al, e. (2009). Lixiviación a Escala de Banco de las Colas de la Tecnología Carbonato Amoniacal con Ácido Piroleñoso de Bagazo de Caña . *Tecnología Química*, 187-194.
- Peña, I., & Rubio, S. (1990). *Beneficio de los escombros lateríticos* . Moa: Informe Técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 78 p.
- Perdomo González, L., & al, e. (2023). *Obtención de Productos Metalizados Base Hierro, Empleando Hornos de Arco Eléctrico de Corriente Directa*. Santa Clara: Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central de las Villas.
- Pons Herrera, J. (2018). *Obtención de un Semiproducto base Hierro, a partir del Tratamiento por Fusión Reductora de las Colas Blancas de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa*. Moa: Universidad de Moa.

- Pons Herrera, J. (2022). *Características Físico-Química, Mineralógica y Térmica del Pasivo Ambiental Minero Metalúrgico "Colas de la Producción de Níquel"*. Moa: Universidad de Moa.
- Pons Herrera, J. A. (2000). *Obtención de Productos Refractarios para la Fundición, a partir de las Dunitas Serpentinizadas de la Región de Moa. Zonas Merceditas y Amores*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa. Tesis Doctoral.
- Pons Herrera, J., & Ramírez Pérez, M. (2022). *Obtención de Materias Primas Metalizadas Base Hierro a partir de las Colas de las Tecnologías CARON y HPAL*. Moa: Universidad de Moa.
- Pons Herrera, J., Angulo Palma, H., & Ramírez Pérez, M. (2024). *Informe de Avance del Proyecto PS104HO001-015. Etapa 02: Caracterización de muestras de materias primas de la Región de Moa*. Moa: CEDINIQ.
- Pons Herrera, J., Perdomo, L. C., & al, e. (2023). *Obtención de Prdocutos Siderúrgicos a partir de las Colas de la Producción de Níquel en Moa*. Moa: Universidad de Moa.
- Pons Herrera, J., Perdomo, L., Cruz, A., & al, e. (2023). *Obtención de productos Metalizados Base Hierro a partir de Materias Primas Nacionales para la Producción de Aceros Aleados en Acinox Las Tunas*. Moa: Universidad de Moa.
- Pons, J., & Hernández, M. (1997). *Estudio de la posible utilización de la fracción gruesa (+2 mm) de escombros lateríticos en los procesos de fusión*. Moa: Informe técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Departamento de Metalurgia. .
- Pons, J., Pando, I., & Sosa, Y. (1995). *Caracterización de las fracciones + 0,83 mm de los escombros lateríticos del yacimiento Atlantic*. Moa: Informe Técnico. Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa. .
- Proenza Fernández, J., Gervilla, F., & al, e. (1998). Las Cromititas Ofiolíticas del Yacimiento Mercedita, (Cuba). Un Ejemplo de Cromitas Ricas en Aluminio en la Zona de Transición Manto-Corteza. *Acta Geologica Hispana*, v. 33 n° 1-4, 179-212.
- Ramírez Pérez, M. (2010). *Obtención de un Producto para la Descarburización del Acero HK-40, a partir de la Coraza Ferruginosa de la Región de Moa*. Moa: Universidad de Moa.



- Ramírez Pérez, M., Herrera, P., José, & Ortiz Barcenás, J. (2019). *Regularidades de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos Sólidos, Generados por las Industrias del Níquel en Cuba*. Moa: Universidad de Moa.
- Ramírez, B. (1994). *Análisis granulométrico y composición química de los escombros lateríticos*. . Moa: Informe Técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Ramírez, M. (2002). *Beneficiabilidad de los escombros lateríticos del sector A de la mina de la Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A* . . Moa: Tesis presentada en opción al título de Master. ISMM. Moa. 51 p.
- Ramírez, M., & Pons, J. (2001). *Características físico – químicas y vías de utilización de los escombros lateríticos del sector A de la mina de la Pedro Soto Alba Moa Nickel S.A*. Moa: Memorias del II Taller Internacional de Protección del Medio Ambiente y los Georrecursos PROTAMBI.
- Ramírez, P. M. (2010). *Utilización de los escombros lateríticos de zona A, yacimiento Moa Occidental en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40*. Moa: Tesis Doctoral. Universidad de Moa.
- Rojas Puro, A., & Turro Breff, A. (2003). Composición Mineralógica de las Colas del Proceso CARON en Moa, Holguín, CUBA. *Minería y Geología, Nos 3-4*, 21-28.
- Rui, H.-C., Yang, J.-S., & al, e. (2021). *Highly refractory harzburgites from the Moa-Baracoa Ophiolitic Massif, Eastern Cuba: Insights into forearc mantle melt-rock interactions*. Beijing: Repositorio Ninive.
- Ruiz-Esparza Rodríguez, M., Gamaliel Garay, C., & Martínez Sánchez, R. (2023). Aleaciones de Alta Entropía: Una Mirada hacia el Futuro. *Universitarios Potosinos*, 19-21.
- Swardjo, W. (1969). Beneficio y posibilidades siderúrgicas de los escombros de minerales lateríticos. *Revista Tecnológica*, 25-30.
- Véliz, J., & Miranda, L. (2022). Desarrollo de investigaciones sobre la tecnología Caron durante el procesamiento de las lateritas de baja ley de níquel y de los escombros lateríticos, clasificados como: menas o minerales no industriales. *Tecnología Química*, 42(2), 361-383.