

Obtención de un precursor de electrodos de hierro a partir de colas negras de la industria del níquel mediante lixiviación ácida y precipitación química

Production of an iron electrode precursor from black tailings in the nickel industry by acid leaching and chemical precipitation

Daniel Alberto García-Torres¹, Edelio Danguillecourt-Alvarez¹, Elvira Leyva-Navarro², Yoneidis Hernández-Pérez¹

¹Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

²Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Holguín, Cuba.

*Autor para la correspondencia: edalvarez@ismm.edu.cu

Resumen

La industria del níquel en Moa genera significativas cantidades de residuos sólidos, conocidos como colas negras, con un elevado contenido de hierro (>40 %). La recuperación de este elemento representa una alternativa sostenible para su uso como material precursor de electrodos negativos en baterías recargables de níquel-hierro. Este estudio evalúa la viabilidad de utilizar estas colas como fuente de hierro. La síntesis se realizó mediante lixiviación con ácido sulfúrico, para lo cual se diseñó un experimento factorial que optimizó el proceso. Se alcanzaron eficiencias de extracción de hierro entre 27 % y 62 %, siendo la concentración del ácido el factor más influyente. El licor rico en hierro se sometió a una etapa de precipitación por ajuste de pH con NaOH y burbujeo de oxígeno, generando un sólido de color marrón. El análisis por difracción de rayos-X identificó goethita (FeOOH) como fase principal en el precipitado, el cual presentó un contenido de hierro de 47,13 %. Los resultados demuestran el potencial de estas colas residuales como precursores de materiales electroactivos.

Palabras clave: lixiviación ácida, precipitación química, colas negras, goethita, electrodos de hierro

Abstract

The nickel industry in Moa generates significant amounts of solid waste, known as black tailings, with high iron exceeding 40 %. Recovering this

element represents a sustainable alternative for its use as a precursor material of negative electrodes in rechargeable nickel-iron batteries. This study evaluates the feasibility of using these residues as a source of iron by using sulphuric acid leaching for which a factorial experiment was designed to optimize the process. Iron extraction efficiencies between 27 % and 62 % were achieved with acid concentration identified as the most influential factor. The iron-rich liquor was subjected to a precipitation stage by pH adjustment with NaOH and oxygen bubbling, generating a brown solid. XRD analysis identified goethite (FeOOH) as the main phase in the precipitate, with an iron content of 47 13 %. The results show the potential of these residual tailings as precursors for electroactive materials.

Keywords: acid leaching, chemical precipitation, black tailings, goethite, iron electrodes

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas productoras de níquel y cobalto en la provincia de Holguín generan anualmente miles de toneladas de residuos sólidos, que son depositados en diques o presas de colas. Estos residuos contienen varios elementos químicos, siendo el hierro el más abundante, seguido por cromo y otros metales, mientras que el níquel y el cobalto están presentes en menores proporciones (Ramírez-Pérez, 2002).

Diversos investigadores han propuesto iniciativas orientadas a la recuperación de estos elementos, con el objetivo de desarrollar tecnologías que permitan su concentración. Esto contribuiría tanto al desarrollo sostenible como a la generación de nuevas fuentes de ingreso para la economía nacional (Sánchez *et al.*, 2007; Palacios-Rodríguez y García-Peña, 2014; Navarro-Breffe, 2017). Específicamente la extracción de hierro ha sido lograda mediante diversos métodos, entre los que destaca la lixiviación ácida a presión atmosférica, que ha arrojado resultados favorables en condiciones experimentales (García-Peña *et al.*, 2013; Medina *et al.*, 2006).

Además de la necesidad de valorizar estos residuos, las condiciones electroenergéticas actuales en el país han impulsado la creación de un programa de transición energética, con el objetivo de fomentar el uso de nuevas tecnologías, equipos, sistemas y métodos de gestión, mediante la ejecución práctica de investigaciones, desarrollos e innovaciones que favorezcan el aumento de la eficiencia energética y la conservación de la energía en todos los ámbitos. Así, el desarrollo energético completo y sostenible se alinea como una respuesta fundamental ante la creciente necesidad global de energía (Rendón y López, 2022; ONUDI, 2023).

Los inconvenientes derivados de la intermitencia y variabilidad de las energías renovables pueden solucionarse eficazmente mediante fuentes de energía electroquímica, capaces de transformar la energía química en eléctrica y viceversa. Por ello, la creación de sistemas eficaces de almacenamiento de energía eléctrica, como las baterías, es fundamental para incrementar el aprovechamiento de las energías renovables y asegurar un progreso sostenible (Linden y Reddy, 2001). Estos sistemas de energía eléctrica pueden clasificarse en dos categorías: baterías y capacitores electroquímicos. Dependiendo de su conducta durante la carga y descarga, estos presentan un gran potencial como dispositivos de conversión y almacenamiento de energía (Pérez-González, 2022; Wang *et al.*, 2016; Zu *et al.*, 2017).

Los sistemas de almacenamiento de energía dependen en gran medida de la calidad de sus electrodos, positivos y negativos. Aprovechando la cantidad de hierro presente en los residuos generados por la industria del níquel, el trabajo va encaminado a la obtención de un concentrado de hierro que pueda ser evaluado como materiales activos en el electrodo negativo de baterías de níquel-hierro. De ahí que el objetivo fue obtener un concentrado de hierro mediante lixiviación ácida de las colas negras del proceso carbonato-amoniacial y la posterior precipitación química por ajuste de pH.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Como materia prima para las pruebas de lixiviación a presión atmosférica se utilizaron las colas del proceso metalúrgico Caron que se obtienen en la planta productora de Ni+Co de Moa. Los licores que se obtuvieron de la lixiviación ácida se utilizaron para la precipitación del concentrado de hierro.

2.2. Reactivos

- Ácido sulfúrico de origen industrial.
- Hidróxido de sodio grado técnico (98 % de pureza) como agente precipitante.

2.3. Toma y preparación de las muestras

Las muestras se recolectaron a la salida de la Planta de Recuperación de Amoníaco en la tomamuestra situada en la descarga al pozo de bombeo de colas a la presa. Posteriormente, se secaron a 100 °C y se homogeneizaron (Figura 1) mediante el método del anillo y el cono (Ramírez-Pérez, 2002; Sánchez-Guillén *et al.*, 2014).

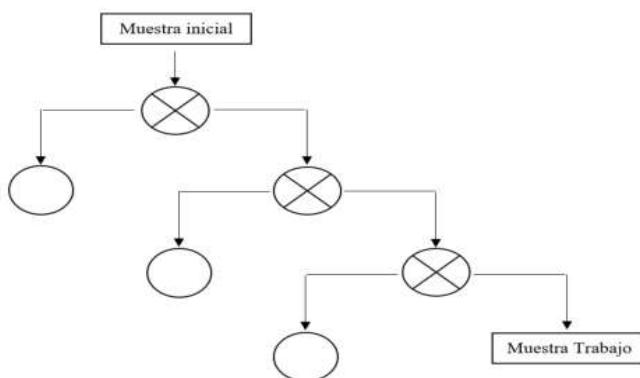


Figura 1. Procedimiento de homogenización y cuarteo.

2.4. Programa de experimentos

Se realizaron pruebas de lixiviación ácida con ácido sulfúrico industrial para evaluar la influencia de diferentes parámetros, buscando obtener un licor con alto contenido de hierro. Se diseñó un experimento factorial completo con dos variables independientes (concentración de reactivos y tiempo de reacción) y dos réplicas, considerando como variable dependiente el porcentaje de extracción de hierro. Se diseñó una matriz factorial completa 2^2 (dos factores, dos niveles), resultando en cuatro condiciones experimentales únicas (Tablas 1 y 2). Cada condición se replicó tres veces, para un total de 12 experimentos (Fernández-Bao, 2020).

Tabla 1. Matriz de diseño factorial

Factores		
Corridas	A	B
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

Tabla 2. Factores y niveles del diseño factorial

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Tiempo (A)	40	80	2	minutos
Concentración del ácido (B)	5	7	2	mol/L

El cálculo de eficiencia de la lixiviación se realizó según la formula (1) (Díaz-Bello, 2016; Cisneros-Sánchez *et al.*, 2021):

$$EP_{me} = (m_{Mesi} - m_{mesf}) \cdot \frac{100}{m_{mesi}} \quad (1)$$

Donde:

EP_{me} : Eficiencia de la lixiviación de especie metálica, en %

m_{Mesi} : Masa de especie metálica en disolución inicial, en g

m_{mesf} : Masa de especie metálica en disolución final, en g

El análisis estadístico de los resultados se realizó mediante el programa *Statgraphics Centurion XV*, con el cual se obtuvieron las ecuaciones de regresión que permitieron graficar el comportamiento de las diferentes variables.

2.5. Instalación experimental

La instalación empleada para la ejecución de las pruebas experimentales del proceso de concentración de hierro, mediante la lixiviación ácida se muestra en la Figura 2. El sistema experimental incluyó un reactor de 1 L, medidor de pH, agitador de velocidad variable, termostato y bombas peristálticas de flujo regulable.



Figura 2. Instalación experimental para la lixiviación a presión atmosférica con ácido sulfúrico.

2.6. Metodología utilizada en la lixiviación a presión atmosférica

Los criterios para seleccionar la metodología se fundamentan en experiencias previas de lixiviación a presión atmosférica, en las que se trabajó con materias primas con características similares a las propuestas. Considerando que esta metodología establece una serie de pasos lógicos para llevar a cabo la lixiviación del hierro (Sánchez *et al.*, 2007; Sánchez y Martínez, 2007) se propuso:

- Pesar las muestras de colas negras.
- Definir los valores de los factores según el diseño factorial.
- Calentar la mezcla de ácido sulfúrico y colas hasta la temperatura de trabajo (80 °C).
- Iniciar la reacción y medir el tiempo una vez alcanzada la temperatura.
- Al transcurrir el tiempo previsto, se procede a la filtración de la pulpa, lavado y secado del sólido.
- Preparar para el análisis muestras del licor producto de la lixiviación, el agua de lavado y el sólido filtrado.

2.7. Procedimiento para la precipitación

Se utilizó un reactor de 1 L con camisa de calentamiento, agitación mecánica y neumática. El licor obtenido en la lixiviación se calentó a la temperatura prefijada para los experimentos, se añadió el agente precipitante hasta alcanzar un pH de 4,5 a 5,0. Al finalizar, se realizó la separación líquido-sólido, se lavó y secó el precipitado para su posterior análisis químico y difractométrico. La Tabla 3 muestra los parámetros de operación utilizados.

Tabla 3. Parámetros del proceso de precipitación

Parámetros de operación	Acondicionamiento
Temperatura	80 °C
pH	4,5 a 5 unidades
Tiempo de reacción	1 hora
Agitación mecánica	Todo el tiempo de reacción

2.8. Técnicas analíticas empleadas en la caracterización

Se utilizaron varias técnicas analíticas. Como parte de la caracterización química de las colas, se realizó el análisis cualitativo de fases. La determinación de las fases mineralógicas se realizó por difracción de rayos-X (DRX), mediante el método de polvo en un difractómetro X'PERT3 de PANalytical con las siguientes condiciones: barrido tipo Gonio en [2θ] registro angular desde 4° hasta 80° con distancia de paso de 0,008° con radiación de cobalto y filtro de níquel. La diferencia de potencial es de 40 kV y corriente de 30 mA. El análisis cualitativo de fases se realizó con la utilización del programa *Crystallographica Search-Match*.

El método espectrofotométrico de absorción atómica se basa en la absorción selectiva de radiaciones electromagnéticas de diversas regiones del espectro por el sistema homogéneo. Se utilizó para determinar la composición química de los sólidos y los licores obtenidos.

Las morfologías de las materias primas fueron determinadas mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) de alto vacío de la firma TESCAN Modelo Vega 3, utilizando un voltaje de aceleración de los electrones de 10 kV.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Composición química de las colas negras

El resultado del análisis químico de las colas negras (Tabla 4) muestra que el hierro es el elemento mayoritario, predominando las fases maghemita y magnetita, lo que explica las propiedades magnéticas de estas colas. Además, se detectaron otros elementos metálicos en cantidades apreciables. Estos residuos pueden considerarse como minerales de hierro, con más del 40 % de este elemento, representando una reserva potencial para diversas aplicaciones. Trabajos precedentes (Rojas-Purón y Turro-Breffe 2003; Palacios-Rodríguez y García-Peña, 2014; Fernández *et al.*, 2015) revelaron resultados similares a los de esta investigación.

Tabla 4. Composición química de las colas negras (%)

Elementos	Ni	Co	Fe	Mg	Mn	Al	Cr	Zn
Contenido (%)	0,35	0,06	44,59	0,18	0,79	5,39	2,84	0,02

El difractograma de las colas negras (Figura 3) muestra varios picos de difracción. Estas fases se forman durante los procesos de tostación-reducción y lixiviación, predominando en este caso la magnetita Fe₂O₃ (PDF 7-0322) y la maghemita Fe₂O₃ (PDF 19-629) como las principales fases portadoras de

hierro (Miranda *et al.*, 2000; Ramírez-Pérez, 2002; Valix y Cheung, 2002; Cabrera *et al.*, 2011; Angulo-Palma *et al.*, 2024).

Físicamente se reconoce como un material de color negro, brillo semimetálico, fina granulometría y predominantemente magnético (Rojas-Purón y Turro-Breffe, 2003).

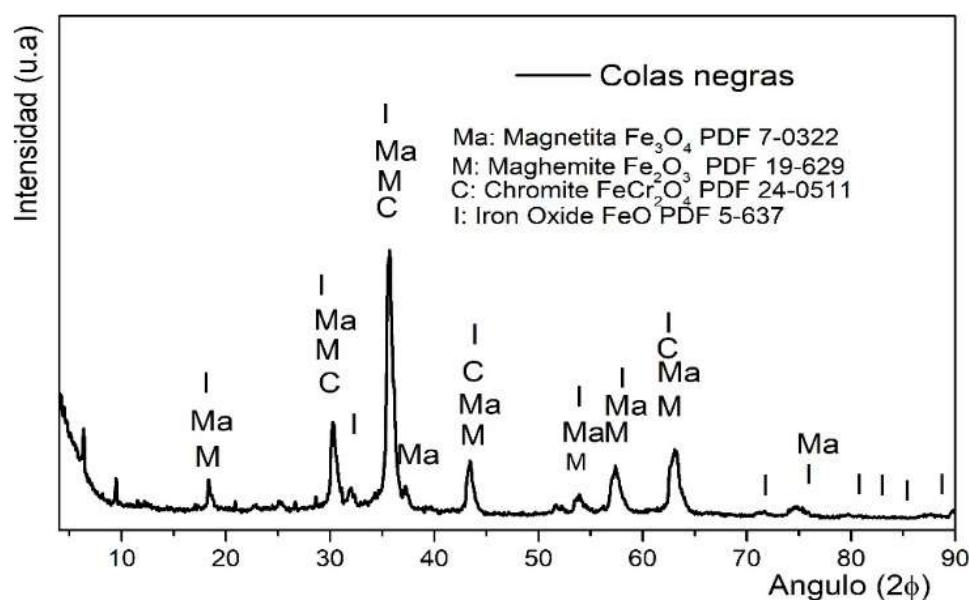


Figura 3. Difractograma de las muestras de colas negras.

También se aprecian picos de difracción que pueden corresponder a fases secundarias como la cromita FeCrO_4 (PDF 24-0512), Mg-cromita $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Cr}_2\text{O}_3$ (PDF 24-0512), óxidos mixtos de magnesio, hierro, cromo y aluminio $(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$ (PDF-9-353) y fayalita $(\text{Fe}, \text{Mg})_2(\text{SiO}_4)$. Estos resultados corroboran lo obtenido por otros autores (Rojas-Purón, 2003; Rojas-Purón y Turro-Breffe, 2003; Medina *et al.*, 2008; Cabrera *et al.*, 2011).

3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Teniendo en cuenta las imágenes del SEM de las colas negras (Figura 4) puede apreciarse que estos residuos presentan tamaños de partículas por debajo de $1 \mu\text{m}$, además de que predominan las partículas de formas redondeadas y alargadas, lo que se puede observar en toda la región de las imágenes.

También se observan agregados de las partículas que tienden a agruparse formando grandes conglomerados, esto ocurre como resultado del proceso de reducción al cual es sometido el mineral laterítico durante el proceso industrial, como se ha reportado por otros autores (Medina *et al.*, 2008).

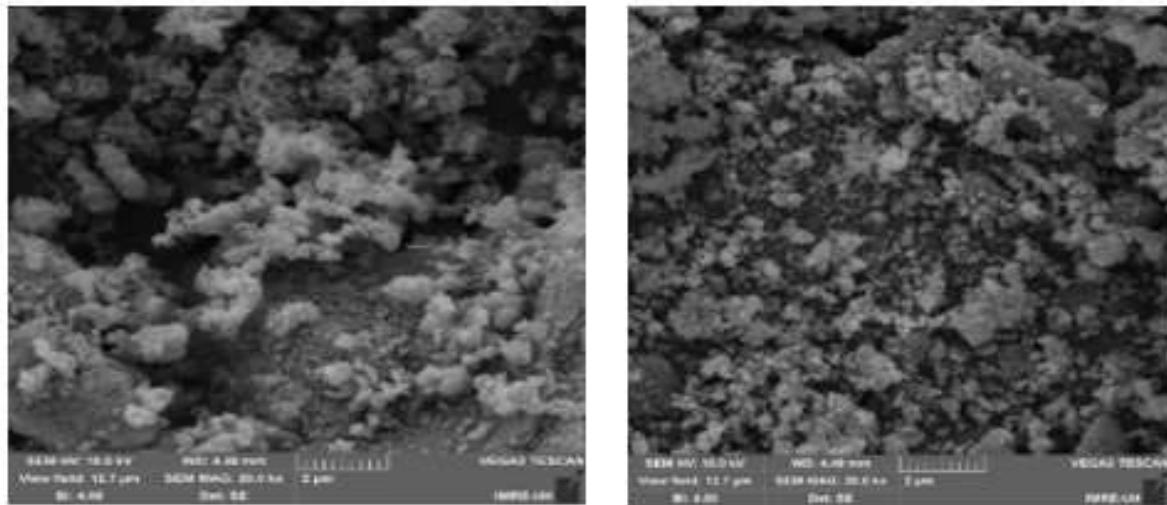


Figura 4. Imágenes de SEM de las colas negras.

3.3. Resultados del análisis químico de los licores de la lixiviación

Los valores promedios de la concentración de los principales elementos al concluir el proceso, según el diseño de experimento descrito, se muestran en la Tabla 5 y se grafica en la Figura 5, para resaltar la preponderancia del hierro en los licores.

Tabla 5. Concentración promedio de metales en los licores (g/L)

Condiciones experimentales	Ni	Co	Fe	Mn	Zn	Mg	Na	Ca
T: 80; C(x):7	0,190	0,033	12,005	0,006	0,437	4,815	0,473	0,014
T: 40; C(x):7	0,200	0,036	16,875	0,007	0,563	4,820	0,514	0,015
T: 40; C(x):5	0,382	0,070	32,255	0,007	0,514	2,943	0,266	0,017
T: 80; C(x):5	0,262	0,049	31,623	0,007	0,415	2,557	0,241	0,017

T: tiempo, min; C: Concentración del ácido sulfúrico, mol/L

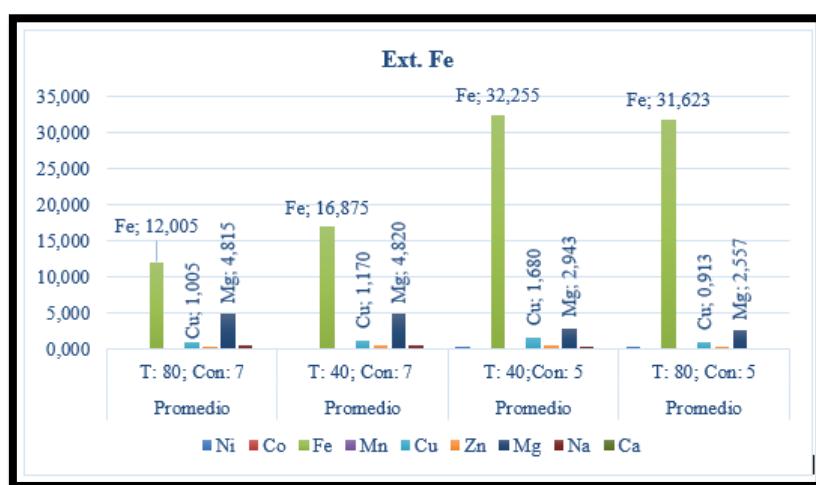


Figura 5. Valores de concentración promedio (g/L) del hierro y otros metales en los licores.

3.4. Evaluación del diseño de experimento

La Tabla 6 expone los resultados de los ensayos programados por el diseño experimental, mientras que la Tabla 7 muestra los resultados promedios de la extracción del hierro para cada prueba realizada mediante el diseño de experimento.

Tabla 6. Porcentajes de extracción de hierro para cada corrida

Factores			Extracción de hierro (%)
Corrida	(A)	(B)	Respuesta
1	40	5	52,20
2	80	5	69,49
3	40	7	86,00
4	40	5	67,93
5	80	7	92,59
6	80	5	71,46
7	40	7	89,91
8	80	7	91,91
9	40	7	87,96
10	40	5	66,67
11	80	5	66,50
12	80	7	93,26

Tabla 7. Eficiencia promedio de la extracción del hierro mediante la lixiviación ácida

Condiciones de la prueba	Eficiencia de Extracción (%Fe)
T: 80; C(x): 7	61,2
T: 40; C(x): 7	45,1
T: 40; C(x): 5	27,7
T: 80; C(x): 5	43,0

A continuación, se muestra el gráfico de Pareto y el gráfico de los efectos principales, de la evaluación de los datos obtenidos a partir del diseño de experimento (Figura 6).

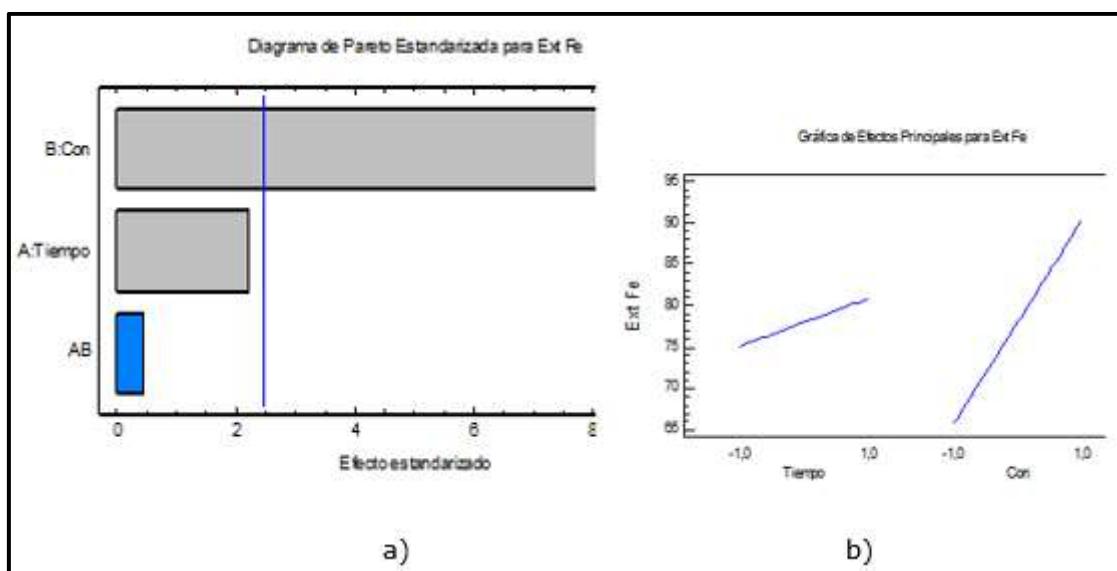


Figura 6. a) Gráfico de Pareto; b) Gráfico de efectos principales.

La ecuación (2) es la del modelo ajustado

$$Ext\ Fe = 78,0175 + 12,254 * Con\ reac + 2,855 * tiempo \quad (2)$$

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 91,34 % de la variabilidad en la extracción del hierro. De acuerdo con la ecuación de regresión y el diagrama de Pareto del análisis del diseño de experimento aplicado a la lixiviación ácida de las colas negras, se observa que la variable concentración del ácido sulfúrico influye de forma positiva y en mayor medida

que la variable tiempo, en el porcentaje de extracción de hierro durante la lixiviación de las colas.

3.5. Evaluación de los residuos sólidos de la lixiviación de colas negras

Como resultado de la corrida del diseño de experimento se obtuvieron licores con un pH ácido, 1,5 unidades aproximadamente, y un residuo sólido, los cuales fueron caracterizados desde el punto de vista físico-químico. Luego de la lixiviación se logra más del 60 % de extracción del hierro. La Figura 7 muestra los resultados de DRX de los residuos sólidos después de la lixiviación.

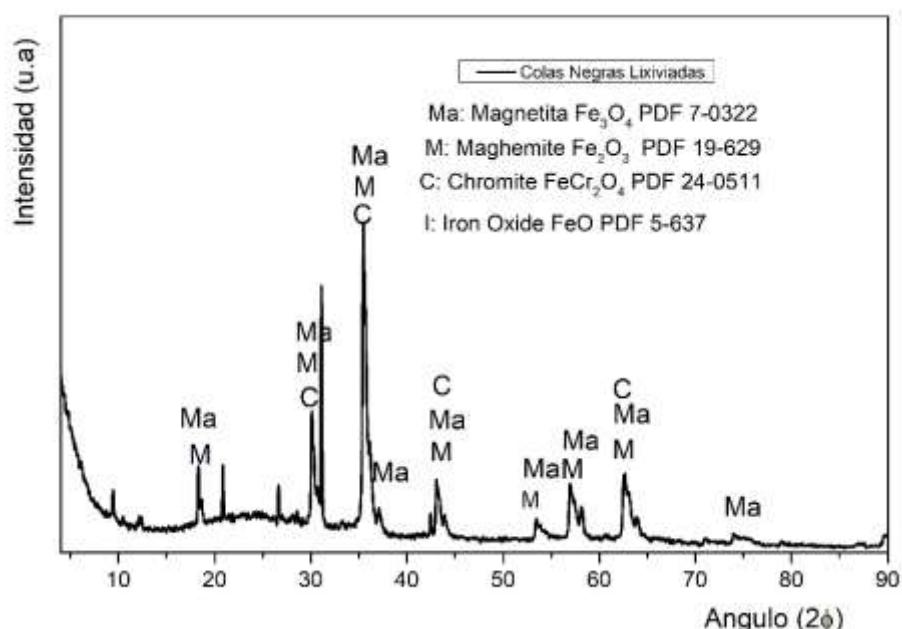


Figura 7. Diffractogramas del residuo sólido de la lixiviación con ácido sulfúrico de las colas negras.

Los resultados de DRX indican que no tuvo lugar cambios significativos en las fases mineralógicas, correspondiendo el cuadro difractométrico con los patrones de maghemita y magnetita fundamentalmente, y coincidiendo con lo reportado por otros autores (Cabrera *et al.* 2011; Rojas-Purón y Turro-Breffe 2003; Medina *et al.* 2008).

3.6. Precipitación del concentrado de hierro a partir de los licores resultantes de la lixiviación

Como producto de la precipitación, bajo las condiciones experimentales establecidas, se obtiene un precipitado de color marrón con un alto porcentaje de hierro en su composición (Tabla 8).

Tabla 8. Composición química promedio del concentrado de hierro precipitado (%)

Elementos (%)									
Ni	Co	Fe	Mn	Cu	Zn	Mg	Na	Ca	
0,599	0,111	47,13	0,519	0,0087	0,012	3,120	0,009	0,019	

El difractograma de la Figura 8 indica la formación de una fase cristalina, con picos de difracción definidos, que, al comparar con los patrones registrados en la base de datos, se aprecia una similitud con la fase cristalográfica de la goethita FeOOH (PDF 2-272) (Yang *et al.*, 2021; El-Issmaeli *et al.*, 2023).

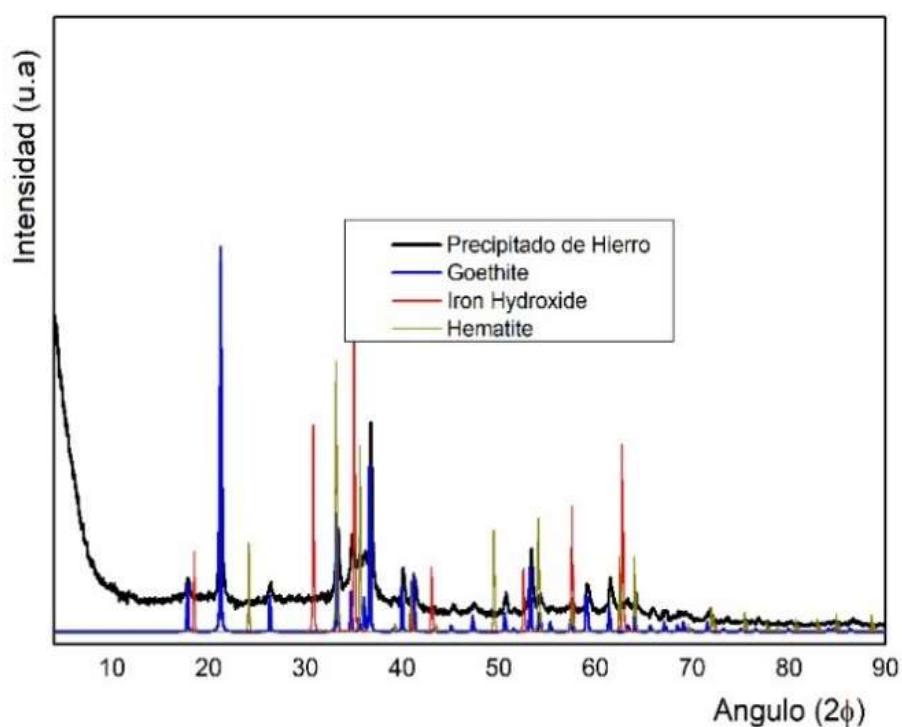


Figura 8. Difractograma del sólido obtenido después de la precipitación del licor producto.

4. CONCLUSIONES

- Se demuestra la viabilidad técnica de extraer hierro (hasta un 62 % de eficiencia) desde las colas negras (~44 % Fe) mediante lixiviación ácida con H_2SO_4 , en la cual la concentración del ácido es el factor de operación más significativo.

- Como resultado de la síntesis de hidróxido de hierro, a partir del licor obtenido de la lixiviación ácida de las colas negras, se obtiene un sólido, donde la fase principal es la goethita (FeOOH), con un contenido de hierro de 47,13 %; validando su potencial como material precursor para aplicaciones electroquímicas.

5. REFERENCIAS

- Angulo-Palma, H. J., Legrá, Á. L., Urgellés, A. L., Pedrera, C. H., Gallegos, S., Galleguillos, M. F. M., and Toro, N. (2024). Use of a mixture of coal and oil as an additive for selective reduction of lateritic ore by the Caron process. *Hemisjska industrija*, 78(1), 17-27.
<https://doi.org/10.2298/HEMIND230118017A>
- Cabrera, G., Gómez, J. M., Hernández, I., Coto, O., y Cantero, D. (2011). Different strategies for recovering metals from CARON process residue. *Journal of hazardous materials*, 189(3), 836-842.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.048>
- Cisneros-Sánchez, D., Otero-Calvi, A., Quesada-González, O., Sosa-Martínez, M., y Capote-Flores, N. (2021). Síntesis del hidróxido de níquel (II) con disolución multicomponente de la lixiviación de sulfuro de la tecnología Caron. *Revista Colombiana de Química*, 50(2), 49-57.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v50n2.89644>
- Díaz-Bello, S. C. (2016). *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. Oscar Jaime Restrepo Baena (Tutor). (Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia). 121 p.
<https://bfffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/65d73ef2-341d-4da7-8ce5-5f110ffb64c3/content>
- El-Issmaeli, Y., Lahrichi, A., Kalanur, S. S., Natarajan, S. K., and Pollet, B. G. (2023). Recent advances and prospects of FeOOH-based electrode materials for supercapacitors. *Batteries*, 9(5), 259.
<https://doi.org/10.3390/batteries9050259>
- Fernández-Bao, S. (2020). *Diseño de experimentos: diseño factorial*. Pablo Buenestado Caballero (Tutor). (Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona).
<https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/f0fb825d-bc69-4947-8b52-26b3f0eb047c/content>
- Fernández, A. D., Sariol, L. R., Ramos, E. D., Coto, O., Gómez, A. C., Pérez, J. A. A., y Padilla, M. (2015). *Biolixiviación de colas del proceso carbonato amoniacoal empleando microorganismos autótrofos*. VI Congreso Cubano de Minería. Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas. La Habana, Cuba.

http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015_Fernandez_MIN1-P17.pdf

García-Peña, E., de los Milagros Palacios-Rodríguez, A., Rodríguez-Torres, M., y Hernández-Cordero, Y. (2013). Lixiviación ácida de residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacial. *Minería y Geología*, 29(1), 17-28. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223527546002>

Linden, D. and. Reddy, T.B. (2001). *Handbook_of_batteries*. 3 ed, McGraw-Hill, New York, 1454 p.

<https://dl.icdst.org/pdfs/files/b334382400c223631bea924f87b0a1ba.pdf>

Medina, M. P., Cabrera, E. M., Ortega, G. G., Borges, S. A., del Campo, A. S., y Hernández, J. F. (2008). Lixiviación de colas del proceso Caron con lixiviante orgánico: ácido acético y ácido piroleñoso. *Tecnología Química*, 28(3), 28-34. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543757003.pdf>

Medina, M. P., Cabrera, E. M., Ortega, G. G., Guilarte, Y. B., y Borges, S. A. (2006). Lixiviación de las colas del proceso carbonato amoniacial de extracción de níquel y cobalto con productos líquidos de la pirolisis del bagazo de caña. *Revista Cubana de Química*, 18(1), 134-136.

Miranda, L., Chaviano, R., y Miranda, J. R. (2000). Nuevas interpretaciones químico-mineralógicas de las menas lateríticas y serpentínicas a través del proceso pirometalúrgico en la tecnología carbonato-amoniacial. *Revista Cubana de Ciencias Químicas*, XIV(2), 2002.

Navarro-Breffe, Y. (2017). *Evaluación de las principales características físico-químicas del pasivo ambiental colas viejas para su posible uso industrial*. M.C. Ramírez Pérez y José Alberto Pons Herrera (Tutores). (Trabajo de Diploma, Universidad de Moa). 76 p.
<https://nинive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2556/yaimaris.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ONUDI (2023). *Programa de apoyo para el sector energético en Cuba – Eficiencia energética*. Ministerio de Energía y Minas (MINEM). Cuba.
https://mptf.undp.org/sites/default/files/documents/40000/prodoc_unido_onure_ue_26.04.2019.pdf

Palacios-Rodríguez, A., y García-Peña, E. (2014). Extracción de cobalto de escombros lateríticos mediante lixiviación ácida. *Minería y Geología*, 30(2), 73-86. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223531569005.pdf>

Pérez-González, R. L. (2022). *Desarrollo de dispositivos para almacenamiento de energía, utilizando materiales a base de carbono, óxidos y polímeros*. Jorge Roberto Oliva (Tutores). (Tesis doctoral, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C). 127 p.
<https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/5807/TES-DNM PerezGonzalezDise%c3%b1oDispositivos.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

- Ramírez-Pérez, M. C. (2002). *Estudio de beneficiabilidad de los escombros lateríticos de la región de Moa*. Alberto Hernández Flores y José Alberto Pons Herrera. (Tutores). (Tesis de Maestría, Universidad de Moa). 64 p. <https://nинive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1336/MariaCari dad.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rendón, J. G. y López, D. M. (2022). Oportunidades y retos de la integración de los recursos energéticos distribuidos hacia la transición a mercados energéticos más eficientes y resilientes. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/78d7c697-2d96-4957-af9f-8a8da8269486/content>
- Rojas-Purón, A. (2003). Características mineralógicas de los residuales no lixiviados del proceso Caron. Moa, Holguín, Cuba. *Revista Minería y Geología*, 19(1-2), 23-34.
- Rojas-Purón, A. L., y Turro-Breffe, A. (2003). Composición mineralógica de las colas del proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba. *Minería y Geología*, 19(3-4), 21-28. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/241>
- Sánchez-Guillén, C., Gaínza-Delgado, Y., y Magaña-Haynes, M. E. (2014). Evaluación de la extracción de níquel y cobalto en una mezcla de cola y lateritas fuera de balance. *Tecnología Química*, 34(3), 275-282. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v34n3/rtq06314.pdf>
- Sánchez, M. B., y Martínez, G. S. (2007). Estudio de la separación del Fe (III) de las disoluciones ácidas de la lixiviación de las colas de Nicaro con los ácidos sulfúrico y clorhídrico. *Revista Cubana de Química*, 19(3), 10-19. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543708002>
- Sánchez, M. B., Martínez, G. S. y Chacón, J. J. (2007). Estudio preliminar de la lixiviación de las colas de Nicaro con disoluciones ácidas de HCl y H₂SO₄. *Revista Cubana de Química*, 19(3), 3-9. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543708001.pdf>
- Valix, M., and Cheung, W. H. (2002). Effect of sulfur on the mineral phases of laterite ores at high temperature reduction. *Minerals Engineering*, 15(7), 523-530. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00069-9)
- Wang, K., Zhang, X., Zhang, X., Chen, D., and Lin, Q. (2016). A novel Ni(OH)₂/graphene nanosheets electrode with high capacitance and excellent cycling stability for pseudocapacitors. *Journal of Power Sources*, 333(30), 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.153>
- Yang, J., Chen, J., Wang, Z., Wang, Z., Zhang, Q., He, B., ... and Wei, L. (2021). High-Capacity Iron-Based Anodes for Aqueous Secondary Nickel-Iron Batteries: Recent Progress and Prospects. *ChemElectroChem*, 8(2), 274-290. <https://doi.org/10.1002/celc.202001556>
- Zu, G., Shen, J., Zhang, Z., Zhou, B., Wang, X., Wu, G., y Zhang, Y. (2017). Homogeneous deposition of Ni (OH) 2 onto cellulose-derived

carbon aerogels for low-cost energy storage electrodes. *RSC Advances*, 7(17), 10583-10591.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2017/ra/c6ra26566a>

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Contribución de autores

DACT: parte experimental, interpretación de resultados y aprobación de la versión final. EDA: experimentos, interpretación de resultados, redacción del original, referencias bibliográficas y aprobación de la versión final. ELN: experimentos, interpretación de resultados, redacción del original, revisión y aprobación de la versión final. YHP: revisión, corrección y aprobación de la versión final.

DAGT, <https://orcid.org/0000-0002-9535-0753>

EDA, <https://orcid.org/0000-0003-0805-6714>

ELN, <https://orcid.org/0000-0003-1325-5419>

YHP, <https://orcid.org/0000-0002-0427-2076>

Recibido:12/10/2025

Aceptado:01/11/2025