

Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en la sedimentación del proceso Caron

Effect of the substitution of oil additive by bituminous coal on the sedimentation of Caron process

Hugo Javier Angulo-Palma*¹ <https://orcid.org/0000-0002-5012-0348>

Angel Legrá-Legrá¹ <https://orcid.org/0000-0002-4456-6546>

Mario Andrés Navarro-Consuegra² <https://orcid.org/0000-0002-9313-079X>

Deisy Cisneros-Sánchez¹ <https://orcid.org/0000-0001-8664-842X>

Carlos Hernández-Pedreira³ <https://orcid.org/0000-0003-2572-0891>

¹Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Holguín, Cuba

²Universidad de Moa, Holguín, Cuba

³Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: hangulo@cil.moa.minem.cu

RESUMEN

En este estudio se determinó el efecto que tiene el uso del carbón bituminoso como aditivo reductor en el proceso de sedimentación de la primera etapa de lixiviación de la tecnología carbonato amoniacal. Para la ejecución de los experimentos se utilizaron el horno mufla y los reactores de lixiviación a escala de laboratorio del Centro de Investigaciones del Níquel. Se observó que el incremento de los contenidos de carbón bituminoso disminuye la velocidad de sedimentación y el porcentaje de sólido de las pulpas lixiviadas-sedimentadas a razón promedio de 0,071 m/h y 1,36 % respectivamente por cada porcentaje del aditivo añadido. La valoración económica-medioambiental demostró que no resulta conveniente utilizar porcentajes del aditivo reductor superiores a 2,52 %.

Palabras clave: aditivos reductores; carbón bituminoso y petróleo; sedimentación; proceso Caron.

ABSTRACT

In this study, the effect of the use of bituminous coal as a reducing additive in the sedimentation process of the first stage of leaching of the ammoniacal carbonate technology was determined. For the execution of the experiments, the muffle furnace and the leaching reactors on a laboratory scale of ``Centro de Investigaciones del Niquel`` were used. It was observed that the increase in bituminous coal content decreases the sedimentation rate and percentage of solids of leached-settled pulps at an average rate of 0,071 m/h and 1,36% respectively for each percentage of additive added. The economic-environmental evaluation showed that it is not convenient to use percentages of the reducing additive higher than 2,52%.

Keywords: reducing additives; bituminous coal and oil; sedimentation, Caron process.

Recibido: 05/05/2025

Aceptado: 28/08/2025

Introducción

El proceso Caron constituye una de las tecnologías más importantes para la extracción del níquel (Ni) y el cobalto (Co) a partir de las menas lateríticas. Comúnmente se denomina tecnología carbonato amoniacal y se basa en combinar procesos piro-hidrometalúrgicos, siendo su uso justificado cuando los contenidos de hierro (Fe) y Ni en los minerales en forma de óxidos superan los porcentajes de 35 y 0,9% respectivamente. ^(1,2)

La tecnología carbonato amoniacal se caracteriza por presentar un alto consumo energético, por lo que muchos investigadores consideran que actualmente resulta antieconómico su uso. ^(3,4)

Una de las principales variables que incide directamente en el gasto energético del proceso es el consumo de petróleo para garantizar sus operaciones en la etapa de tostación/reductora, por lo que en los últimos años se han realizado diferentes investigaciones con el objetivo sustituir el agente reductor. ^(4,5) Específicamente en Cuba se evaluó el uso de la sustitución del petróleo aditivo

(PT-25) por el carbón bituminoso (CB) en los procesos de reducción ^(5,6) y molienda ^(7,8) en las investigaciones precedentes.

La aplicación industrial de la propuesta tecnológica presenta como incertidumbre el desconocimiento que existe sobre el efecto del uso del carbón bituminoso como aditivo reductor en el proceso de sedimentación de la tecnología carbonato amoniacal, por lo que en este estudio se muestran evidencias que dan respuesta a dicha problemática.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Los resultados se procesaron con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurión XV y el Microsoft Excel.

Materiales

Los principales materiales utilizados fueron la mena laterítica, el petróleo tecnológico, el carbón bituminoso y el licor carbonato amoniacal. Angulo et al. ^(5,6) reportaron sus principales características.

Técnicas Analíticas

La técnica analítica que se utilizó fue la espectrometría de absorción atómica (EAA) para determinar las principales características químicas del mineral reducido. El equipo es del modelo SOLAR 929 UNYCAM, y se acopla con llama y generador de hidruros.

Equipos y utensilios

Los equipos que se usaron durante el estudio fueron el horno mufla y los reactores utilizados para lixiviar. En las investigaciones precedentes ^(5,6) se reportan sus características principales.

Para determinar la velocidad de sedimentación en la primera etapa de lixiviación se utilizó el método propuesto por Talmadge y Fitch. ⁽⁹⁾

Metodologías

Las metodologías que se utilizaron durante la investigación fueron:

1. Metodología para determinar el porcentaje de sólido de la pulpa sedimentada en la primera etapa de lixiviación.
2. Metodología para realizar la valoración económica.

Metodología para determinar el porcentaje de sólido de la pulpa sedimentada

1. Tomar un recipiente de 250 mL, purgándolo con Argón.
2. Añadir al recipiente purgado 200 mL de una solución carbonato amoniacal con una concentración de amoníaco en el rango de 80 a 85 g/L.
3. Pesar una masa de mineral resultante de la metodología 2.4.2 de 70 a 80 g para añadirla al recipiente de 250 mL, dejando suficiente muestra de mineral reducido para realizar los análisis de metálicos.
4. Introducir la mezcla formada en el paso 3 al reactor de lixiviación (figura 2.2), agregándole el resto del licor con concentración de amoníaco de 80 a 85 g/L hasta llevarlo a una relación líquido/sólido de 10 a 1.
5. Agitar la mezcla con relación líquido/sólido de 10 a 1 durante dos horas.
6. Dejar en reposo, y decantar el licor clarificado de la pulpa hasta que presente una relación líquido/sólido de 6 a 1.
7. Añadir la pulpa con relación líquido/sólido de 6 a 1 en una probeta previamente graduada.
8. Determinar la masa y el volumen de la pulpa añadida a la probeta.
9. Agitar la pulpa moderadamente y dejar en reposo durante 24 horas.
10. Decantar el licor clarificado, determinándose su masa y volumen.
11. Determinar el volumen de la pulpa sedimentada, y su masa por diferencia del peso entre el peso entre las masas de pulpa y licor determinadas en los pasos 8 y respectivamente.
12. Determinar la densidad de la pulpa sedimentada a partir de los valores de su masa y volumen.
13. Determinar el porcentaje de sólido de la pulpa sedimentada a partir de la expresión 1.

$$\%X = \left[\frac{\rho_s(\rho_p - \rho_l)}{\rho_p(\rho_s - \rho_l)} \right] \cdot 100 \dots (1)$$

donde:

ρ_s , ρ_p , ρ_l es la densidad del sólido, la pulpa y el licor respectivamente; kg/m^3 .

$\%X$ es el porcentaje de sólido de la pulpa sedimentada.

Metodología para la valoración económica

1. Determinar el flujo másico de la suspensión inicial (G_{in}) a la entrada del sedimentador de acuerdo a partir de la expresión 2 propuesta por Pavlov y Noskou. ⁽¹⁰⁾

$$G_{in} = \frac{F_{sed} \cdot \rho_m \cdot 0,5 \cdot u_{sed}}{1 - \frac{c_{in}}{c_{s. conc}}} = \frac{4\,747,20 \text{ (m}^2\text{)} \cdot 1,02 \text{ (t/m}^3\text{)} \cdot 0,5 \cdot u_{sed} \text{ (m/h)}}{1 - \frac{c_{in}}{c_{s. conc}}} \dots (2)$$

donde:

G_{in} es el flujo másico de suspensión inicial, t/h.

F_{sed} es el área de sedimentación en el sedimentador, m^2 .

ρ_m es la densidad del licor clarificado, t/m^3 .

c_{in} y $c_{s. conc}$ son las concentraciones másicas de la fase sólida en la suspensión inicial y concentrada (lodo) respectivamente.

u_{sed} es la velocidad de sedimentación

2. Determinar el flujo de mineral reducido (t/h) para cada porcentaje de carbón bituminoso, considerando una relación líquido/sólido de 6/1.

3. Determinar la diferencia entre los valores obtenidos de los flujos de mineral reducido, utilizando como aditivo reductor al CB (F_{MR-CB}), y el petróleo (F_{MR-P25}).

4. Determinar el beneficio económico a partir de la expresión 3.

$$BE = C_{MR} \left(\frac{\text{USD}}{\text{t}} \right) \cdot [F_{MR-CB} - F_{MR-P25}] \text{ (t/h)} = 9\,500 \left(\frac{\text{USD}}{\text{t}} \right) \cdot [F_{MR-CB} - F_{MR-P25}] \text{ (t/h)} \dots (3)$$

donde:

BE es el beneficio económico, USD/h.

C_{MR} es el costo para producir una tonelada de mineral reducido, USD/t.

Resultados y discusión

Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de sedimentación

En la figura 1 se presenta el comportamiento de velocidad de sedimentación de las pulpas lixiviadas en la primera etapa del proceso Caron al utilizar diferentes porcentajes de CB como aditivo reductor, donde sus valores oscilaron en los rangos de 0,85 a 1,14 m/h. Estos resultados coinciden con los valores obtenidos por diferentes investigadores ^(10,11,12).

Su comportamiento indica que a medida que aumenta el contenido de CB disminuye la capacidad de separación entre el licor clarificado y la cama de sólidos a razón promedio de 0,071 m/h por cada porcentaje del aditivo incrementado.

Los valores de velocidad de sedimentación se relacionaron con el incremento del porcentaje del CB mediante el modelo Y inverso – X cuadrado, con un coeficiente de determinación de 0,9988 y un error estándar del estimado de 0.0067.

Resulta importante señalar que al utilizar un porcentaje superior a 2,73% de CB, los valores de velocidad de sedimentación son inferiores a los que se logran al utilizar como aditivo reductor un 2,5% de petróleo (punto señalado en el gráfico).

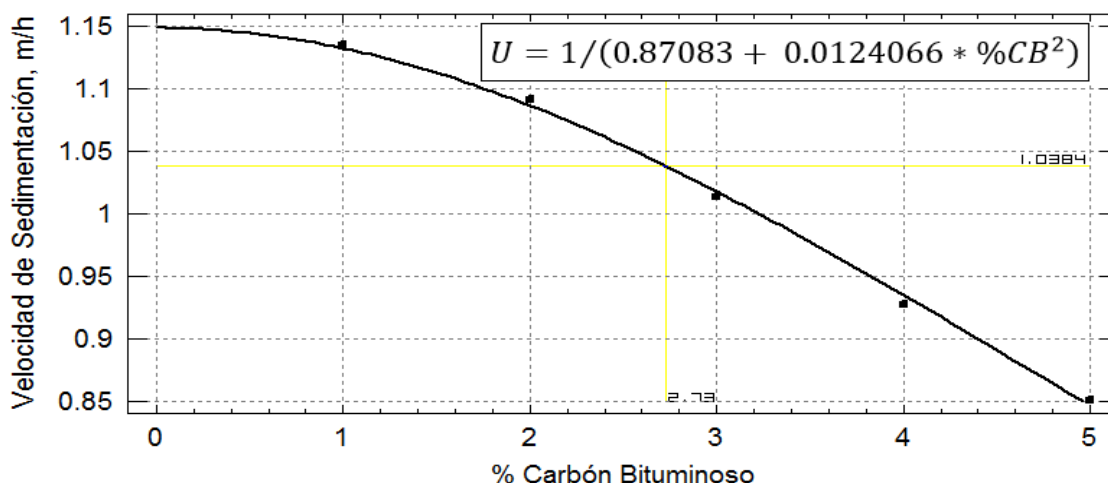


Fig. 1- Relación entre la velocidad de sedimentación y el porcentaje de carbón bituminoso.

En la figura 2 se muestra el comportamiento del porcentaje de sólido de la pulpa sedimentada en la primera etapa de lixiviación en función del incremento del porcentaje de CB.

Se observa que ambas variables son inversamente proporcionales, disminuyendo el porcentaje de sólido promedio en 1,36% por cada porcentaje del aditivo añadido. El modelo que mejor relacionó los valores fue el de Y-cuadrado, con un coeficiente de determinación de 0,977 8.

El punto señalado en la figura indica que al utilizar porcentajes de CB superiores a 2,73% en el proceso de reducción, las pulpas sedimentadas presentan porcentajes de sólidos inferiores a las que se consiguen mediante el uso del aditivo reductor PT-25.

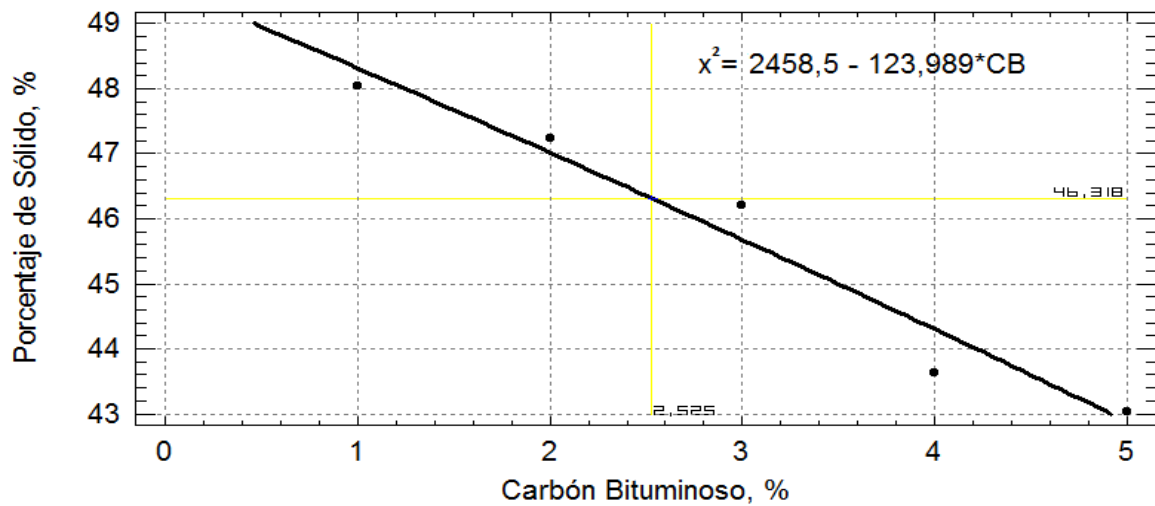


Fig. 2- Relación entre los porcentajes de sólido de la pulpa y el carbón bituminoso.

Valoración económica-medioambiental

En la figura 3 se presenta el comportamiento del beneficio económico en función de los diferentes porcentajes de CB que se analizaron, donde se observa que al utilizar un porcentaje de CB superior a 2,52% el proceso metalúrgico resulta irrentable económicamente.

Esta irrentabilidad del proceso se justifica por la disminución del área de sedimentación disponible en la planta de Lixiviación y Lavado, debido al aumento del tiempo de residencia que necesitaría la pulpa en el interior del sedimentador para lograr un eficiente proceso de separación sólido/líquido; lo que trae como consecuencia que la planta de Hornos de Reducción tenga que

disminuir su productividad para evitar derrames de soluciones amoniacales, que pudieran afectar la salud de los trabajadores y ocasionar grandes pérdidas económicas a la empresa. Es importante señalar que la disminución de la productividad de los hornos provoca también que exista un sobreconsumo de la energía; producto a que se debe mantener el perfil térmico, sin el procesamiento óptimo de las menas lateríticas, para evitar el deterioro mecánico de estos equipos por variaciones bruscas de la temperatura.

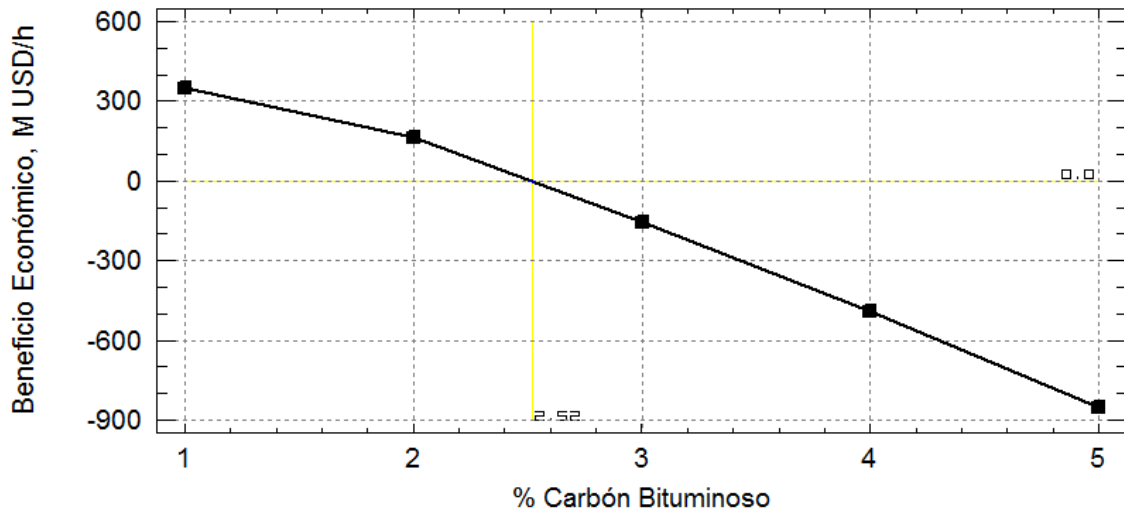


Fig. 3- Beneficios y pérdidas debido a la sustitución de aditivos.

Conclusiones

1. El incremento del porcentaje del carbón bituminoso en la etapa de reducción del proceso Caron provoca una disminución de la velocidad de sedimentación y el porcentaje de sólido de la pulpa lixiviada-sedimentada promedio a razón de 0,071 m/h y 1,36 % respectivamente.
2. La utilización de un porcentaje de carbón bituminoso superior a 2,52 % no resulta factible desde el punto de vista económico-medioambiental.

Referencias bibliográficas

1. ANGULO PALMA, Hugo Javier, et al. Post-combustion Effect on Nickel and Cobalt Extractions from the Caron Process. In: Bindhu V., R. S. Tavares J.M., Țălu Ș. (eds) *Proceedings of Fourth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology*. Springer, Singapore, 2022: p. 515-527. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43.
2. ROJAS VARGAS, A.; MAGAÑA HAYNES, M.E. & RIVERÓN, A.R. Lixiviación carbonato amoniacal: estimación del níquel disuelto en el efluente de destilación. *Revista de metalurgia*. 2019, **55**(3): p. e149-e149. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.149>.
3. ILYAS, S.; KIM, H. & SRIVASTAVA, R.R. Carbothermic Reduction Roasting of a Low-Grade Nickel Laterite Ore in the Modified Caron Process. In: Anderson C. et al. (eds) *Ni-Co 2021: The 5th International Symposium on Nickel and Cobalt*. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, 2021: p. 317-328. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65647-8_27.
4. ILYAS, S.; SRIVASTAVA, R.R.; KIM, H.; ILYAS, N. & SATTAR, R. et al., Extraction of nickel and cobalt from a laterite ore using the carbothermic reduction roasting-ammoniacal leaching process. *Separation and Purification Technology*. 2020. **232**: p. 115971. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115971>.
5. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ-LEGRÁ, Angel, HERNÁNDEZ PEDRERA, Carlos, LAMORÚ URGELLÉS, Alisa & TORO VILLARROEL, Norman. Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo. *Tecnología Química*. 2020, **40**(1): p. 91-101. ISSN 2224 6185
6. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ-LEGRÁ, Ángel, HERNÁNDEZ PEDRERA, Carlos., LAMORÚ URGELLÉS, Alisa & VEGA CALA, J. R. Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en el proceso de reducción de lateritas. *Tecnología Química*. 2018, **38**(3): p. 613-625. ISSN 2224 6185

7. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ-LEGRÁ, Ángel & COELLO VELÁZQUEZ, Alfredo Lázaro. Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Sinergia Académica*. 2020 **3**(2): p. 22-31. doi: <https://doi.org/10.51736/sa.v3i2.16>.
8. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ-LEGRÁ, Ángel & HERNÁNDEZ PEDRERA, Carlos. Modelos para determinar variables importantes en el proceso Caron. Parte I: Consumo específico de energía en molienda. *Opuntia Brava*. 2021, **13**(3): p. 149-157. ISSN 2222 081X
9. ALAK, De. Design of Thickeners. En *Sedimentation Process and Design of Settling Systems*. Springer, 2017: p. 309-327. ISSN 2363-7633
10. JIMÉNEZ GUILARTE, M. Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología carbonato-amoniaco y su influencia en el consumo de energía de los sedimentadores. (Tesis para optar por el título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica: Moa-Cuba. 2014.
11. ESPINOSA ESPINOSA, E. & BEYRIS MAZAR, P.E. Comportamiento de la sedimentación utilizando floculantes a escala de laboratorio en pulpas lixiviadas en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, Cuba. *Minería y Geología*. 2016, **32**(3): p. 147-158. ISSN 1993-8012
12. LEGRÁ-LEGRÁ, Ángel, ANGULO PALMA, Hugo Javier & LAMORÚ URGELLÉS, Alisa, Evaluar el comportamiento durante el proceso de reducción y lixiviación de una mezcla de los minerales de los yacimientos Camarioca Este (CE), Punta Gorda (PG), Yagrumaje Norte (YN) y Yagrumaje Sur (YS) previstos a alimentar al proceso productivo de la ECG durante el año 2022. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel “Capitán Alberto Fernández Montes de Oca”. Moa, Holguín-Cuba. 2022.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Hugo Javier Angulo Palma: realizó el informe previo y dirigió el estudio completo.

Ángel Legrá Legrá: participó en el estudio y revisó el informe final.

Mario Andrés Navarro Consuegra: participó en el estudio.

Deisy Cisneros Sánchez: orientó metodológicamente y revisó el informe final.

Carlos Hernández Pedrera: orientó metodológicamente y revisó el informe final.