

Antecedentes y perspectivas del uso de aditivos reductores en la tecnología carbonato-amoniaca para menas lateríticas

Background and perspectives on the use of reducing additives in carbonate-ammonia technology for lateritic ores

Yaine Hernández-Bordonado¹, Roger Samuel Almenares-Reyes², José Alberto Pons-Herrera², Eliveydis Mosqueda-Pérez³, Carlos Hernández-Pedraza⁴, Hugo Javier Angulo-Palma^{2,3*}, Yoalby Retirado-Mediaceja^{2,5*}

¹Empresa Productora de Níquel y Cobalto *Comandante Ernesto Che Guevara*, Holguín, Cuba.

²Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

³Centro de Investigaciones del Níquel *Capitán Alberto Fernández Montes de Oca*, Holguín, Cuba.

⁴Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

⁵Academia de Ciencias de Cuba, Sección de Ciencias Técnicas, La Habana, Cuba.

*Autores para la correspondencia: hangulo@cil.moa.minem.cu; yretirado@ismm.edu.cu

Resumen

Los aditivos reductores se consideran variables clave para garantizar la eficiencia metalúrgico-energética del proceso Caron durante la tostación/reducción de menas lateríticas. En este estudio se realizó una revisión del estado del arte sobre los principales avances que se asocian al uso de aditivos reductores en la tecnología carbonato-amoniaca. A partir de una revisión exhaustiva, en sitios académicos de alta visibilidad, se sintetizaron de forma narrativa los principales hallazgos con relación directa al tema objeto de estudio, mediante la combinación de enfoques retrospectivos y actuales. En general, se identificó que el objetivo principal de los aditivos reductores consiste en aprovechar la zona saprolítica del perfil laterítico, donde el empleo de la pirita y el azufre son los más significativos. Además, se demostró la necesidad de la sustitución del petróleo aditivo, que se implementa a escalas comerciables, por reductores sólidos porque este presenta como principales limitaciones el incremento de su costo en el mercado internacional y el bajo aprovechamiento que garantiza en la zona de reducción de los hornos de solera múltiples. Finalmente, aunque se evidencian avances significativos con la sustitución del petróleo por el carbón bituminoso, se recomienda la evaluación del carbón vegetal como alternativa

tecnológica para garantizar la sostenibilidad del proceso de tostación/reducción.

Palabras clave: aditivos reductores, tostación/reducción, proceso Caron, sostenibilidad metalúrgica

Abstract

Reducing agents are considered key variables for ensuring the metallurgical and energy efficiency of the Caron process during the roasting/reduction of lateritic ores. This study reviewed the state of the art regarding the main advances associated with the use of reducing agents in ammonia-carbonate technology. Based on a comprehensive review of high-visibility academic sources, the main findings directly related to the subject of study were synthesized narratively, combining retrospective and current approaches. In general, it was identified that the main objective of reducing agents is to utilize the saprolitic zone of the lateritic profile, where the use of pyrite and sulfur is most significant. Furthermore, the need to replace oil-based additives, which are implemented on a commercial scale, with solid reducing agents was demonstrated. The main limitations of oil-based additives are their increasing cost in the international market and the low efficiency they guarantee in the reduction zone of multiple-hearth furnaces. Finally, although significant progress has been made with the substitution of oil with bituminous coal, the evaluation of charcoal as a technological alternative is recommended to ensure the sustainability of the roasting/reduction process.

Keywords: reducing additives, roasting/reduction, Caron process, metallurgical sustainability

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología carbonato-amoniaca, conocida internacionalmente como proceso Caron, es una de las variantes establecidas actualmente para la extracción del níquel (Ni) y el cobalto (Co) en escalas comerciales (Rojas-Vargas *et al.*, 2022; Xiong *et al.*, 2024; Rojas-Vargas *et al.*, 2025; Acquah *et al.*, 2026; Chi *et al.*, 2026). Hasta la fecha, todas las plantas industriales se caracterizan por combinar procesos piro-hidrometalúrgicos para el procesamiento de menas lateríticas, siendo la etapa de tostación/reducción clave para garantizar costos de operación competitivos económicamente y la eficiencia metalúrgico-energética de la tecnología (Zevgolis & Daskalakis, 2022; Angulo-Palma *et al.*, 2025 a y b).

Históricamente, el proceso de tostación/reducción se desarrolla en hornos de soleras múltiples, del tipo Nichols-Herreshoff (Miranda-López, 2025). En general, es una etapa compleja en la que la mena laterítica, con humedad

inferior a 5 % y predominio de fracciones granulométricas inferiores a 74 μm (84%-88%), se pone en contacto directo con gases reductores a contracorriente para metalizar el Ni y Co de manera selectiva, de esta forma se logra un control estricto de la formación del hierro (Fe) metálico con valores inferiores al 5 % (Rojas-Vargas *et al.*, 2021; Angulo-Palma *et al.*, 2022).

Diferentes investigadores reconocen que las principales variables que inciden directamente en la etapa de tostación/reducción son las particularidades de la mena laterítica que se alimenta al proceso, las características operacionales del horno y el uso de aditivos reductores (Ramírez-Pérez & Ramírez-Serrano, 2021; Angulo-Palma, 2024).

En el caso de la utilización de aditivos reductores, a pesar de la existencia de investigaciones previas (Caron, 1950; Ilyas *et al.*, 2021; Angulo-Palma *et al.*, 2024), hasta este momento no se dispone de ningún estudio actual en el que se analicen sus principales antecedentes y las posibles perspectivas futuras a considerar para garantizar que la tecnología sea más atractiva desde el punto de vista económico-energético; razón que justifica el presente estudio.

El presente artículo expone el resultado de una revisión del uso de aditivos reductores en el proceso Caron. Para una mejor comprensión, el estudio se dividió en dos partes: evolución histórica de los principales antecedentes, y el análisis de la actualidad y perspectivas de los aditivos reductores en el proceso Caron.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la revisión del estado del arte se utilizaron las bases de datos académicas de alta visibilidad (*Web of Science*, Scopus y SciELO), así como los repositorios de algunas universidades cubanas y extranjeras.

A partir de una búsqueda de más de 4 830 000 resultados en Google Académico, sobre los aditivos reductores, se seleccionaron los estudios que especificaron en su título y sus palabras clave algunos de los constructos fundamentales para asegurar que la investigación se vincule directamente con el objetivo general propuesto. Para seleccionar los estudios más relevantes se realizaron varios procesos de filtrado (por indexación, alineación con la temática e importancia de la contribución). Luego del proceso de filtrado, se seleccionaron 296 publicaciones a procesar para el análisis final. Se garantizó que las referencias bibliográficas citadas finalmente estuvieran actualizadas en los últimos 10 años, con un porcentaje superior al 65 %.

Durante la confección del estudio se emplearon los siguientes métodos teóricos:

- **Histórico-lógico:** Para estudiar la evolución de los fenómenos que se vinculan con el proceso de tostación/reducción y el uso de aditivos reductores para procesar menas lateríticas en la tecnología Caron.
- **Análisis-síntesis:** Para descomponer las diferentes partes del proceso de tostación/reducción de menas lateríticas y establecer las relaciones esenciales que existen con respecto al uso de aditivos reductores.
- **Inductivo-deductivo:** Para realizar generalizaciones a partir de los hallazgos singulares que se identificaron durante la investigación.
- **Hipotético-deductivo:** Para establecer conclusiones particulares a partir de las deducciones propuestas en el estudio.

Es importante resaltar, además, que para su desarrollo se siguieron las recomendaciones propuestas por Grant & Booth (2009); ver Tabla 1.

Tabla 1. Recomendaciones utilizadas para realizar la revisión del estado del arte

Criterios	Métodos
Descripción	Se aborda la actualidad del uso de aditivos reductores en el proceso Caron, mediante la combinación de enfoques retrospectivos y actuales. Finalmente, se presentan las principales perspectivas para garantizar la sostenibilidad del proceso
Búsqueda	Se realiza una búsqueda exhaustiva de la literatura actual asociada a los aditivos reductores
Evaluación	No se realiza una evaluación formal de calidad
Síntesis	Narrativa
Análisis	Se analiza el estado actual del conocimiento de los aditivos reductores y se recomiendan prioridades para futuras investigaciones

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Principales antecedentes del uso de aditivos reductores en el proceso Caron

Desde que Caron (1924) patenta la tecnología carbonato-amoniaca, reconoce que durante la etapa de tostación/reducción se pueden utilizar agentes reductores líquidos, sólidos o gaseosos. Aunque la patente fue novedosa en sus inicios, no incluyó detalles del tipo de reductor, porcentaje

másico, modo de preparación e incorporación al proceso. Por esta limitación, en los años posteriores se desarrolla una nueva línea de investigación para evaluar el efecto de diferentes aditivos reductores durante el procesamiento de diferentes zonas del perfil laterítico.

En relación con el empleo de aditivos reductores, Caron (1950) publica los primeros estudios al evaluar la pirita (FeS_2), el cloruro de sodio (NaCl) y el cloruro de calcio (CaCl_2). Su investigación demuestra que la adición de FeS_2 es más efectiva al procesar menas de silicato de níquel hidratado, ya que incrementa las extracciones en más del 10 %, con la tendencia a disminuir en la medida que aumenta el porcentaje másico del Fe. Sus evaluaciones con el NaCl mostraron una disminución de la temperatura de reducción de 800 °C a 725 °C durante la alimentación de minerales con 26 % de dióxido de manganeso (MnO_2), con la posibilidad de lograr extracciones de Ni y Co entre 88,8 % y 98,3 %. En el caso de la utilización del CaCl_2 concluye que las extracciones de Ni aumentaron 4,3 %; sin que se generaran cambios en la temperatura de reducción.

Desde 1968 hasta 1980, se reportan diferentes estudios con nuevas evidencias sobre los beneficios del uso del azufre elemental (S) y la FeS_2 como aditivos reductores en la tecnología carbonato-amoniaco, durante el procesamiento de menas serpentínicas y de la zona de transición con porcentajes másicos de la sumatoria del magnesio-aluminio-silicio (Mg-Al-Si) entre 15,38 % y 20,19 % (De Graaf, 1979; Chandra *et al.*, 1980). En general, en estos trabajos se logra identificar que:

- La adición de 0,8 % de S en la tostación/reducción de minerales saprolíticos garantiza extracciones de Ni de 89 %.
- La utilización de 1,25 % de FeS_2 durante el procesamiento de minerales lateríticos de la zona de transición garantiza extracciones de Ni superiores al 90 %, a temperaturas de reducción entre 600 °C y 660 °C, producto a que el aditivo contribuye a la formación de estructuras porosas fácilmente lixiviables y a la capacidad para retardar la formación de silicatos refractarios.

A inicios de la década del 80, Canterford (1983) reporta el uso de un 2,5 % de fuel oil (PT-25) con alto contenido de azufre, como aditivo reductor en la planta de *Queensland Nickel Process* en Australia, para lograr extracciones de Ni cercanas al 80 %. Su alimentación en los hornos industriales se implementó mediante la adición directa del mineral en mezcladoras.

El efecto de la utilización de los aditivos FeS_2 y NaCl en el proceso de tostación/reducción selectiva de las menas saprolíticas cubanas se evaluó por

Castellanos-Suárez (1984a). Su estudio demuestra que el uso de 10 % de NaCl no genera ningún beneficio en el proceso pirometalúrgico, mientras que la incorporación del 10 % de pirita concentrada permite aumentar la recuperación de Ni entre un 15 % y 17 %.

Castellanos-Suárez (1984b; 1985) determina la efectividad de la utilización del petróleo aditivo como agente reductor de las menas lateríticas cubanas de Nicaro en el proceso Caron a escala piloto. Para comprobar la influencia de la forma de incorporación del aditivo evalúa tres variantes: adición directa del mineral antes del proceso de molienda (3 % de aditivo), inyección de petróleo en la solera nueve (H-9) mediante una lanza (2,1 % y 3 % de aditivo) y utilización del gas pobre (esquema convencional con porcentajes de CO entre 18 % y 26 %). Las extracciones de Ni más altas se lograron al usar la primera variante, con un incremento entre 4 % y 5 %, respecto a los hallazgos que reportan con el esquema convencional.

Con el objetivo de disminuir la producción de gas reductor en la planta de Nicaro, en 1986 se analiza el efecto de utilizar asfaltita con un tamaño de partícula entre 1,5 mm y 3,0 mm y la mezcla de bagazo y NaCl. Al adicionar un 4,0 % de asfaltita reporta un incremento del extractable de Ni de 70,8 % a 82,2 % y Co de 56,7 % a 59,7 % en la reducción de un mineral serpentínico cubano con valores máxicos de Fe entre 15 % y 18 %; lo que permite sustituir hasta un 11,0 % el consumo de gas reductor al horno y una disminución del consumo de carbón antracita para la producción de gas pobre. Con el uso de un 4,0 % de bagazo y 1,0 % de NaCl adicional al gas reductor, se demuestra que es posible incrementar las extracciones de Ni en 3,5 %, en relación con el uso de gas reductor solamente (Sánchez-Guillén *et al.*, 2020).

En 1992 se examina la posibilidad de extraer Ni de un mineral de baja ley y con alta cantidad de Si. Sus logros demuestran que la temperatura óptima de reducción es 750 °C, independientemente de los reductores analizados (fuel oil y sus combinaciones con NaCl y FeS₂). Las extracciones de Ni más altas se obtuvieron con la combinación de 10 % de fuel oil, 10 % de NaCl y 1 % de FeS₂, con incrementos de la producción de Ni entre 6 % - 8 %, en comparación con las logradas con el fuel oil sin aditivos. El autor justifica sus hallazgos por el efecto catalítico del NaCl en la cinética de reducción del NiO y su combinación con la pronta deshidratación a temperaturas inferiores que genera la adición de la FeS₂ (Yang, 2014).

Entre 1991 y 1996 se sustituye el gas reductor por 2,5 % de PT-25 en la planta de Punta Gorda, Moa-Cuba. Aunque a diferencia de la planta de *Queensland Nickel Process* la agregación del aditivo se realiza directamente al mineral antes de la molienda; su implementación permite mejorar la

operatividad del proceso, incrementar la capacidad productiva de la planta y mejorar las condiciones laborales de los trabajadores (Llansana *et al.*, 2009).

Valix & Cheung (2002a y b) analizaron la influencia de utilizar S como aditivo reductor para procesar tres tipos de menas lateríticas: limonita, serpentina meteorizada y serpentina fresca. Concluyeron que adicionar un porcentaje de azufre de 5 % mejora las recuperaciones de Ni de todos los tipos de lateritas objeto de estudio. En el caso de las saprolitas, reportaron incrementos de conversión del Ni entre un 5 % y 8 % con temperaturas de reducción inferiores en 100 °C y 200 °C, respecto a las utilizadas sin aditivo (700 °C y 800 °C). Durante la reducción de la limonita, obtuvieron un aumento de la recuperación en 51,6 % durante la reducción a 600 °C. En general, todos los experimentos reportaron incrementos de la recuperación del Fe entre 8 % y 10 %.

A partir del año 2015, se evalúa el efecto que tiene la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso (CB) en el proceso Caron a escala de laboratorio, en general se demuestra que:

- Un 4 % de CB como aditivo reductor logra sustituir al PT-25 sin que se afecten las extracciones de Ni y Co, con una disminución de los costos del proceso en más de 23,55 millones de USD/año, estimación que refleja la diferencia de precios de los aditivos (Angulo-Palma *et al.*, 2018).
- Con una mezcla de 2 % CB y 1,25 % de fuel oil (CB20-PT12,50) se logran las máximas extracciones de Ni y Co (valores de 90,7 % y 68,3 %, respectivamente) en la etapa de tostación/reducción del proceso Caron, con la disminución de los costos del proceso en aproximadamente 15,52 millones de USD/año, lo cual puede ser atribuible a la diferencia de precios de los aditivos (Angulo-Palma *et al.*, 2020).
- La utilización de un porcentaje de CB inferior al 4 %, no genera incrementos en el consumo específico de energía en el proceso de molienda (Angulo-Palma *et al.*, 2020, 2021).
- El uso de porcentajes de CB inferiores al 2,52 %, no provoca disminuciones de la velocidad de sedimentación en la primera etapa del circuito de Lixiviación y Lavado (Angulo-Palma *et al.*, 2025c).

Tittle-Basulto (2018) analiza la influencia de utilizar finos de carbón antracita como aditivo reductor a escalas de banco e industrial. Pudo observar que a medida que el porcentaje de carbón antracita aumenta hasta un 12 %, las extracciones se incrementan; mientras que al utilizarse una proporción superior las extracciones comienzan a disminuir. La mayor extracción de Ni y

Co se obtuvo al usar la mezcla de 2,0 % de fuel oil y 1,1 % de carbón antracita a 770 °C, con valores de 86,7 % y 58,9 % para el Ni y el Co, respectivamente. Finalmente, el estudio resultó económicamente inviable por el precio del carbón antracita; situación que se mantiene en la actualidad.

De Alvarenga-Oliveira *et al.* (2019) evaluaron por termogravimetría la reducción por hidrógeno y la descomposición térmica de un mineral de laterita de níquel silicio en condiciones del proceso Caron con la utilización del NaCl como aditivo reductor. Sus resultados muestran que la extracción de Ni puede incrementarse desde valores inferiores al 3 % hasta el 90 % con la incorporación de 1 % del aditivo, independientemente de la temperatura de reducción utilizada (hasta 850 °C), luego de lixiviar el mineral reducido con la solución amoniacal.

Sánchez-Guillén *et al.* (2020) investigaron el efecto de emplear el petcoke como aditivo reductor en el proceso Caron a escala de laboratorio. Concluyeron que su utilización resulta rentable con porcentajes iguales y superiores al 10 %. Los mejores rendimientos de extracción se alcanzaron con un 12 % del aditivo, con extracciones máximas de Ni y Co de 81,40 % y 64,30 %, respectivamente.

Ilyas y colaboradores iniciaron los estudios de la tostación/reducción carbotérmica, seguida de lixiviación amoniacal, de una mena de laterita de Ni de Bajaur-Pakistán para determinar su posible explotación a través del proceso Caron. Observaron que la condición de reducción óptima fue la mezcla de la mena laterita con 10 % en peso de carbón bituminoso y 9 % en peso de Na₂SO₄, reducida a 800 °C durante 120 minutos. A pesar de que la investigación resultó técnicamente factible, presentó como limitación el uso de un considerable Tiempo de Residencia (TR) y concentraciones de amoníaco (150 g/L) muy superiores a las establecidas en las plantas a escalas industriales (60 g/L -100 g/L) durante la etapa de lixiviación (Ilyas *et al.*, 2020, 2021).

Un análisis integral de la evolución histórica del uso de aditivos en el proceso de tostación/reducción de las menas lateríticas permite identificar que su principal objetivo es facilitar un mejor aprovechamiento de las diferentes zonas de los perfiles lateríticos, que en condiciones normales de operación no pueden utilizarse producto a la baja rentabilidad que generan. Resulta llamativo que, a excepción del uso del PT-25, los principales estudios se realizaron a escala de laboratorio, lo cual limita la reproducción total de la incidencia de las principales variables operacionales de la etapa de tostación/reducción; donde la baja disponibilidad de instalaciones a escalas comerciales (piloto e industrial) es el factor más determinante.

3.2. Actualidad y perspectivas futuras del uso de los aditivos reductores en el proceso Caron

A pesar de los diferentes estudios que se reportan sobre la utilización de los aditivos reductores en el proceso Caron, las plantas comerciales implementaron el PT-25 (Reid & Fittock, 2004; Rodríguez, 2004; Angulo-Palma *et al.*, 2021, 2025c; Rojas-Vargas *et al.*, 2025) como alternativa para evitar los gastos que se asocian a la preparación de otros reductores (ej.: gasificación del carbón antracita).

En general, la utilización del petróleo aditivo en el proceso Caron actualmente provoca dos grandes inconvenientes. El primero se asocia a la baja rentabilidad que generan los altos incrementos de precios de este portador energético en el mercado internacional. El segundo se debe a que el aditivo aporta los principales reductores en la zona de calentamiento de los hornos al ponerse en contacto con temperaturas superiores a los 300 °C, lo que provoca un desaprovechamiento de su potencial calórico en las zonas de reducción del horno (desde H-7 hasta H-16).

En el caso específico del proceso Caron en Cuba, además de las limitaciones antes mencionadas, se adiciona el efecto negativo que genera el aditivo en las instalaciones de molienda (Figura 1). Con relación a esto, Coello-Velázquez *et al.* (2020) reconocen que la alimentación del PT-25 antes del proceso de molienda provoca:

- Incremento de la clase + 0,149 mm en el mineral luego de la molienda.
- Aumento del consumo de fuel oil en el proceso, para contrarrestar las pérdidas de combustibles adheridas en las bolas y en las paredes del molino.
- Disminución de un 12 % de la productividad de los molinos.
- Incremento en más de 6 kWh/t el consumo específico de energía del proceso de molienda.

Además, la conjugación de estas limitaciones con períodos de disminuciones del precio del Ni y el Co en el mercado internacional y la pérdida de financiamiento han provocado el cierre de las principales plantas según las investigaciones que se consultaron en fuentes periodísticas de alto prestigio en Australia y Brasil (ABC-News, 2024; Excelência-Notícias, 2024), quedando solo en operación la planta de Punta Gorda en Moa-Cuba.

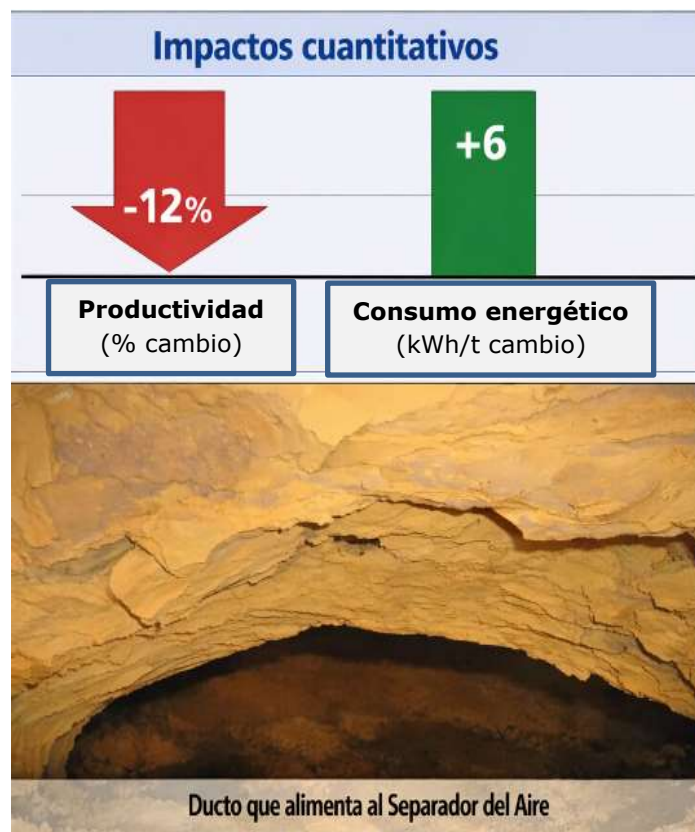


Figura 1. Adherencia de la mena laterítica en el circuito de molienda por la incorporación del petróleo aditivo.

Aunque el proceso Caron tiende a desaparecer a nivel global, la adecuada implementación de aditivos reductores a escala industrial en los próximos años será decisivo para garantizar su continuidad de manera más sostenible y económica. Con este propósito, en los últimos 10 años se ha continuado el desarrollo de investigaciones que abordan la utilización de aditivos sólidos como alternativa tecnológica para contrarrestar los efectos negativos que genera la utilización del PT-25 como aditivo reductor.

Bajo esta perspectiva, los estudios más significativos se orientaron a evaluar el uso de la asfaltita a escala de laboratorio y demostrar los beneficios de utilizar la mezcla CB20-PT12,50 a escala piloto (Angulo-Palma *et al.*, 2024, 2025a, 2025b, 2026). Aunque los avances recientes con el uso de estos aditivos resultaron prometedores, las investigaciones solo evaluaron reductores no renovables, lo cual constituye una limitación. Por ello, en el futuro se necesitan estudios que evalúen la tostación/reducción de menas lateríticas con el uso del carbón vegetal (CV) como aditivo. La comparación integral de los resultados que se obtengan para el CV (ventajas y desventajas técnicas, económicas y ambientales) con los reportados previamente para otros aditivos (Figura 2) serán la base para la toma de decisiones en relación

con la selección del aditivo a emplear en los próximos años en la industria cubana del níquel (Retirado-Mediaceja *et al.*, 2026).



Figura 2. Perspectivas de sustitución del PT-25 por el CV u otros aditivos.

En el caso específico de Cuba, las grandes extensiones de marabú (*Dichrostachys cinérea*) diseminadas principalmente en el centro del país y el desbroce de pino cubano (*Pinus cubensis*) que se genera por la minería de la tecnología carbonato-amoniacal son las opciones más disponibles para potenciar el desarrollo sostenible del proceso de tostación/reducción (Durán-Manual *et al.*, 2022; Méndez-Santos *et al.*, 2022; Valero-Jorge *et al.*, 2024; Baeza-Guzmán *et al.*, 2025; Fernández-Pedroso *et al.*, 2025; Gómez-Hechavarría *et al.*, 2025).

A futuro, aunque el carbón vegetal presenta un atractivo potencial como reductor renovable en el proceso Caron, su efecto en la tecnología debe de analizarse rigurosamente. En este contexto, los aspectos más importantes a considerar son:

- **Carbón fijo:** Producto a que el CV tiene valores superiores al CB, será necesario evaluar si puede reemplazar parcial o totalmente la cantidad de carbón presente en la mezcla CB20-PT12,50 sin afectar la eficiencia metalúrgica del proceso.
- **Formación de cenizas:** El CV puede tener un contenido de cenizas y elementos volátiles variable, por lo que en estudios futuros debe prestarse especial interés al efecto que puede generar la introducción de impurezas en el sistema de lixiviación y lavado y su posible afectación en la calidad de los productos finales de Ni y Co.
- **Riesgo de sobre reducción del Fe:** La alta reactividad del CV puede dificultar la selectividad del proceso, con un incremento de la metalización de una fracción significativa del Fe, lo que dificulta la posterior lixiviación

y disminuye la calidad del producto. Con este fin, será necesario evaluar si garantiza el mismo control que el CB con el uso de diferentes perfiles térmicos.

- **Baja densidad:** Esta característica implica un mayor volumen a manipular y transportar, así como un posible incremento de los arrastres en el horno, aspecto a considerar por posibles repercusiones negativas en la logística y la eficiencia energética del proceso.

4. CONCLUSIONES

- Los aditivos reductores se utilizan fundamentalmente en el proceso Caron como alternativas tecnológicas para garantizar el aprovechamiento de zonas del perfil laterítico poco aprovechables tradicionalmente, donde la piritita y el azufre muestran los efectos más significativos en relación con la eficiencia metalúrgica.
- La sustitución del petróleo aditivo por reductores sólidos, como es el caso del carbón bituminoso, resulta indispensable para eliminar las limitaciones actuales de la tecnología, asociadas al costo de operación y al aprovechamiento integral de la mena laterítica que entra al proceso.
- La evaluación a futuro del carbón vegetal como aditivo reductor es una alternativa tecnológica a considerar para garantizar la sostenibilidad de la etapa de tostación/reducción del proceso Caron, atendiendo a la amplia disponibilidad de la materia prima y la probada calidad de este tipo de carbón en otras aplicaciones industriales. La implicación práctica de esta innovación tecnológica para la industria niquelera cubana será objeto de estudio en próximas investigaciones.

5. REFERENCIAS

- ABC-News. (25 jul. 2024). Queensland Nickel creditors paid as Clive Palmer refinery business. [Consultado: 2/03/2026]. Disponible en: <https://www.abc.net.au/news/2024-07-25/queensland-nickel-creditors-paid-clive-palmer-refinery-business/104138708>.
- Acquah, G., Skinner, W., Abaka-Wood, G., Spiridonov, P., Addai-Mensah, J., & Asamoah, R. (2026). Extraction of Nickel and Cobalt from Complex Low-Grade Lateritic Ores: Challenges and Opportunities. *Minerals*, 16(3), 287. DOI: <https://doi.org/10.3390/min16030287>.
- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A., Hernández-Pedrerá, C., Lamorú-Urgellés, A., & Toro-Villaróel, N. (2020). Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo.

- Tecnología Química*, 40(1), 91-101. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n1/2224-6185-rtq-40-01-93.pdf>.
- Angulo-Palma, H. J., Saldana, M., Legrá, Á. L., Urgellés, A. L., Pedrera, C. H., Gallegos, S., Galleguillos, F. M. M. & Toro, N. (2025a). Kinetic behaviour of the roasting/selective reduction process with the use of a mixture of bituminous coal and fuel oil as the additive. *Hemijaska industrija*, 79(2), 69-77. DOI: <https://doi.org/10.2298/HEMIND240918005A>.
- Angulo-Palma, H. J. (2024). *Sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en el proceso de tostación/reducción de la tecnología Caron*. (Tesis Doctoral, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba).
- Angulo-Palma, H. J. Legrá, A. L., Urgellés, A. L., Gálvez, E., & Castillo, J. (2022). *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, p. 515-527. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43.
- Angulo-Palma, H. J., Legrá, Á. L., Urgellés, A. L., Pedrera, C. H., Gallegos, S., Galleguillos, M. F. M., & Toro, N. (2024). Use of a mixture of coal and oil as an additive for selective reduction of lateritic ore by the Caron process. *Hemijaska industrija*, 78(1), 17-27. DOI: <https://doi.org/10.2298/HEMIND230118017A>.
- Angulo-Palma, H. J., Toro, N., Castillo, J., Galleguillos Madrid, F. M., Salazar, I., Jamett, I., ... & Saldana, M. (2025b). New evidence of the effect of postcombustion during roasting/reduction of Nickel-Bearing Lateritic Ores. *Processes*, 13, 2602. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13082602>.
- Angulo-Palma, H. J., Salazar, I., Saldana, M., Castillo, J., Madrid, F. M. G., Leiva, W., ... & Toro, N. (2026). New Model to Predict Nickel Extraction from Lateritic Ores During the Roasting–Reduction of the Caron Process. *Minerals*, 16(3), 278. DOI: <https://doi.org/10.3390/min16030278>.
- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A. & Coello-Velázquez, A. L. (2020). Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Sinergia Académica*, 3(2), 22-31. DOI: <https://doi.org/10.51736/sa.v3i2.16>.
- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A., & Hernández-Pedrera, C. (2021). Modelos para determinar variables importantes en el proceso Caron. Parte I: Consumo específico de energía en molienda. *Opuntia Brava*, 13(3), 149-157. Disponible en: <http://200.14.53.83/index.php/opuntiabrava/article/view/1401/1690>.

- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A., Hernández-Pedrerá, C., Lamorú-Urgellés, A. & Vega-Cala, J. R. (2018). Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en el proceso de reducción de lateritas. *Tecnología Química*, 38(3), 613-625. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v38n3/rtq15318.pdf>.
- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A., Navarro-Consuegra, M. A., Cisneros-Sánchez, D. & Hernández-Pedrerá, C. (2025c). Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en la sedimentación del proceso Caron. *Tecnología Química*, 45, 391-401. Disponible: <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/download/5482/4929>.
- Baeza-Guzmán, Y., Camargo-Ricalde, S. L., Trejo-Aguilar, D. & Manuel-Montaño, N. (2025). Pine Forest Plantations in the Neotropics: Challenges and Potential Use of Ectomycorrhizal Fungi and Bacteria as Inoculants. *J. Fungi*, 11, 393. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof11050393>.
- Canterford, J. (1983). Oxide Ores of Nickel—The Australian Situation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1(1-2), 85-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/08827508308952590>.
- Caron, M. H. (1924). Process of recovering values from nickel and cobalt-nickel ores. U.S. Patent No. 1,487,145. Disponible en <https://patents.google.com/patent/US1487145A/en>.
- Caron, M. H. (1950). Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores. *JOM-Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2, 67-90. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03398981>.
- Castellanos-Suárez, J. (1984a). Reducción selectiva de los minerales serpentínicos empleando aditivos. *Revista Tecnológica*, 14, 39-43.
- Castellanos-Suárez, J. (1984b). Cinética de la reducción de los minerales oxidados de níquel en Cuba. *Minería y Geología*, 2(2), 197-222. Disponible: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/340/1364/4894>.
- Castellanos-Suárez, J. (1985). Efectividad de la utilización de petróleo aditivo como agente reductor en el proceso Caron. *Minería*, 15(1), 71-75.
- Chandra, D., Siemens, R. E. & Ruud, C. O. (1980). Electron-Optical Characterization of Laterites Treated with a Reduction-Roast/Ammoniacal-Leach System. *JOM*, 32, 26-33. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03354571>.
- Chi, D., Yu, J., Han, Y., Dong, Z., Gao, P., & Li, Y. (2026). Hydrometallurgical Technologies of Limonitic Nickel Laterite Ore for Carbon-Neutral

- Metallurgy: A Review. *JOM-Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-026-08139-2>.
- Coello-Velázquez, A.L., Llorente-Arce, L., García, A. & Campos, L. (2020). Efecto del petróleo aditivo en los indicadores energo-tecnológicos en los circuitos cerrados de molienda del mineral laterítico a nivel industrial. *Minería y Geología*, 36(3), 316-327. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v36n3/1993-8012-mg-36-03-316.pdf>.
- De Alvarenga-Oliveira, V., Dos-Santos, C. G. & De Albuquerque-Brocchi, E. (2019). Assessing the influence of NaCl on the reduction of a siliceous laterite nickel ore under Caron process conditions. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(3), 1309-1321. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01552-w>.
- De Graaf, J. (1979). The treatment of lateritic nickel ores—a further study of the caron process and other possible improvements: Part I. Effect of reduction conditions. *Hydrometallurgy*, 5(1), 47-65. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(79\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0304-386X(79)90027-6).
- Durán-Manual, F., Espinosa, J., Pérez-Pereda, E., Mediavilla, O., Geada-López, G., Dejene, T., ... & Martínez-Becerra, L. W. (2022). Prescribed burning in *Pinus cubensis*-dominated tropical natural forests: a myco-friendly fire-prevention tool. *Forest Systems*, 31(2), e012. DOI: <https://doi.org/10.5424/fs/2022312-19318>.
- EXCELÊNCIA-NOTÍCIAS. 21 jun. 2024. CBA e Wave Nickel anunciam cancelamento da venda da planta da antiga Votorantim Metais em Niquelândia. [Consultado: 2/03/2026]. Disponible en: <https://excelencianoticias.com.br/2024/06/21/cba-e-wave-nickel-anunciam-cancelamento-da-venda-da-planta-da-antiga-votorantim-metals-em-niquelandia..>
- Fernández-Pedroso, A.L., Vidal-Corona, A.M., García-García, T. & Pérez-Cabrera, I. (2025). Inventario de las áreas cubiertas de marabú, con fines energéticos, mediante la aplicación de SIGs. *Revista Forestal Baracoa*, 44, 1-5. Disponible en: <https://www.forestbaracoa.edicionescervantes.com/index.php/fb/article/view/843/971>.
- Gómez-Hechavarría, J. L., Bécquer, E. R. & González, P. A. (2025). Nuevos registros de plantas para la flora de Cuba. *Caribea*, 1(1), 1-21. DOI: <https://doi.org/10.70925/caribea1.1-21>.
- Grant, M. J. & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information and*

- Libraries Journal*, 26, 91-108. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>.
- Ilyas, S., Kim, H. & Srivastava, R. R. (2021). *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, p. 317-328. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65647-8_27.
- Ilyas, S., Srivastava, R. R., Kim, H., Ilyas, N. & Sattar, R. (2020). Extraction of nickel and cobalt from a laterite ore using the carbothermic reduction roasting-ammoniacal leaching process. *Separation and Purification Technology*, 232, 115971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115971>.
- Jiménez-Arce, A. (2025). *Reducción de los minerales lateríticos*. (Trabajo de Diploma, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba).
- Llansana, H. A., Navarro, E. L. & Pérez, I. M. R. (2009). Reseña histórica de la sustitución del gas de carbón antracita como reductor por petróleo añadido directamente al mineral. *Tecnología Química, Edición Especial*, 22-30. Disponible en: <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/download/1209/1189>.
- Méndez-Santos, I. E., Moya-López, C. E., Roquero-Gracia, L. (2022). Primeras evidencias científicas de la presencia del marabú (*Dichrostachys cinerea*) en Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 12(3), e1130. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1130>.
- Miranda-López, J. (2025). Desarrollo histórico del proceso de calcinación reductora de los minerales en un Horno tipo Nichols-Herreshoff. *Tecnología Química*, 45, 444-459. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v45/2224-6185-tq-45-444.pdf>.
- Ramírez-Pérez, I. M. & Ramírez-Serrano, B. (2021). Efecto de la postcombustión sobre los principales índices técnico-económicos en un horno Herreshoff para la producción de níquel. *Minería y Geología*, 37(4), 426-444. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v37n4/1993-8012-mg-37-04-426.pdf>.
- Reid, J. G. & Fittock, J. E. (2004). *Yabulu 25 years on*. In: International Laterite Nickel Symposium 2004. The Minerals, Metals & Materials Society, 599-618. ISBN: 0-87339-550-6.

- Retirado-Mediaceja, Y.; Angulo-Palma, H. J.; Almenares-Reyes, R. S.; Pons-Herrera, J. A.; Hernández-Pedrerá, C. (2026). *Perspectivas futuras del uso de aditivos reductores en el proceso Caron*. En: XII Simposio Internacional de Metalurgia y Materiales (METALMATER'26). XII Congreso internacional de aprovechamiento de recursos minerales (CINAREM'26). Moa.
- Rodríguez, R. (2004). *Reduction in energy cost in Cuban Caron Process Plants*. In: International Laterite Nickel Symposium 2004. The Minerals, Metals & Materials Society, 657-664. ISBN: 0-87339-550-6.
- Rojas-Vargas, A., Palma, H. J. A., AlJaberi, F. Y., Salman, A. D., Alardhi, S. M., Mohammed, M. M., ... & Ali, O. I. (2025). Nickel Mining: Studying the Kinetics and Modeling of Extraction Process from Laterite Ore. *South African Journal of Chemical Engineering*, 53, 362-372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.06.002>.
- Rojas-Vargas, A., Sánchez-Guillén, C., Magaña-Haynes, M. E. & Hernández-Pedrerá, C. (2021). Extracción potencial de níquel y cobalto con mineral laterítico de mina "Pinares de Mayarí" en la tecnología Caron. Parte I. *Tecnología Química*, 41(3), 519-531. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v41n3/2224-6185-rtq-41-03-519.pdf>.
- Rojas-Vargas, A., Sánchez-Guillén, C., Magaña-Haynes, M. E., & Hernández-Pedrerá, C. (2022). Extracción potencial de níquel y cobalto con mineral laterítico de mina "Pinares de Mayarí" en la tecnología Caron. Parte II. *Tecnología Química*, 42(3), 405-419. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v42n3/2224-6185-rtq-42-03-405.pdf>.
- Sánchez-Guillén, C., Gainza-Delgado, Y. & Magaña-Haynes, M. E. (2020). Utilización de petcoke como aditivo en la reducción de minerales a escala de laboratorio. *Tecnología Química*, 40(2), 442-451.
- Tittle-Basulto, L. (2018). *Evaluación de la sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita como aditivo en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. (Trabajo de Diploma, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa). Disponible en: <https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1706/TittleBasulto.pdf?sequence=1>.
- Valero-Jorge, A., González-De Zayas, R., Matos-Pupo, F., Becerra-González, A. L., & Álvarez-Taboada, F. (2024). Mapping and Monitoring of the Invasive Species *Dichrostachys cinerea* (Marabú) in Central Cuba Using Landsat Imagery and Machine Learning (1994–2022). *Remote Sensing*, 16(5), 798. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050798>.

- Valix, M. & Cheung, W. (2002a). Effect of sulfur on the mineral phases of laterite ores at high temperature reduction. *Minerals Engineering*, 15, 523–530. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00069-9).
- Valix, M. & Cheung, W. (2002b). Study of phase transformation of laterite ores at high temperature. *Minerals Engineering*, 15, 607–612. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00068-7).
- Xiong, X., Ma, B., Li, X., Yu, J., Shi, L., Wang, C. & Chen, Y. (2024). Hydrometallurgical process and recovery of valuable elements for limonitic laterite: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 73, 189–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.05.011>.
- Yang, J. (2014). *Selective Reduction of Laterite Ore*. (Doctoral dissertation, University of New South Wales, Sydney, Australia). DOI: <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.26190/unsworks/17225>.
- Zevgolis, E. N. & Daskalakis, K. A. (2022). The Nickel Production Methods from Laterites and the Greek Ferronickel Production among Them. *Materials Proceedings*, 5(1), 104. DOI: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005104>.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

YHB: Conceptualización, análisis formal, investigación, redacción del borrador inicial y redacción revisión y edición. **RSAR**: conceptualización, análisis formal, investigación, administración del proyecto, supervisión, redacción del borrador inicial y redacción revisión y edición. **JAPH**: análisis formal, investigación, metodología, redacción del borrador inicial y redacción revisión y edición. **EMP**: análisis formal, investigación, redacción del borrador inicial y redacción revisión y edición. **CHP**: análisis formal, investigación, metodología, redacción del borrador inicial y redacción revisión y edición. **HJAP**: conceptualización, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, administración del proyecto, supervisión, redacción del borrador inicial y redacción revisión y edición. **YRM**: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, redacción del borrador inicial y redacción revisión y edición del manuscrito final.

Financiamiento

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Oficina de Gestión de Fondos y Proyectos Internacionales bajo el código PN211LH005-050.

ORCID

YHB, <https://orcid.org/0009-0002-5029-1267>

RSAR, <https://orcid.org/0000-0002-7185-7330>

JAPH, <https://orcid.org/0000-0002-5265-2962>

EMP, <https://orcid.org/0009-0009-5535-9532>

CHP, <https://orcid.org/0000-0003-2572-0891>

HJAP, <https://orcid.org/0000-0002-5012-0348>

YRM, <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>

Recibido: 22/04/2026

Aceptado: 20/05/2026