

Valoración del uso de aditivos para modificar la carga salina del agua de proceso de lixiviación ácida de Moa

Assessment of the use of additives to modify the salt load of process
water in Moa acid leaching process

Lilian Vidiaux-Arcia¹ <https://orcid.org/0000-0003-0515-9662>

Pedro Luis Merencio-Guevara¹ <https://orcid.org/0009-0001-2018-368X>

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

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

*Autor para la correspondencia: pmerencio@cil.moa.minem.cu

RESUMEN

Procesar minerales con alto contenido de magnesio es una restricción que tiene la tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL), debido a los efectos negativos que ocasiona fundamentalmente en el consumo de ácido sulfúrico. Para minimizar esta limitante se emplean aditivos que impactan en la química de la lixiviación, por lo que se realizó el presente trabajo con el objetivo de valorar el uso de aditivos que modifican la carga salina del agua de proceso, como una de las vías para tratar menas que contienen más de 2 % de magnesio en la empresa Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba (Moa Bay). Se realizó una revisión documental sobre los aditivos que cambian la composición salina del agua, entre los cuales se encuentran aquellos que aportan iones de hierro, potasio y sodio, siendo estos últimos los más empleados. Como resultado del análisis se obtuvo que estos aditivos proporcionan beneficios al proceso de lixiviación tales como: disminución de la acidez libre final y de las impurezas en el licor producto, incremento de las extracciones de níquel y cobalto en alrededor de 3 % y reducción del consumo de ácido sulfúrico hasta un 15 %, en dependencia de las características físicas, químicas y mineralógicas del mineral que se alimenta al proceso. Se valoró que la adición de iones de sodio al agua de proceso puede ser una opción atractiva para lograr un mayor aprovechamiento de las menas lateríticas en el proceso de la Empresa Moa Nickel S.A. - Pedro Sotto Alba.

Palabras clave: aditivos; carga salina; lixiviación ácida a presión; sodio.

ABSTRACT

Processing minerals with a high magnesium content is a restriction of the HPAL technology, due to the negative effects it causes, mainly in the consumption of sulfuric acid. To minimize this limitation, additives that impact the leaching chemistry are used, so this work was carried out with the objective of evaluating the use of additives that modify the saline load of the process water, as one of the ways to treat ores that contain more than 2% magnesium at the company Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba (Moa Bay). A documentary review was carried out on the additives that change the saline composition of the water, among which are those that provide iron, potassium and sodium ions, the latter being the most used. As a result of the analysis, it was found that these additives provide benefits to the leaching process such as: reduction of the final free acidity and impurities in the product liquor, increase in nickel and cobalt extractions by around 3% and reduction in sulfuric acid consumption by up to 15%, depending on the physical, chemical and mineralogical characteristics of the mineral fed to the process. It was found that the addition of sodium ions to the process water may be an attractive option to achieve a greater use of lateritic ores in the process of the Moa Nickel S.A. - Pedro Sotto Alba Company.

Keywords: additives; salt load; acid pressure leaching; sodium.

Enviado: 26/08/2025

Aceptado: 20/10/2025

Introducción

La tecnología de extracción metalúrgica de lixiviación ácida a alta presión (HPAL) se lleva a cabo en diferentes regiones del mundo tales como: Cuba, Australia, Filipinas, Nueva Caledonia, Nueva Guinea y Turquía; todas estas plantas han sido operadas bajo condiciones similares; alta temperatura (240 a 270 °C) y presión (35 a 55 atm).⁽¹⁾ Este proceso es muy eficiente, con el que se recupera más de 95 % de níquel y cobalto.^(1,2)

Dependiendo del estado del material de alimentación, ya sea limonítico o mezcla limonítica/saprolítica, se utilizan proporciones en masa de ácido/mineral de 0,2 a 0,5 durante la lixiviación de estos minerales.^(3,4)

El procesamiento de los minerales oxidados de níquel por la tecnología HPAL está condicionado entre otros factores importantes por el contenido de magnesio y otros elementos consumidores de ácido sulfúrico. Altos contenidos de estos elementos en los minerales niquelíferos no permiten económicamente su procesamiento debido al aumento del consumo de este reactivo.^(5,6,7)

Se han desarrollado estudios encaminados al aprovechamiento de estos minerales con alto contenido de magnesio entre los que se pueden citar el uso de aditivos que modifican la salinidad del agua de proceso, siendo los más empleados aportan iones de hierro, amonio, potasio y sodio.^(8,9,10)

La adición de iones de sodio al agua de proceso para procesar minerales con alto contenido de magnesio proporciona diversos beneficios como son la optimización a un 3 % de las extracciones de níquel y cobalto, la disminución del consumo de ácido sulfúrico hasta un 15 %⁽⁸⁾ y residuos más estables que los producidos a partir de agua de proceso de baja salinidad.^(4,5) Si se utiliza agua de proceso de alta salinidad, entonces se formarían compuestos de aluminio como alunita de sodio,^(4,11,12) en cuya reacción de formación se genera una cantidad adicional de ácido que posibilita la reducción de la carga inicial de este reactivo en el proceso de lixiviación.⁽¹¹⁾

Proyectos desarrollados más recientemente logran un mayor aprovechamiento del perfil laterítico mediante la tecnología EPAL (Enhanced Pressure Acid leaching) en la cual se combina la tecnología HPAL del mineral limonítico con la lixiviación a presión atmosférica de la saprolita, típicamente caracterizada por bajos contenidos de hierro y altos contenidos de magnesio (Fe < 10 %; Mg > 15 %). Un aspecto común de la tecnología EPAL con las investigaciones antes descritas es la presencia de los iones de sodio en el agua que se emplea para preparar la pulpa del proceso de lixiviación.⁽¹³⁾

Los aspectos mencionados anteriormente indican que pudieran obtenerse efectos positivos con la adición de iones de sodio al agua de proceso, pero que estos no solo dependen del contenido de magnesio en el mineral, sino también del tipo de mineral que se utilice.

De acuerdo con lo anterior, puede ser atractivo evaluar la posibilidad de realizar modificaciones desde el punto de vista tecnológico en la empresa Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba (PSA) (Moa Bay) que permitan lograr un mayor aprovechamiento de las menas lateríticas, ya que en esta planta actualmente

solo se procesan menas cuyos contenidos de magnesio oscilan entre 1 y 2 %, con eficiencias de recuperación de níquel y cobalto que promedian el 92 % y un consumo de ácido sulfúrico de alrededor de 328 kg/toneladas de mineral (Para relación ácido/ mineral $\approx 0,3$).⁽¹⁴⁾

Por tanto, esta investigación consiste en un análisis documental cuyo objetivo es valorar la posibilidad emplear aditivos que modifican la carga salina del agua de proceso, como una de las vías para tratar menas que contienen más de 2 % de magnesio en la empresa Moa Nickel SA- Pedro Sotto Alba (Moa Bay).

- Para una mayor comprensión del tema a abordar la investigación se divide en cuatro partes: Características del mineral laterítico.
- Particularidades del proceso de lixiviación ácida a presión.
- Uso de aditivos para modificar la carga salina del agua de proceso en la tecnología HPAL.
- Valoración del uso de aditivos para modificar la carga salina del agua de proceso en la empresa Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba (Moa Bay).

Desarrollo

Características del mineral laterítico

Los depósitos de laterita son una fuente importante de Ni y Co^(15,16) y suelen presentar una gran variabilidad vertical y horizontal,⁽¹⁵⁾ la disponibilidad de minerales de laterita representa el 86 % de las reservas de níquel en la Tierra,⁽¹⁾ estos se forman en climas tropicales a subtropicales y pueden clasificarse además como depósitos de silicato hidratado (Operaciones SLN, Nueva Caledonia), depósitos de silicato arcilloso (Murrin Murrin, Australia) y depósitos de óxido^(17, 18) (Moa, Cuba y Cawse, Australia).⁽¹⁷⁾

La estructura detallada del perfil laterítico varía mucho y en cualquier lugar es el resultado de la interacción dinámica de factores climáticos y geológicos como la topografía, el drenaje, la tectónica, la estructura y la litología de la roca madre.^(17,19)

El proceso de generación meteórica de las zonas litológicas ocurre bajo la acción de tres fenómenos geoquímicos básicos: hidratación, lixiviación e hidrólisis en soluciones naturales químicamente agresivas. La hidratación inicial provoca una intensa serpentinización de la ultramafita, facilitando la lixiviación de los elementos químicos alcalinos y alcalino terreos (Na, K, Ca, Mg) y del silicio (Si 4⁺) de los silicatos, con la acumulación simultánea del resto de los

elementos químicos que componen la roca: Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Co, V, Cu, Zn, Zr, Mn, Nb, Ga, Sc, Au, Pt, Pd y otros) lo que es típico del estadio inicial del proceso de intemperismo de las ultramafitas.⁽²⁰⁾

En un perfil intempérico se establecen cuatro horizontes o capas,^(20,21) las que difieren entre sí desde el punto de vista químico y mineralógico principalmente, desde la base hasta el tope: roca madre, saprolitas donde predominan los minerales de Mg^(6,10,21) y se produce el máximo enriquecimiento del Ni.^(6,20) Las limonitas son de color amarillo-carmelitoso y portadoras de Ni con un elevado contenido de Fe. La capa superficial que es de color rojo-carmelitoso con contenidos de Fe y Ni inferiores a la limonita.^(20,21)

Los horizontes lateríticos están compuestos básicamente por óxidos e hidróxidos de hierro, estas fases mineralógicas se encuentran en la fracción fina menor de 0,074 mm y son considerados materiales de buena sedimentación;⁽²²⁾ donde el níquel está asociado principalmente con la goethita^(20,23,24) la maghemita y la magnetita^(16,18,20,25) en la proporción de 60 a 95 % del total⁽²⁰⁾ y en menor medida con óxidos e hidróxidos de Mn,^(16,18) mientras que el cobalto está asociado con óxidos de manganeso (asbolanas).^(18,26) En los depósitos lateríticos cubanos, la goethita puede contener hasta 4,5 % en peso de NiO y la maghemita también es rica en níquel (1,8≤ NiO≤ 8,1 % en peso), esta puede llegar a representar más del 10 % de la mena en la zona inferior del horizonte limonítico.⁽²⁶⁾ El contenido de humedad de la laterita cubana es relativamente alto y oscila entre 25 % cerca de la superficie y 40 % en el fondo de la columna de mineral.⁽²⁷⁾

Estudios realizados con el mineral laterítico (tipo óxido) de la región de Cawse mostraron que este estaba compuesto principalmente por goethita (40 %), con cantidades menores de cuarzo (20 %), clorita (10 %), talco (6 %) y fases amorfas, la composición química del mineral analizado es la siguiente: Ni: 1,7 %; Co: 0,2 %; Mg: 4,5 %; Mn: 0,8 %; Al: 2,0 %; Fe, 25,7 %; Si: 15,9 %; Cr: 1,2 % y Na: 0,2 %; como se puede observar el contenido de magnesio es alto, sin embargo, los estudios mineralógicos mostraron que alrededor del 40 % de ese magnesio presente estaba asociado con un mineral de talco no reactivo que no contribuye al consumo total de ácido en la lixiviación.⁽⁸⁾ A diferencias de este mineral, los horizontes lateríticos cubanos la goethita representa de un 65 a 80 % y el cuarzo de un 2,5 a un 5 %; siendo esta última una fase

secundaria en la zona serpentinita al igual que la nontronita, el talco y la tremolita.⁽²⁸⁾

Por otra parte, los principales minerales que contienen níquel en la zona se saprolita son silicatos hidratados de Ni-Mg de estructura mixta (garnieritas)^(16, 29,24,26,29,30), estos poseen baja cristalinidad con afinidades por la serpentina, el talco y la clorita. El contenido de níquel en las lateritas de silicato suele ser del 2 al 3 %^(16,19). Ejemplo de perfiles de silicato son las lateritas de los macizos de Nueva Caledonia^(16,19) las lateritas niquelíferas de Cerro Matoso (Colombia),⁽²⁹⁾ el mineral de Falcondo (República Dominicana), el de Sorowako (Indonesia)⁽²⁴⁾ y Loma de hierro (Venezuela). Un análisis de la composición del mineral de Loma de Hierro mostró que las garnieritas son mezclas entre serpentina y una fase similar al talco (kerolita-pimelita),^(16,23) el porcentaje de este talco oscila entre 71 y 75 % en peso. Dicha fracción de talco indica que las garnieritas con mayor contenido en níquel son las que tienen mayor fracción de talco.⁽²⁸⁾

Sin embargo, la garnierita no está reconocida por la Asociación Mineralógica Internacional como una especie mineral, porque consisten en fases minerales poco cristalinas y que comúnmente se presentan en forma de mezclas de varios filosilicatos, con estructuras de talco, serpentina, sepiolita, clorita y esmectita.⁽²⁴⁾

Ejemplos de lateritas niquelíferas de tipo arcilla se localizan en Murrin Murrin (Australia occidental) y San Felipe (Camagüey, Cuba),⁽²⁴⁾ este se caracteriza por la presencia de sílice libre en todo el perfil diferenciándose de los yacimientos cubanos de corteza de intemperismo.⁽³¹⁾

Proceso HPAL

El proceso de lixiviación ácida a alta presión (HPAL) de minerales de laterita requiere menos energía, lo que resulta en menos costos operativos e impactos ambientales.⁽²⁾ Este proceso es muy eficiente, con el que se recupera más de 95 % de níquel y cobalto.^(2,32,33) Se lleva a cabo en diferentes regiones: Cuba, Australia, Filipinas, Nueva Caledonia, Nueva Guinea y Turquía. Todas estas plantas han sido operadas bajo condiciones de operación similares⁽³⁴⁾ pero la recuperación de metales posterior difiere;⁽³²⁾ alta temperatura (240 a 270 °C) y presión⁽³⁴⁾ (35 a 55 atm), ambos parámetros se encuentran asociados y se

trata con ácido sulfúrico durante 60 a 90 minutos en una serie de autoclaves. ⁽³²⁾

Las operaciones unitarias para la preparación de la pulpa son similares: cribado, ⁽³⁵⁾ molienda ⁽³⁵⁾ y trituración, ⁽³⁵⁾ el mineral se mezcla con agua para preparar una pulpa acuosa para ser alimentada a la planta de lixiviación. En la tabla 1 se muestran algunos de estas plantas que hoy se encuentran en operación y las principales diferencias entre ambas.

Tabla 1: Diferencias entre las plantas que operan con tecnología HPAL

País	Proyecto	Tipo de mineral	Equipamiento	Producto final
Cuba	Moa Bay	Lateritas de óxido Mg: 1 % ⁽³⁾	Tanques de Pachuka ⁽³⁵⁾	Sulfuro de Ni y Co ⁽¹⁾
Australia	Murrin Murrin	Lateritas arcillosas Mg: 4 % ⁽³⁾	Autoclaves revestidas de titanio ⁽³⁶⁾	Briqueta de Ni y Co ⁽¹⁾
Nueva Caledonia	Goro	Lateritas de silicato (gama de fases similares al talco y la serpentina) ⁽³⁵⁾	Serie de autoclaves horizontales ⁽⁵⁶⁾	Óxido de Ni, Carbonato de Co ⁽³⁵⁾

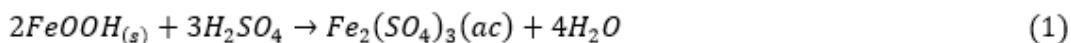
El proyecto Moa Bay, conocido como empresa Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba es el único que opera autoclaves verticales (tanques pachuka). El mineral de alimentación es laterita tipo óxido constituida principalmente por la zona de limonita, con un contenido de magnesio de 1 %. ⁽²⁾

Un inconveniente de este proceso es que la presencia de una fracción significativa de mineral saprolítico da como resultado un mayor consumo de ácido debido a la alta concentración de magnesio, ⁽³⁰⁾ por otro lado el contenido de aluminio no debe ser demasiado alto ya que las arcillas también son consumidoras de H_2SO_4 . ^(36,37,38)

Dependiendo del estado del material de alimentación, ya sea limonítico o mezcla limonítica/saprolítica, se utilizan proporciones de peso de ácido a mineral de 0,2 a 0,5 durante la lixiviación de estos minerales. El ácido consumido durante la disolución del magnesio no se regenera como en el caso del hierro y del aluminio. ⁽¹⁰⁾ Estudios mineralógicos han mostrado que una parte del magnesio presente en algunos minerales está asociado con un mineral de talco no reactivo que no contribuye al consumo de ácido sulfúrico durante la lixiviación. ⁽⁸⁾

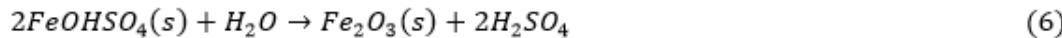
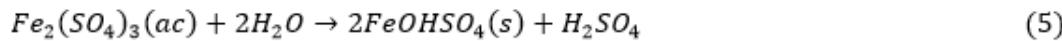
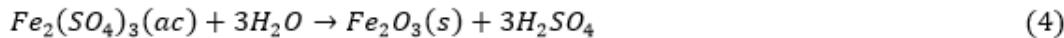
En las condiciones de lixiviación mencionadas anteriormente, el hierro sigue principalmente un camino de disolución-precipitación, formando óxidos y sulfatos sólidos insolubles, mientras que el níquel y el cobalto se disuelven y permanecen en la fase de solución. ⁽⁴⁾

De esta manera se puede conseguir una separación selectiva de níquel y cobalto. Como componente principal de los minerales, el hierro de la goethita se disuelve para dar sulfato férrico según la ecuación 1. El níquel y el cobalto, presentes en la estructura de la goethita, se suponen en forma de óxidos o hidróxidos, se disuelven según las ecuaciones 2 y 3, respectivamente ^(2,4,11) y permanecen en la solución como sulfatos:



Después de la disolución de la goethita, los iones férricos producidos se hidrolizan rápidamente y precipitan como hematita (ecuación 4) o como sulfato férrico básico (ecuación 5), que puede transformarse en hematita (ecuación 6) dependiendo de las condiciones de lixiviación. La formación de sulfato férrico básico se ve favorecida en soluciones de lixiviación muy ácidas. Estas reacciones de precipitación regeneran el ácido consumido durante la disolución inicial de la goethita. ⁽⁴⁾

GUO Xue-yi y col. 2011 en su investigación hicieron un análisis del residuo de lixiviación ácida a alta presión mediante análisis químico y DRX indicando el contenido de hierro en los residuos de lixiviación es superior al 50 % y puede reciclarse en forma de hematita. Tanto el níquel como el cobalto en los residuos sus composiciones son inferiores al 0,1 %. Las principales fases presentes en el residuo incluyen hematita y alunita. La precipitación de alunita en el proceso de lixiviación conduce a un alto contenido de azufre en el residuo de lixiviación. ⁽³⁹⁾



White y col (2013) observaron que los residuos del proceso HPAL contenían cantidades importantes de sulfato consistente con la precipitación de hidronio alunita. ⁽¹³⁾

Diversas han sido las investigaciones encaminadas a mejorar el proceso HPAL, entre los propósitos de estos trabajos se encuentran lixivar materiales con alto contenido de magnesio. El ácido residual de la lixiviación de limonita, más el liberado por la precipitación de hierro como goethita ha sido utilizado para lixivar el importante componente de saprolita. ^(40,41) Acondicionar (se prelixivia a presión atmosférica y a temperatura de 80 °C a 95 °C con licor fresco obtenido del proceso de lixiviación) el mineral con alto magnesio y bajo contenido de níquel antes de ser lixiviado con el objetivo de hacerlo más susceptible a la recuperación eficiente y económica de níquel y cobalto durante la lixiviación, ya que para lixivar este tipo de material se necesitan elevadas cantidades ácido sulfúrico. El licor rico se caracteriza por la presencia de constituyentes hidrolizables que generan ácido libre por hidrólisis durante el ciclo de acondicionamiento. Este ácido libre adicional solubiliza el magnesio durante la etapa de acondicionamiento. ⁽⁴²⁾

Uso de aditivos en el proceso HPAL

Otra de las vías para procesar minerales con alto contenido de magnesio y obtener mejoras en el proceso HPAL es la adición de iones entre los cuales se encuentran aquellos que aportan iones de hierro, potasio y sodio.

También se ha utilizado agua de mar y agua hipersalina, la introducción de estas especies tiene efectos importantes sobre la química de lixiviación. ⁽⁴³⁾

Wittington y col (2003), estudiaron el efecto del tipo de mineral mediante la lixiviación ácida a presión en agua hipersalina. Entre los minerales estudiados se encuentra la limonita, el cual estaba compuesto principalmente de goethita (55 %) y presentaba una fase poco difractante que contenía magnesio. Como resultado de esta lixiviación se obtuvo un licor rico en hierro y un residuo que contenía hematita fina. Los autores de esta investigación afirman que el tipo de mineral influye en la composición del licor, mineralogía y propiedades del residuo de lixiviación. ⁽⁴⁴⁾

El uso de agua de proceso salina o hipersalina se puede estimar con precisión si se dispone de buenas aproximaciones para las cantidades de magnesio y

talco que se reportan a minerales y de la proporción de hierro que se espera que se presente en las fases de alunita/jarosita. ⁽⁴⁵⁾

Se han estudiado formas más eficaces de extraer níquel y cobalto en la solución de lixiviación del mineral laterítico de níquel y cobalto por los valores de extracciones por debajo de los deseados y se cree esto se deba a la presencia de hematita en el mineral limonítico. Se probaron las adiciones de diferentes aditivos químicos entre los que se pueden citar el, HCl, Cu⁺, S, Na₂SO₄ y el FeSO₄. ⁽¹⁰⁾ La adición fue beneficiosa porque aumentó (muy poco) el grado de extracción de níquel y cobalto pero se obtuvieron efectos negativos tales como, en el caso del FeSO₄ aumento de los iones ferrosos en el licor lixiviado, aunque la adición de este aditivo a la suspensión de lixiviación de limonita puede mejorar la disolución del níquel y en particular, del cobalto. La adición del Na₂SO₄ contribuyó al cambio de las concentraciones de impurezas de la solución, sin embargo no fueron satisfactorios los resultados debido a la disminución del grado de extracción de Ni y Co. ⁽¹⁰⁾

Varios autores ^(8,11,46) reportan los beneficios del uso de iones de sodio, amonio y potasio en el proceso HPAL, sin embargo Houyuan Liu y col. 2003 en su investigación reportan como una mejora al proceso de lixiviación la eliminación de estos iones con el fin de que el hierro no precipite como jarosita; la formación de este compuesto genera más residuos que la formación de hematita; ⁽³²⁾ sin embargo los residuos producidos a partir de agua de proceso de baja salinidad tienden a ser menos estables que los producidos a partir de agua de proceso de alta salinidad. ⁽⁴⁵⁾

Wang y col. 2016 estudiaron el proceso de transformación de jarosita sódica hematita en un reactor discontinuo a diferentes temperaturas que van de 170 °C a 200 °C con un tiempo de retención de tres horas en presencia de 4 g/L de Na⁺. La composición de los productos de la precipitación dependía de la temperatura, a 170 °C la hematita y la jarosita de sodio son los productos de reacción del precipitado de hierro, al aumentar la temperatura de reacción el contenido de sodio y azufre en el precipitado disminuye y el azufre existe principalmente en formas de SO₄²⁻. ⁽⁴⁷⁾

Un menor contenido de azufre en el residuo de lixiviación trae consigo un menor consumo de ácido en el proceso. ⁽⁴⁸⁾

Cuando la temperatura por estuvo encima de 200 °C la hematita era la única fase en el producto. Un aumento de temperatura no sólo es beneficioso para la precipitación de hierro, sino que también contribuye a la conversión de jarosita para formar un precipitado de hematita de alta calidad. ⁽⁴⁷⁾

La concentración de estas fases en el residuo de lixiviación varía con la relación ácido/mineral inicial. ⁽³²⁾ Eliminar estos iones tiene como desventaja que el consumo de ácido sería mayor ya que el ácido sulfúrico liberado durante la precipitación del hierro no lixiviaria el alto contenido de magnesio de algunos minerales. Es por esta razón que es necesario determinar el momento de adición de estos iones. Duyvesteyn en su investigación afirma que es ventajoso agregar los compuestos cuando la lixiviación está completa en más de la mitad. ⁽⁴⁹⁾

La adición de compuesto de amonio o metal alcalino soluble en agua a la pulpa mineral, tiene su mayor efecto sobre los minerales de silicato niquelífero; aquellos que tienen contenidos de hierro bajos y contenidos de magnesio altos. ^(46,50) Entre las ventajas de la adición de estos iones se encuentran mejoras en las eficiencias de lixiviación y en la velocidad de sedimentación de los sólidos lixiviados. ⁽⁴⁹⁾

El sulfato de sodio ha sido uno de los aditivos más utilizados y estudiados debido a su bajo costo y disponibilidad ⁽⁴⁹⁾ para su adición en el proceso de lixiviación ácida a presión, este desempeña un papel importante en la catalización del proceso de lixiviación ácida ⁽³⁹⁾ y modifica la carga salina del agua de proceso en esta tecnología, optimiza las extracciones de níquel en un 3 % en minerales limoníticos y nontroníticos y se puede usar un 15 % menos de ácido para obtener la misma extracción de níquel de un mineral nontronítico en agua de proceso sin aditivo. ⁽⁸⁾

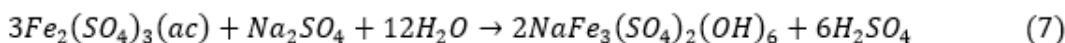
La relación ácido mineral y la concentración de los niveles de los iones de sodio óptimas ⁽⁸⁾ son las siguientes: para el mineral nontronítico 420 kg de ácido/t de mineral y 4 g/L y para el mineral limonítico 310 kg de ácido/t de mineral y 2 g/L. La adición de Na_2SO_4 disminuye de la acidez libre final, ⁽⁸⁾ siendo esta una mejora para etapas posteriores del proceso HPAL.

Química de la lixiviación con aditivos

La disolución de los minerales nontroníticos libera hierro y aluminio significativos a la solución, que luego se hidrolizan a alunita/jarosita de sodio

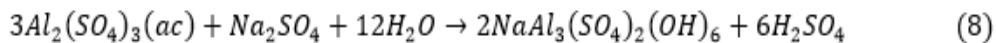
con regeneración de ácido.⁽⁴⁴⁾ Para separar el hierro como jarosita la solución se hace pasar a través de varias zonas de reacción para oxidar e hidrolizar el sulfato ferroso en presencia de iones de metales alcalinos o iones de amonio, precipitar la jarosita y formar simultáneamente ácido sulfúrico,^(50,51) la temperatura es un parámetro importante, se debe garantizar una temperatura en la última zona de reacción superior a la de la primera zona de reacción.⁽⁴⁷⁾ En el proceso de lixiviación ácida atmosférica se ha demostrado que la adición de iones de sodio, amonio y potasio promueve la precipitación de jarosita a temperaturas de alrededor de 95 °C.^(50,52,53)

Si se utiliza agua de proceso de alta salinidad (por ejemplo, Na_2SO_4 , NaCl), entonces se forma jarosita (ecuación 7).^(4,12,47) Con esta reacción de precipitación también se regenera el ácido consumido durante la disolución inicial de la goethita, pero en menor cuantía que el ácido producido durante la formación de hematita.⁽⁴⁾



La hidrólisis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a Al_2O_3 es una reacción lenta y no ocurre en gran medida en las reacciones de lixiviación de laterita, se deduce que cuanto más aluminio permanece en solución, más ácido se consume. La adición de una pequeña cantidad de sulfato de sodio a las reacciones de lixiviación tiene un efecto significativo en la química del aluminio en la lixiviación de minerales nontroníticos y limoníticos.⁽⁸⁾

El magnesio se disuelve por lixiviación pero no se hidroliza. La disolución de la serpentina también libera una cantidad de magnesio a la solución;^(44,46) este magnesio disuelto proporciona un medio no solo para inhibir la incrustación de la alunita, sino también para facilitar la eliminación de la incrustación de la hematita.^(54,55,56)



El silicio también se lixivia pero precipita rápidamente como sílice amorfa. Estudios sobre la cinética de lixiviación muestran que durante la lixiviación la disolución del magnesio tiene lugar muy rápidamente, por lo tanto, el níquel asociado se lixivia fácilmente en medio de ácido sulfúrico a partir de mezclas

limoníticas/saprolíticas. La disolución del níquel está asociada con el hierro, este proceso depende del tiempo y que a menudo requiere la disolución completa del hierro para lograrlo. ⁽¹⁰⁾

Los beneficios que este aportan los iones de metales alcalinos o amonio, potasio, hierro al ser añadidos al proceso HPAL son notables en comparación que cuando se lixivia con agua de proceso; entre ellos se encuentran los siguientes: disminución de la acidez libre final y de las impurezas en el licor, mejora de las extracciones de níquel y cobalto de un 3 % y uso al menos un 15 % menos de ácido para obtener la misma extracción de níquel de un mineral en agua de proceso.

El tipo de mineral es una de las variables que más influyen cuando se utilizan estos aditivos, ya que el efecto del uso de los mismos se hace más notorio cuando el mineral es nontronítico, es decir, que el contenido de magnesio es alto, aunque es importante estudiar la mineralogía del mineral ya que se reporta en la literatura que parte del magnesio presente en algunos minerales está asociado con un mineral de talco no reactivo que no contribuye al consumo de ácido sulfúrico. ⁽⁸⁾

En la literatura revisada no se encontraron trabajos donde se hiciera el uso de aditivos que modifiquen la carga salina del agua del proceso de lixiviación ácida a presión que tiene lugar en la empresa Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba (Moa Bay).

Valoración del uso de aditivos para modificar la carga salina del agua de proceso en la empresa Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba (Moa Bay)

La valoración del uso de aditivos para modificar la carga salina del agua de proceso de lixiviación ácida a presión de Moa puede analizarse a través de los aspectos siguientes: composición química y mineralógica, parámetros de operación y presencia de aditivos.

En un análisis comparativo de la composición química de menas limoníticas de este proceso y las empleadas por empresas de Australia y Turquía se muestra en la figura 1.

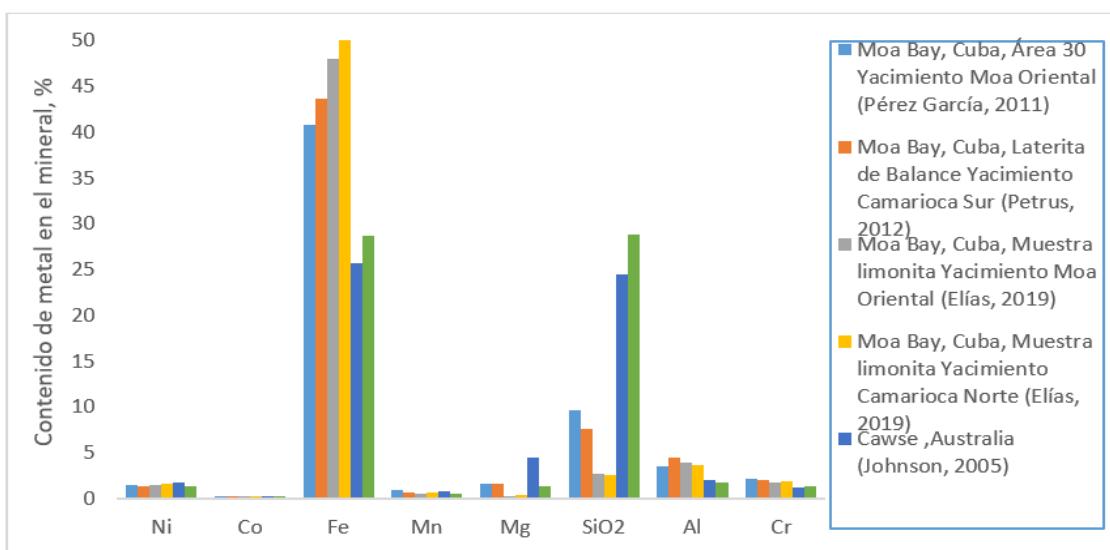


Fig. 1- Composición química de menas limoníticas de Cuba, Australia y Turquía

De acuerdo con la figura 1 en las menas limoníticas de Cuba se observan contenidos de hierro y aluminio prácticamente duplican los valores reportados para las muestras de Australia y Turquía. Este hecho brinda la posibilidad de regeneración de una cantidad de ácido adicional por ambos elementos metálicos que puede incidir positivamente en la reducción del consumo de ácido sulfúrico.

También se puede apreciar que los contenidos de Si y Mg de los minerales cubanos son de dos a tres veces menores que los reportados en las menas turcas y australianas. Este hecho pudiera ser ventajoso para la sedimentación de las pulpas lateríticas de Moa. El reto mayor para el proceso de Moa radica en la necesidad de aprovechar en mayor medida el níquel contenido en la fracción saprolítica del yacimiento, el cual a su vez está vinculado con contenidos superiores de elementos nocivos como el magnesio y la sílice. En este caso, el uso de aditivos para modificar la carga salina del agua pudiera aportar beneficios en la reducción del consumo de ácido y el incremento de las extracciones de níquel y cobalto sin incurrir en costosas inversiones como las del proceso EPAL.

Desde el punto de vista mineralógico en las menas limoníticas de frentes en explotación de la empresa Moa Nickel SA Pedro Sotto Alba se identifican las fases: goethita, hematita, magnetita, gibbsita, clorita y olivino con las que se conforman pulpas de buena sedimentación,⁽²²⁾ sin embargo, estudios realizados en yacimientos tales como Zona Septentrional y Camarioca Sur

revelan que los valores elevados de magnesio pueden estar asociados a la presencia de talco $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$, ^(52,53) lo que resulta de interés ya que esta fase se reporta como no consumidora de ácido.

Por otro lado, resulta conveniente destacar que los parámetros de operación (temperatura, presión, concentración de sólidos, tiempo de residencia) que se emplean en el proceso de lixiviación ácida a presión de Moa prácticamente no difieren de los que se utilizan internacionalmente en procesos similares y aunque no se han empleado aditivos con el objetivo de modificar la carga salina del agua, en la actualidad se emplea el sulfato de hierro heptahidratado como agente para mejorar la compactación de las pulpas que se envían al proceso de lixiviación. ⁽⁵⁴⁾ Este reactivo se reporta por Kaya 2011, ⁽¹⁰⁾ como uno de los aditivos con mejores resultados en las extracciones de níquel y cobalto para el tratamiento de minerales refractarios con contenidos de níquel y magnesio iguales a 1,28 y 2 %, respectivamente. Su presencia en el proceso de Moa con la incorporación de otros aditivos como el sulfato de sodio pudiera potenciar las bondades de la modificación de la carga salina del agua de proceso, pero este es un aspecto que debe ser evaluado experimentalmente.

El uso de algún aditivo en el proceso de la PSA va a depender de las características químicas y mineralógicas de cada uno de los yacimientos asignados a esta compañía. Teniendo en cuenta los aspectos analizados en este acápite, puede ser el uso de aditivos una vía para el procesamiento de las menas alimentadas al proceso de la PSA.

La adición de iones de sodio al agua de proceso puede ser una opción atractiva para lograr un mayor aprovechamiento de las menas lateríticas que contienen más de un 2 % de magnesio en el proceso de la Empresa Moa Nickel S.A. - Pedro Sotto Alba; ya que posibilitaría fundamentalmente un menor consumo de ácido sulfúrico, lo que sería ventajoso para la reducción de los costos de operación de la empresa.

Conclusiones

1. El estudio de las características químicas y mineralógicas del material de alimentación al proceso HPAL es determinante en la condiciones de operación para esta tecnología, ya que las características de los materiales son variables y de ellas depende del consumo de ácido sulfúrico.

2. Una de las vías para procesar minerales con alto contenido de magnesio y obtener mejoras en el proceso HPAL es la adición de iones (de hierro, potasio, amonio y sodio) en el agua de proceso. El sulfato de sodio ha sido uno de los aditivos más utilizados con estos fines debido a su bajo costo y disponibilidad.
3. Entre las mejoras obtenidas a partir de la introducción de los iones se encuentran la disminución del consumo de ácido sulfúrico en el proceso debido a la liberación de hierro y aluminio, que luego se hidrolizan a alunita/jarosita de sodio regenerando ácido sulfúrico.
4. El uso de aditivos para modificar la carga salina del agua de proceso en la empresa Moa Nickel SA - Pedro Sotto Alba (Moa Bay) puede ser una vía para aprovechar el contenido de níquel en menas con contenido de Mg superior al 2 %.

Referencias bibliográficas

1. GULTOM, T.; SIANIPAR, A. High pressure acid leaching: a newly introduced technology in Indonesia. En *IOP conference series: earth and environmental science*. IOP Publishing, 2020. p. 012015.
2. COBAN, Ozan, et al. Hydrometallurgical nickel and cobalt production from lateritic ores: Optimization and comparison of atmospheric pressure leaching and pug-roast-leaching processes. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2021, **27**(1). ISSN: 1338-1156.
3. STANKOVIĆ, Srđan, et al. Review of the past, present, and future of the hydrometallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores. *Metallurgical & Materials Engineering*, 2020, **26**(2), p. 199-208. ISSN: 2812-9105.
4. STANKOVIĆ, Srđan, et al. Options for hydrometallurgical treatment of Ni-Co lateritic ores for sustainable supply of nickel and cobalt for European battery industry from South-Eastern Europe and Turkey. *Metals*, 2022, **12**(5), p. 807. ISSN: 2075-4701.
5. UCYILDIZ, Ayse; GIRGIN, I. High pressure sulphuric acid leaching of lateritic nickel ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2017, **53**(1), p. 475-488. ISSN: 2084-4735.
6. CHALKLEY, M. E., et al. Effect of magnesium on pressure leaching of Moa laterite ore. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, **49**(3), p. 227-234. ISSN: 0008-4433.
7. HEREDIA-KINDELAN, Maria D. Lixiviación ácida a presión de los minerales limoníticos. *Minería y Geología*, 1997, **14**(1), p. 43-48. ISSN: 1993-8012
8. OLMO, Esteban Alfonso; NAYDA HERNÁNDEZ MARTINEZ, José Castellanos; ALFONSO, Roxana. APROVECHAMIENTO DE LA SERPENTINA NIQUELIFERA POR EL PROCESO DE LIXIVIACION ACIDA A PRESION, 2006.
9. JOHNSON, J. A.; CASHMORE, B. C.; HOCKRIDGE, R. J. Optimisation of nickel extraction from laterite ores by high pressure acid leaching with addition of sodium sulphate. *Minerals engineering*, 2005, **18**(13-14), p. 1297-1303. ISSN: 1872-9444.

10. JOHNSON, J. A., et al. Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore: Part IV: Effect of acid loading and additives with nontronite ores. *Hydrometallurgy*, 2005, **78**(3-4), p. 264-270. ISSN: 1879-1158.
11. KAYA, Ş.; TOPKAYA, Y. High pressure acid leaching of a refractory lateritic nickel ore. *Minerals engineering*, 2011, **24**(11), p. 1188-1197. ISSN: 1872-9444.
12. FURLÁN, M. P.; SECEN, B. S.; GRAU, J. M. SEPARACIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO DE CATALIZADORES AGOTADOS DE HIDRODESULFURIZACIÓN (HDS) MEDIANTE LIXIVIACIÓN PARCIAL SELECTIVA DE LOS METALES SOPORTADOS CON SOLUCIONES ACUOSAS DE H_2SO_4 , ca. 2017.
13. DUTRIZAC, J. E.; SUNYER, A. Hematite formation from jarosite type compounds by hydrothermal conversion. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2012, vol. **51**(1), p. 11-23. ISSN: 0008-4433.
14. WHITE, David T.; GILLASPIE, James D. Acid leaching of nickel laterites with jarosite precipitation. *Ni-Co 2013*, 2013, p. 74-95.
15. Cisneros, S.D. and D.A. Moreno, Informe de etapa 01. Diagnóstico de la situación actual de las operaciones mineras de la PSA. SCT 300134 Diseño del sistema de operación de los Depósitos de menas lateríticas de la Empresa Moa Nickel SA-Pedro Sotto Alba (PSA). 2016, CEDINIQ: Moa. Holguín. Cuba.
16. PROENZA FERNÁNDEZ, Joaquín Antonio, et al. Goethita, maghemita y hematites como menas de Ni y Co en lateritas de tipo óxido: lecciones aprendidas del estudio del distrito de Moa, Cuba. *MACLA. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 2022, **26**, p. 156-157, 2022. ISSN: 1885-7264.
17. DOMÈNECH, C., et al. The Loma de Hierro Ni-laterite deposit (Venezuela): Mineralogical and chemical composition. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2020, **72**(3). ISSN: 1405-3322.
18. GLEESON, Sarah A.; BUTT, C. R. M.; ELIAS, M. Nickel laterites: a review. *SEG Newsletter*, 2003, 54, p. 1-18.
19. DE OLIVEIRA, Sonia Maria Barros; DE MOYA PARTITI, Carmen Silvia; ENZWEILER, Jacinta. Ochreous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba. *Journal of South American Earth Sciences*, 2001, **14**(3), p. 307-317. ISSN: 1873-0647.

20. ELIAS, Mick. Nickel laterites in SE Asia. *East Asia geology exploration Technologies and Mine*, 2013.
21. ARIOSA-IZNAGA, J. D. La modelación descriptiva en el ejemplo de los yacimientos lateríticos de cuba oriental. (RESUMEN DE TESIS DOCTORAL/2002). *Minería y Geología*, 2005, **21**(1). ISSN: 1993-8012.
22. MUÑOZ GÓMEZ, J. N., et al. Modelo genético teórico de los yacimientos lateríticos asociados al macizo ofiolítico de Moa-Baracoa: implicaciones de la exploración de explotación. 2009.
23. ROJAS-PURÓN, Arturo L.; BEYRIS-MAZAR, Pedro E. Influencia de la composición mineralógica del material limonítico de frentes de explotación de la industria Pedro Sotto, Moa. *Minería y Geología*, 1994, **11**(1), p. 13-17. ISSN: 1993-8012.
24. ROJAS-PURÓN, Arturo L. Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas feroniquelíferas. *Minería y Geología*, 2001, **18**(3-4), p. 11-11. ISSN: 1993-8012.
25. PROENZA, Joaquín A. Mineralogía y geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos. *Macla Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 2015, **20**, p. 1-7. ISSN: 1885-7264.
26. ABÍLIO, Osmar, et al. Análise do Posicionamento da Banda de Absorção: Novo Método para o Tratamento de Imagens Hiperespectrais.
27. PROENZA, JOAQUÍN A., et al. Mineralizaciones de Co en los Depósitos Lateríticos de Ni Tipo Óxido y Silicato Hidratado. *Revista de la sociedad española de mineralogía. Macla*, 2010, 13. ISSN: 1885-7264.
28. CARLSON, E. T.; SIMONS, C. S. Acid leaching Moa Bay's nickel. *JOM*, 1960, **12**(3), p. 206-213. ISSN: 1543-1851.
29. VILLANOVA DE BENAVENT, C.; PROENZA FERNÁNDEZ, J. A. Mineralogía, composición y procesos formadores de filosilicatos de Ni en lateritas niquelíferas (serpentina-Ni y garnieritas): EMP, MET y espectroscopía Raman. *MACLA. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 2021, 25, p. 5-7, 2021. ISSN: 1885-7264.
30. RODRIGUEZ, Alfonso Chang. *Caracterización geoquímica y mineralógica de la corteza de meteorización del yacimiento San Felipe*. Editorial Universitaria, 2015. ISSN: 2218-3620.

31. AGIN, Jérôme; LE QUESNE, Yves; BERTHOMIEU, Bertrand. *Process for the hydrometallurgical treatment of a lateritic nickel/cobalt ore and process for producing nickel and/or cobalt intermediate concentrates or commercial products using it.* U.S. Patent No 8,287,827, 16 Oct. 2012. ISSN: 2218-3620.
32. COBAS BOTEY, R. M.; FORMELL CORTINA, Francisco; LEYVA RODRÍGUEZ, Carlos A. Modelo geológico descriptivo del yacimiento laterítico San Felipe, Camagüey, Cuba. *Minería y Geología*, 2017, **33**(3), p. 251-264. ISSN: 1993-8012.
33. WHITTINGTON, B. I., et al. Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore: Part I: Effect of water quality. *Hydrometallurgy*, 2003, **70**(1-3), p. 31-46. ISSN: 1879-1158
34. Mérida, L.O.E.A., et al. Precipitación de níquel y cobalto de los licores obtenidos por percolación de minerales serpentinícos. In cuarta convención cubana de ciencias de la tierra, GEOCIENCIAS'2011
35. ANDERSON, Corby, et al. (ed.). *Ni-Co 2021: The 5th International Symposium on Nickel and Cobalt*. Springer Nature, 2021.
36. BRITT, A. F.; CZARNOTA, K. A review of critical mineral resources in Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2024, **71**(8), p. 1016-1049. ISSN: 0812-0099.
37. ELIAS, Mick. Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication*, 2002, **4**, p. 205-220.
38. DALVI, Ashok D.; BACON, W. Gordon; OSBORNE, Robert C. The past and the future of nickel laterites. En *PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange*. The prospectors and Developers Association of Canada Toronto, 2004. p. 1-27.
39. DONG, L. I., et al. Leaching behavior of metals from limonitic laterite ore by high pressure acid leaching. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21**(1), p. 191-195. ISSN: 1003-6326.
40. KING, Michael G. Nickel laterite technology—Finally a new dawn? *JOM*, 2005, **57**(7), p. 35-39. ISSN: 1543-1851.
41. NEUDORF, David; HUGGINS, David. *Method for nickel and cobalt recovery from laterite ores by combination of atmospheric and moderate pressure leaching*. U.S. Patent Application No 11/165,362, 2 Feb. 2006.

42. TAYLOR, M.; ZUNDEL, W.; LANE, J. *Ore conditioning process for the efficient recovery of nickel from relatively high magnesium containing oxidic nickel ores*. U.S. Patent No 3,804,613, 16 Abr. 1974.
43. MARSHALL, D.; BUARZAIGA, M. Effect of process water on high pressure sulphuric acid leaching of laterite ores. En *International Laterite Nickel Symposium 2004 (as held during the 2004 TMS Annual Meeting)*. 2004. p. 263-271.
44. WHITTINGTON, B. I., et al. Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore: Part II. Effect of ore type. *Hydrometallurgy*, 2003, **70**(1-3), p. 47-62. ISSN: 1879-1158.
45. ROBINSON, D., et al. Developments in the hydrometallurgical processing of nickel laterites. En *Proceedings of COM*. 2017. p. 66.
46. WHITTINGTON, B. I.; JOHNSON, J. A. Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore. Part III: Effect of process water on nickel losses in the residue. *Hydrometallurgy*, 2005, **78**(3-4), p. 256-263. ISSN: 1879-1158
47. WANG, Yizhao, et al. Transformation of Sodium Jarosite to Hematite in Hydrothermal Iron Precipitation Process. En *7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016. p. 635-642.
48. KYLE, J. H. Jarosite/alunite in nickel laterite leaching—friend or foe. En *Conference Proceedings: ALTA*. 2003.
49. DUYVESTYN, Willem PC. *Leaching nickeliferous oxide ores*. U.S. Patent No 4,195,065, 25 Mar. 1980.
50. MCDONALD, R. G.; WHITTINGTON, B. I. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review: Part I. Sulphuric acid technologies. *Hydrometallurgy*, 2008, **91**(1-4), p. 35-55. ISSN: 1879-1158.
51. Sefton, V.B., et al., Patente US. 4,193,970 A Process for precipitating iron in the form of jarosite, 1980.
52. PETRUS, R. *Comportamiento geoquímico de los componentes principales y nocivos en el yacimiento Camarioca Sur y su incidencia en la explotación*. Tesis Doctoral. Departamento de Geología. 2012.
53. PÉREZ JARA, Y. *Comportamiento geoquímico de los componentes principales y nocivos del yacimiento zona septentrional*. Tesis Doctoral. Departamento de Geología. 2013.

54. BORGES DURÁN, Y. *Comportamiento de la Planta Espesadores de Pulpa en la empresa Pedro Sotto Alba, a partir de la adición de sulfato de hierro heptahidratado*. 2008. Tesis Doctoral. Departamento Metalurgia-Química.
55. QUENEAU, P. B., et al. Control of autoclave scaling during acid pressure leaching of nickeliferous laterite ore. *Metallurgical Transactions B*, 1984, **15**(3), p. 433-440. ISSN: 1543-1916.
56. ZHANG, Zhen-fang, et al. Nickel extraction from nickel laterites: Processes, resources, environment and cost. *China Geology*, 2025, **8**(1), p. 187-213. ISSN: 2589-9430.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Lilian Vidiaux-Arcia: Discusión de los resultados, escritura y revisión del artículo.

Deisy Cisneros-Sánchez: Concibió la investigación, discusión de los resultados, revisión y supervisión del artículo.

Luis Merencio-Guevara: Discusión de los resultados y revisión del artículo.

Ciro Manuel Sam Palanco: Asesoría técnica