

## **Procedimientos de mejoras en la sedimentación de las pulpas lixiviadas en la tecnología HPAL, con la identificación previa de la calidad de las menas y su aditivación**

Procedures of improvements in the sedimentation of the slurry leached in the HPAL technology, with the previous identification of the quality of the ores and use of additives

Jorge Miranda López <sup>(1)\*</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2218-4563>

Wilmer Gresesqui Medina <sup>(1)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9887-1597>

Ciro Sam Palanco <sup>(2)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7955-9955>

<sup>(1)</sup> Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca", Moa, Holguín, Cuba.

<sup>(2)</sup> Fábrica de acumuladores "XX Aniversario", Manzanillo, Granma, Cuba.

\* Autor para la correspondencia. Correo electrónico: [jmiranda@cil.moa.minem.cu](mailto:jmiranda@cil.moa.minem.cu)

### **RESUMEN**

Con frecuencia existen crisis de sedimentación de las pulpas lixiviadas en la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión (HPAL), se deben a grandes diferencias existentes entre las características geoquímicas y mineralógicas del sólido que integran estas, en periodos de crisis, con respecto a periodos normales de sedimentación, además por el incremento de fases mineralógicas de silicatos de magnesio de diversos grados de descomposición térmica, así como a sus transformaciones a que están sometidos los minerales lateríticos níquelíferos naturales en la corteza de intemperismo, y a las transformaciones del sólido dentro de los reactores de lixiviación a alta presión, provocando diversos comportamientos del proceso de clarificación y densificación de las pulpas lixiviadas y como consecuencias, afectaciones en la operatividad del

proceso y recuperación del Ni. Se muestran resultados de trabajos realizados en el 2006 y 2019, que representan alternativas de cómo mitigar o eliminar estas afectaciones, con sólo aditivar determinados compuestos a las pulpas crudas, con rango de 20 hasta 80 g/t, en la formación de fases o estructuras mineralógicas dentro de los reactores de lixiviación. Con previo uso, de una nueva herramienta de diagnóstico de la calidad de las menas a procesar, que identifican la mineralogía tecnológica o aplicada a bajo costo de análisis, basada en una herramienta integral de cálculo, desarrollada en el proyecto auspiciado por el Fondo Cubano de Innovación Tecnológica en el año 2017 - 2018, este permite estimar la operatividad del proceso, y de esto, se deriva cuales pulpas alimentadas serán necesarias aditivar y cuáles no.

**Palabras clave:** Mineralogía Tecnológica o aplicada; aditivos de compuestos de cobre; potasio-cromo; crisis de clarificación y densificación de las pulpas lixiviadas; tecnología HPAL

## **ABSTRACT**

Frequently crisis of settling crisis of the leached slurry in the technology High Pressure Leaching of Laterites ores, is due to big existent differences among the geochemistry and mineralogical characteristic of the solid that integrate these, in periods of crisis, with regard to normal periods of settling. Also for the increment of mineralogical phases of silicates of magnesium of diverse grades of thermal decomposition and the transformations in the bark of elements at different evolutionary levels in different sectors of the location. Moreover, to the transformations of the solid inside the leaching out reactors to high pressure, causing diverse behaviors of the clarification and densification process of the leached slurry and consequences, affectations in the operability of the process and recovery of the nickel. Results of realized works shown in 2006 and 2019 that represent alternative of how to mitigate or to eliminate these affectations, just by certain addition compound to the fed slurry, with range of 20 up to 80 g/t, in the formation of mineralogical structures phases inside the leaching out reactors. Previous use, of a new of diagnostic of the quality of the ores to

process that identify the technological mineralogy at low analysis cost. Based on an integral of calculation, developed in the Project favored by the Cuban Fund of Technological Innovation in the year 2017 - 2018, this it will allow to estimate the operability of the process previously, and of this, the program derived which fed slurry will be necessary addition and which not.

**Keywords:** Technological or applied mineralogy; preservatives or additive of made up of copper; potassium-chromium; clarification crisis and densification crisis of the leached slurry; pressure leaching of nikeliferous laterites with sulfuric acid.

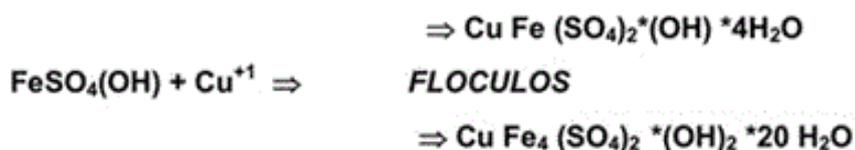
## Introducción

La necesidad de nuevos recursos que permitan identificar, no sólo la mineralogía descriptiva, sino de una mineralogía tecnológica o aplicada de los sólidos presentes en las pulpas crudas, así con el objetivo de identificar su posible comportamiento operativo durante su proceso de sedimentación de las pulpas lixiviadas, previo a su procesamiento en la dinámica de la industria, fundamentado en un diagnóstico eficaz de las características químico-físicas de las menas procesadas por la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión, a partir de un nuevo procedimiento integral, se difieren en el caso de la Mineralogía Tecnológica, en el uso de herramientas desarrolladas hoy en día de corte analítico-computacional y de los resultados operativos previo a su procesamiento, además que permiten identificar una mayor extensión de muestras, además de su bajo costo de análisis. En este sentido los investigadores del CEDINIQ, han desarrollado nuevos procedimientos técnicos de corte físicos, que permiten enriquecer el dominio, para el control de la calidad de las menas a procesar en dicha tecnología al conjugarse con el quimismo, los procedimientos se mencionan en las siguientes referencias. <sup>(7, 8, 9, 10)</sup> Estas herramientas fueron integradas en una hoja de cálculo, a partir de ecuaciones de regresión, matemática lógica, criterios de expertos, para concluir en identificaciones analíticas, que permiten diagnosticar anticipadamente su

comportamiento industrial, mucho antes de su procesamiento industrial, por previos estudios investigativos y del uso de la mineralogía convencional por Difracción de rayos-X. En otras palabras, la hipótesis de investigación estuvo dada en: al conocer previamente la calidad de las menas a través de las características físico-química, permite brindar un diagnóstico de las principales fases mineralógicas de las menas a procesar, basada en una nueva mineralogía tecnológica o aplicada, que a la vez pueden predecir, cuales menas pueden afectar el proceso de sedimentación de las pulpas lixiviadas en los sedimentadores gravitacionales de la tecnología HPAL y tomar con estos resultados, estrategias con la aditivación de determinados reactivos o compuestos, para mitigar o eliminar las crisis que se originan con las pulpas lixiviadas en dicha tecnología.

Como se había descubierto con antelación, la alta variabilidad, tanto química, como mineralógica de las menas actuales, con respecto a las pulpas lixiviadas procesadas en décadas anteriores, <sup>(23, 24 y 25)</sup> se observó la influencia negativa que presenta el contenido de elemento químico del Cobre en las menas alimentadas, esto repercute al lixiviarse en las fases amorfas de hierro como son la lepidocrocita y limonita, donde el  $\text{Cu}^{+1}$  actúa en la formación de flóculos electroquímicos, muy necesarios para la floculación-sedimentación de las lamas y coloides de sulfatos de hierro hidratados (SBH), que quedan en suspensión o presentan baja velocidad de sedimentación, que con bajas concentraciones de cobre en el sólido alimentado estos sulfatos de hierro hidratados ocasionan crisis de sedimentación- clarificación, los cuales fueron muy bien estudiados en años precedentes <sup>(2, 27)</sup>.

Según el mecanismo siguiente:



Esta reacción establece la coprecipitación conjugada del **Cobre I**, con los coloides de Hierro,  $\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , formando una estructura de  $\text{CuFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Donde los sulfatos básico de hierro hidratados (SBH) con 4 y 20 moléculas de agua fueron descubiertos en los sólidos de las pulpas críticas e identificados por difracción de Rayos  $-X$  en, <sup>(27)</sup> estos actúan aglomerándose por efecto electroquímico durante la transformación del cobre pentihidratado a  $Cu^{+1}$ , considerado este como un aditivo perfecto para determinadas pulpas crudas, su mecanismo está basado en la formación de floculos por cargas electroquímicas dentro de las pulpas lixiviadas, aumentado el tamaño de las partículas, que originan un acrecentamiento de la fuerza de gravedad, al aumentar el tamaño de partículas por atracción electroquímica de los flóculos o lamas de hierro, fundamentada en la Ley de STOKES, dado el aumento de su masa y con ello, una clarificación del licor producto por una mejor separación líquido/sólido en este proceso hidrometalúrgico.

Posteriormente fue experimentado en el año 2006, al observarse los pocos efectos que ocurren con las menas de mezclas de Limonita-serpentinitas o serpentinitas, al no actuar el aditivo de cobre pentahidratado sobre las pulpas lixiviadas generadas con estas últimas menas como mezclas o naturales, se descubre posteriormente que el uso de compuestos de potasio, como aditivo para las pulpas crudas alimentadas a las autoclaves a escala de banco, esta mejoraba los resultados del proceso, esto permitió el perfeccionamiento de dicho procedimiento, <sup>(12)</sup> inicialmente se procedió con el uso del sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) como reactivo químico para aditivar, posteriormente para aumentar la densificación, se logró utilizar de forma eficiente, el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), al actuar este, sobre los sólidos formados de las pulpas lixiviadas, en forma comúnmente conocidas como menas limonitas, especialmente con bajo contenido de níquel, incluso en minerales de escombros lateríticos o minerales de alto contenido de hierro, también actuó sobre sólido lixiviado de menas de pulpas cruda de tipo Limonita-serpentinitas, su influencia mayor estuvo en la formación de estructuras favorables para aumentar de modo general la clarificación y densificación de las pulpas lixiviadas, generadas con estos tipos de menas o minerales en forma de pulpa, incluso parcialmente en pulpas lixiviadas de mezclas de limonita-serpentinitas,

aunque actúa en menor medida o no se observan cambios, sobre las pulpas lixiviadas generadas de menas con características de silicatos de magnesio naturales o artificiales (es decir, con serpentinitas solamente).

Esto originó dentro del reactor que se formaran estructuras muy favorables. Como consecuencia de la aditivación de los compuestos de potasio, se forman estructuras de tipo Jarositas Potásicas ( $\text{KFeSO}_4 \cdot (\text{OH})$ ) y Alunitas Potásicas ( $\text{KAlSO}_4(\text{OH})$ ), lo interesante del caso, es que dichas estructuras no se forman a presión atmosférica, aspecto por el cual, no se habían descubierto para la mejora de las crisis de sedimentación de las pulpas lixiviadas en la tecnología HPAL.

Además de lo investigado, es posible estimar con antelación, dado el perfeccionamiento en dicha parte del proceso, con el uso a través de la nueva herramienta de diagnóstico de la calidad de la mena alimentada de tipo: FS (Feed Slurry) <sup>(7, 8, 9, 10, 11)</sup> y aditivar sólo aquellas, donde la herramienta brindada de diagnóstico previo, identifique las menas o minerales necesarios a aditivar, es decir, antes de alimentarse al reactor de lixiviación, para evitar sus posibles comportamientos anómalo en la operatividad del proceso subsiguiente, que pueden generar crisis de clarificación y densificación de los sólidos lixiviados.

<sup>(10)</sup> Por lo tanto, se escogerá el aditivo a utilizar, según las necesidades para su operatividad de las pulpas a transformar y según los costos de producción y precios del níquel en el mercado internacional, ya que con la herramienta de identificar la calidad, no será necesario aditivar las pulpas que realmente no la necesiten, convirtiendo esto un proceso racional de aditivación, referente a este aspecto no se ha encontrado referencias sobre este tema de investigación.

Esperamos que estos resultados, no solo enriquezcan el conocimiento de tecnólogos de dicho proceso, investigadores y personal operativo. Esto permitirá abrir una nueva forma de hacer más productiva y eficiente el procesamiento de las menas en la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión en los momentos actuales, al procesarse minerales con bajos contenidos de níquel y altos de hierro, a partir de su procesamiento racional con la previa identificación de la calidad de las menas, es decir, previo a su procesamiento

dentro de la dinámica industrial y su racional procedimiento de aditivación, con compuestos químicos adecuados, que no alteran la operatividad del proceso hidrometalúrgico subsiguiente, es una estrategia imperiosa a tener en cuenta hoy en día.

## Fundamentación Teórica

- **Procedimiento de aditivación**

El procedimiento integral para evitar las crisis de sedimentación parcial o total de las pulpas lixiviadas, está caracterizadas por:

1.- Identificación de la calidad de la mena a procesar, a través de la herramienta de cálculo, que identifica la mineralogía tecnológica o aplicada a bajo costo de análisis, al introducir los datos químico-físicos en la hoja de cálculo, el cual nos brinda automáticamente las principales fases mineralógicas de las menas en estudio y propuesta para su procesamiento, esto se realiza por previa calibración por Difracción de rayos-X y otras técnicas de propiedades magnéticas y sus transformaciones, <sup>(1, 10)</sup> especialmente de las principales fases mineralógicas en la mena en estudio, que pueden presentar las fases de hierro en estado amorfo o semi - cristalina, como las fases de limonita ( $\text{FeO} \cdot \text{OH}$  - fase amorfa) y la lepidocrocita ( $\gamma \text{FeOOH}$ ) (con su comportamiento de dualidad), fases de altos contenidos de pérdida de constitución estructural y de muy fácil formación de sulfatos básico hidratado de hierro al reaccionar con el ácido sulfúrico y vapor de agua a alta presión, esto sucede a más bajas temperaturas, principalmente debe suceder en la práctica metalúrgica en el reactor A de cada tren de lixiviación a escala industrial, que durante su temprana lixiviación dentro de los reactores, forman las lamas o colides que generan crisis de clarificación y como consecuencias, malas velocidades de sedimentación de las pulpas lixiviadas (Consideradas menas de tipo limonitas de alto contenido de hierro químico y generalmente menas con bajos contenido de % Ni, en valores inferiores a los 1,20 % en las pulpas crudas).

Además, la hoja de cálculo brinda posibles datos o resultados de orientación operativa del proceso hidrometalúrgico, para que los tecnólogos u operarios del proceso, tomen estrategias para su correcto procesamiento metalúrgico por previas correlaciones realizadas. <sup>(10)</sup>

2.- Aditivar a las pulpas crudas o que presentan con menas tipo: FS, en forma de pulpas a alimentar a los reactores de lixiviación o autoclaves, con aditivos químicos según las necesidades operativas del proceso, con una concentración de 2,5 a 3 g/L.

3.- Se necesita previa identificación químico-física de los sólidos de las menas a procesar, a través de los procedimientos físicos <sup>(7, 8)</sup> y su caracterización de la composición química de los elementos (% Ni, % Fe, % Mg, % SiO<sub>2</sub> y % Al) a través de la técnica de fluorescencia de rayos-X (RFX) o por Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).

4.- En caso que las menas a procesar, provengan de menas en forma de mezclas (Artificiales o naturales) de tipo: Limonita-serpentinitas o totalmente serpentinitas, existen la posibilidad de mejorar su sedimentación, no solo la clarificación de las pulpas lixiviadas, también el proceso de densificación de estas, con sólo adicionar compuestos de potasio, como por ejemplo: el Sulfato de Potasio, aunque una mejoría sustancial de la sedimentación, se ha observado en varias experimentaciones realizadas, <sup>(4, 5, 6, 9, 10, 18, 25)</sup> con limonitas y mezclas de estos tipos de pulpas (limonita-serpentinitas), con silicatos de magnesio en abundancia, con el aditivo por excelencia del: Dicromato de Potasio. El cual el potasio, no sólo actúa sobre las Jarositas y las Alunitas, también actúa sobre los coloides esponjados del ácido silícico, formados de la sílice libre y el talco, que forman una pasta con altas viscosidades en la tecnología de lixiviación ácida a presión y donde el cromo, se incluye en estas estructuras, favoreciendo la densificación de las Alunitas Potásicas y las Jarositas Potásicas, lo que convierten a estas estructuras más densas.

Ese efecto del cromo fue explicado en décadas anteriores por el especialista soviético Dr. Salomon Izrailevish Sobol <sup>(14, 15, 17, 21, 22)</sup> estudioso de dicho proceso

en las pulpas lixiviadas, pero que presentamos su uso efectivo, al estar de forma conjugada el K y Cr.

Ambos presente en este compuesto químico, al reaccionar con los sólidos de tipo FS, que se forman dentro de los reactores de lixiviación o autoclaves de experimentación a menor escalado investigativo.

El uso de este compuesto químico, es una mezcla perfecta, funciona como clarificador, por el Potasio (K) y densificador por el Cromo (Cr), no sólo actúa en la clarificación de las pulpas, también con una mejoría de la densificación de los sólidos con este tipo de pulpas críticas de sedimentación, dejando licores productos mejorados, con mayor área unitaria en los sedimentadores, incluso una parcial mejoría con pulpas totalmente serpentiniticas, se observa que existe un mejor comportamiento siempre de la clarificación de estos tipos de pulpas lixiviadas, provenientes de las mezclas limonita-serpentinitas y en algo parcialmente o en menor grado de las menas lixiviadas de tipo serpentiniticas.

5.- Aditivar solamente aquellas pulpas las cuales sean totalmente identificadas previamente con la herramienta de cálculo desarrollada en Microsoft Excel. Obtenida en el proyecto FONCI de los años 2017 – 2018. <sup>(10)</sup> Específicamente para menas o minerales con alto contenidos de la fase mineralógica amorfa de tipo limonita, con valores identificados mayores a 1,5 % y superiores a 1 % de la fase lepidocrocita, presentes en toda la masa o sólido caracterizado con anterioridad, los resultados se obtienen por las diferencias entre la masa total de hierro y las restantes fases cristalinas de hierro identificadas, y por último, se identifica la lepidocrocita por los análisis termomagnéticos conocidos convencionalmente y desarrollados en el 2009 por calentamiento oxidativo y su identificación del aumento de sus propiedades magnéticas, análisis desarrollado en la Unidad de Proyecto del CEDINIQ, con el objetivo de identificar y cuantificar las fases amorfas y semi-cristalinas de hierro. <sup>(1, 5, 7, 9, 10)</sup>

Como logro científico, pueden eficientemente usarse el Cobre Pentihidratado o cualquiera de los aditivos de potasio propuestos (Sulfato de Potasio o Dicromato de Potasio), especialmente cuando estas fases exceden el valor

crítico normado en la hoja de cálculo desarrollado por previas caracterizaciones realizadas en investigaciones prácticas y protegidas por el Centro Nacional de Derecho de Autor. <sup>(29)</sup>

## Materiales y métodos

Los principales materiales que se usan durante la experimentación son:

- Mineral Laterítico (Limonita).
- Tamiz de 20 mallas.
- Autoclave de (7) L de capacidad de la firma Parr® 4842 Pressure Reactor (650 psi),  
Missouri, EE.UU.
- Ácido Sulfúrico (98,18 %) y Agua.
- Probetas de 1000 ml para el estudio de la velocidad de sedimentación y compactación del sólido lixiviados al cabo de 1 y 2 horas.
  - Relación Ácido/Mineral: 0.30 g/g
  - Aditivo: Sulfato de Potasio ( $K_2SO_4$ ) y Dicromato de Potasio ( $K_2CrO_7$ ).

En la tabla 1, se pueden ver las condiciones de explotación llevadas a cabo.

**Tabla 1-** Condiciones de explotación

Variables	Unidad de medida	Magnitud
Presión	psi	525 (~ 36 atm)
Tiempo de reacción	Min.	60
Temperatura	C°	246
Relación Ácido/mineral	g/g	0.30

## Análisis y discusión de los resultados

### Interpretación de la mineralogía tecnológica o práctica

A partir de las barras de frecuencias que se muestran de forma cuantitativa, se pueden identificar en la figura 1, la cual muestra algunas fases mineralógicas de hierro identificadas en forma cuantitativa en un gráfico de barras de frecuencia.

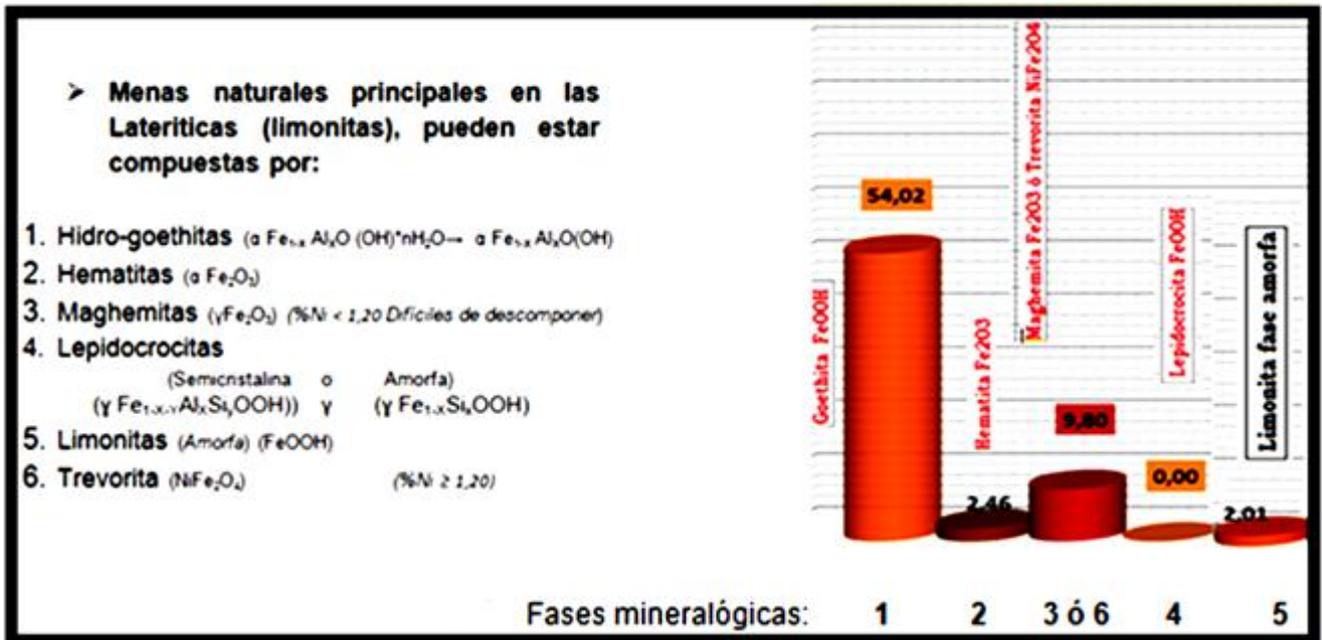


Fig. 1- Algunas fases mineralógicas de hierro identificadas en forma cuantitativa en un gráfico de barras de frecuencia

En la figura 2 se muestran algunas fases mineralógicas de las menas serpentiniticas, identificadas en forma de gráficos de barras.



**Fig. 2-** Algunas fases mineralógicas de las menas serpentiniticas identificadas en forma de gráficos de barras

En dependencia de las fases mineralógicas que componen las menas o minerales y a su descomposición térmica, es decir, a las temperaturas de tratamiento que sean tratadas, se pueden clasificar: en fáciles de descomponer y difíciles, que caracterizan la posibilidad de liberar de sus estructuras los elementos valiosos de Ni, Co u otros, para su posterior lixiviación de estas, en los procesos industriales, según la tecnología a que fueron destinadas.

Retomar los conocimientos existentes en la literatura especializada sobre la geología de los minerales serpentiniticos o menas serpentiniticas de hierro-níquel, según: (26), permiten considerar hoy en día una visión más detallada sobre las menas serpentiniticas, especialmente valoradas como estructuras complejas, que al recibir tratamiento térmico a altas temperaturas, se descomponen a diferentes y elevadas temperaturas 500 – 850 °C, a presión atmosférica en sus óxidos componentes, según la reacción siguiente:



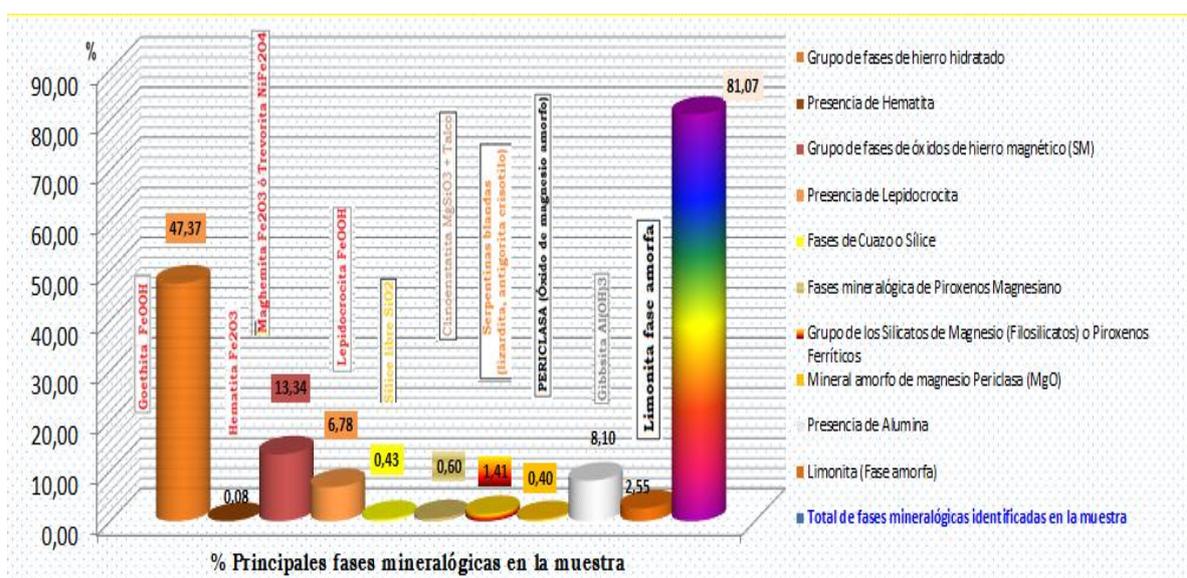
Ejemplos de menas que generan pulpas lixiviadas y crean crisis de sedimentación, además se muestran las menas que presentan comportamientos normales en los sedimentadores de la Planta de Lavaderos en la tecnología HPAL.

En la tabla 2 se muestra un ejemplo de la composición química-física de la mena limonita crítica, que al formarse la pulpa cruda tipo FS, generan crisis de sedimentación de las pulpas lixiviadas.

**Tabla 2-** Composición química-física de la mena limonita crítica

% Ni	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% Mg	% PC <sub>400</sub> °C	% PC <sub>500</sub> °C	% FM <sub>100</sub> °C	% FM <sub>250</sub> °C	% Al
1,02	42,91	2,36	0,28	11,18	12,06	15,63	21,57	7,09

En la figura 3 se muestra la mineralogía tecnológica de una mena comúnmente llamada limonítica o laterita natural, generalmente con elevados contenidos de la fase de hierro de la fase mineralógica de tipo: lepidocrocita, identificadas con un valor superior a los 3 %, lo que genera mala clarificación del licor producto en las pulpas lixiviadas, a pesar de tener muy bajos contenidos de silicatos de magnesio.



**Fig.3-** Mineralogía tecnológica de una mena comúnmente llamada limonítica o laterita natural

Aditivar solamente aquellas pulpas con Sulfatos de Potasio o Dicromato, cuando la identificación de las menas según el programa cálculo, además presenten elevados contenidos de silicatos de magnesio o mezclas de limonitas-serpentinitas. (Se recomienda este aditivo, dado su efectividad para eliminar o mitigar las crisis de sedimentación por clarificación o densificación con pulpas que generen crisis) generalmente donde las fases de clinoenstantita ( $Mg, FeSiO_3$ ) y talco ( $Mg_3(OH)_2 Si_4O_{10}$ ), sean superiores a los 5 % de la masa total de la muestra tipo FS, aunque funciona para los otros silicatos de magnesio comúnmente identificados, como son las lizarditas níquelíferas, las antigoritas y los crisotilos, por mencionar fases de silicatos de magnesio de fácil descomposición térmica, que al reaccionar con el agente lixivante ( $H_2SO_4$ ), forman los sulfatos de magnesio, que al intensificarse su presencia en altas concentraciones en las pulpas lixiviadas, puede interferir en la sedimentación de las pulpas lixiviadas.

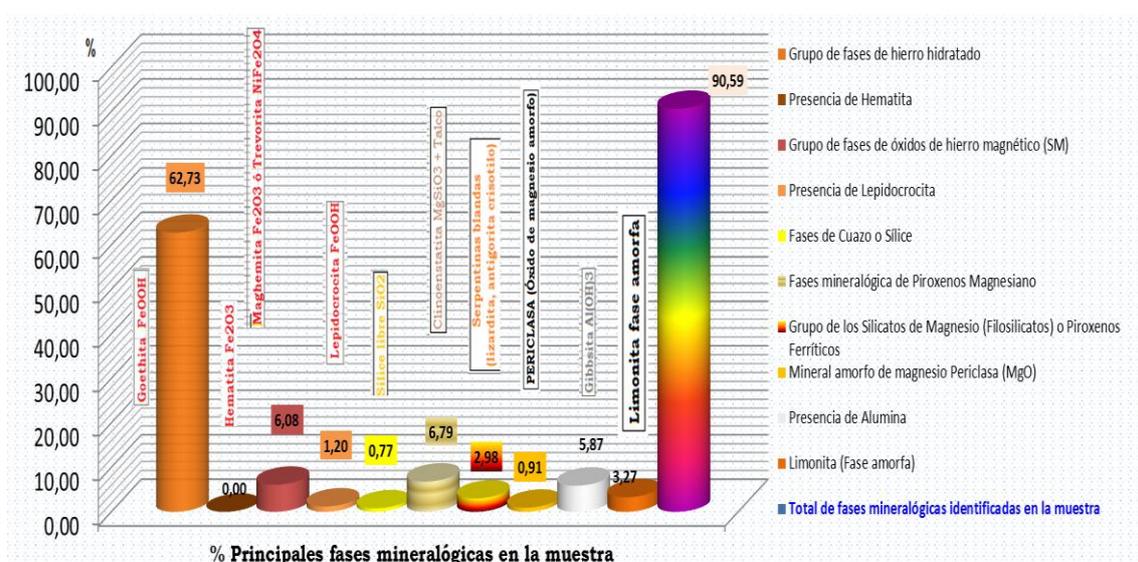
Recordar que los autores de dicha tecnología, concibieron dicha tecnología, sólo para las menas de tipo lateritas de alto contenido químico de hierro (comúnmente llamadas y erróneamente como: limonitas dado que esta es una fase amorfa de las lateritas de alto contenido de hierro), no fue desarrollado para menas de tipo de mezcla natural o artificial: limonita-serpentinitas o serpentiniticas. (2, 3, 6, 10, 13, 16, 19, 20 y 25).

En la tabla 3 se muestra la composición química-física de la mena crítica de tipo FS con elevado contenido de silicatos de magnesio.

**Tabla 3-** Composición química-física de la mena crítica de tipo FS con elevado contenido de silicatos de magnesio

% Ni	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% Mg	% PC <sub>400</sub> °C	% PC <sub>500</sub> °C	% FM <sub>100</sub> °C	% FM <sub>250</sub> °C	% Al
1,12	41,5	4,52	1,53	9,47	12,18	5,72	6,86	5,58

En la figura 4 se muestra la mineralogía tecnológica, de una mena con elevados contenido de la fase de limonita, superior a 2,83 % y de la fase de silicatos de magnesio en forma de clinoenstatita-talco, con un contenido superior a 5 %, este genera crisis de clarificación y densificación del sólido presente en las pulpas lixiviadas, en cambio el contenido de lepidocrocita, está por debajo del límite de 3 % para que genere crisis de clarificación.



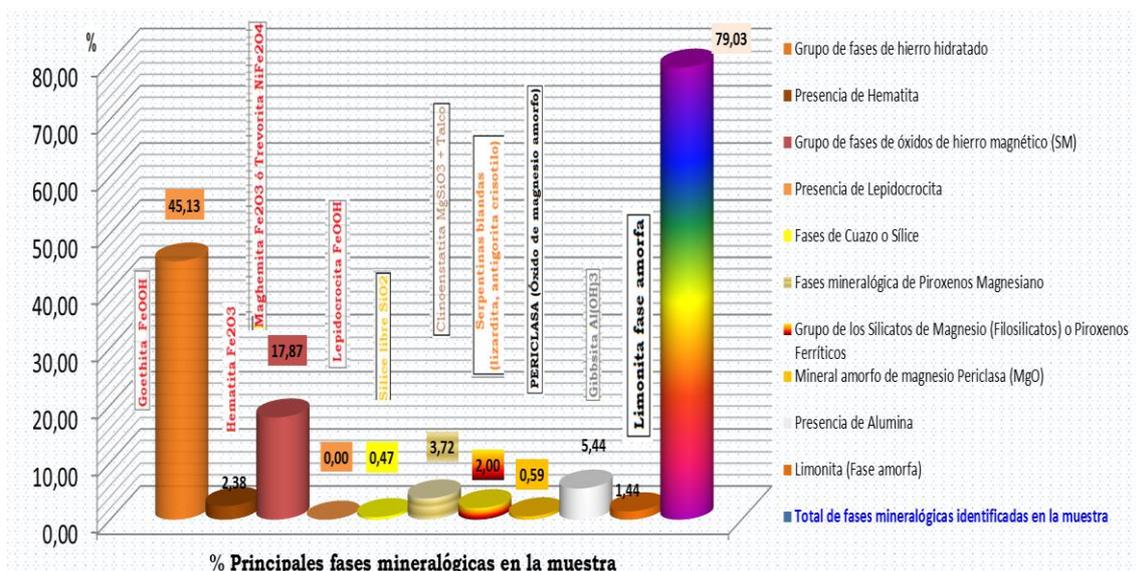
**Fig. 4-** Mineralogía tecnológica, de una mena con elevados contenidos de la fase de limonita y de la fase de silicatos de magnesio

La tabla 5 muestra un ejemplo de pulpas crudas de tipo FS, con comportamiento normal, que no necesitan ninguna aditivación de los compuestos químicos propuesto en este artículo, tampoco floculación química.

**Tabla 5-** Ejemplo de pulpas crudas de tipo FS, con comportamiento normal

% Ni	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% Mg	% PC <sub>400</sub> °C	% PC <sub>500</sub> °C	% FM <sub>100</sub> °C	% FM <sub>250</sub> °C	% Al
1,26	47,26	2,65	1,25	8,60	11,26	24,60	20,30	4,98

La figura 5 muestra un ejemplo de la mineralogía tecnológica de una mena de laterita de procesamiento industrial normal, menas muy adecuadas para dicha tecnología.



**Fig. 5-** Ejemplo de la mineralogía tecnológica de una mena de laterita de procesamiento industrial normal

A continuación se muestran desde la tabla 5 hasta la 8 muestra datos de la caracterización y parámetros operacionales de ejemplos de realización práctica, para proporcionar un mejoramiento de la sedimentación de las pulpas lixiviadas con la adición de sulfato de potasio, donde se usa adicionado a la pulpa cruda que se alimenta a la autoclave, con previa identificación química y magnética, ya que el aditivos no funcionan en la mejora sustancial para todo tipo de mena laterítica, por ende, se recomienda identificar esta previamente, a través de la mineralogía tecnológica o práctica, mostrada anteriormente, especialmente funciona para menas de limonitas y en menor accionar, para altos contenido de silicatos de magnesio en mezclas con limonitas, es decir, funciona eficientemente para limonitas con bajos contenidos de níquel en el mineral alimentado con alto contenido de hierro químico y con bajas o altas propiedades magnéticas y con fases mineralógicas abundantes de limonita y lepidocrocita.

Ejemplo del uso del sulfato de potasio en pulpas crudas para la mejora de la sedimentación de las pulpas lixiviadas según (4 y 25).

En la tabla 6 se muestra la composición química del sólido que compone la pulpa cruda de los distintos yacimientos mineros con aditivo ( $K_2SO_4$ ) y sin este (normal).

**Tabla 6-** Composición química del sólido que compone la pulpa cruda de los distintos yacimientos mineros con aditivo ( $K_2SO_4$ ) y sin este (normal)

Código del sólido presente en la pulpa generada de determinado yacimiento minero	Ni	Co	Fe	Cu	Zn	Mn	MgO	FM	Ar
Pulpa Cruda de <b>Camarioca Sur</b> (Normal)	1,270	0,170	42,97	0,018	0,032	0,704	0,830	3,730	4,238
Pulpa Cruda de <b>Camarioca Sur</b> con 80 g de $K_2SO_4$ + 10 ml $H_2SO_4$	1,251	0,165	41,99	0,017	0,032	0,725	0,800	5,19	7,372
Pulpa Cruda de <b>Moa Oriental</b> (Normal)	1,173	0,115	41,95	0,014	0,031	0,604	1,36	17,37	7,00
Pulpa Cruda de <b>Moa Oriental</b> con 80 g de $K_2SO_4$ + 10 ml $H_2SO_4$	1,221	0,105	43,41	0,014	0,032	0,603	1,44	37,26	6,22

Nota; % FM: Fracción Magnética, Ar: Arena

En la tabla 7 se muestran las extracciones de los distintos elementos con aditivo y sin este en (%).

**Tabla 7-** Extracciones de los distintos elementos con aditivo y sin este en (%).

Pruebas	Ni	Co	Fe	Cu	Zn	Mn	Mg
Pulpa Cruda de Camarioca Sur (Normal)	92,362	91,526	2,957	82,393	83,794	58,802	75,089
Pulpa Cruda de Camarioca Sur con 80 g de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 10 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	94,333	91,743	4,092	86,109	88,647	67,929	83,197
Pulpa Cruda de Moa Oriental (Normal)	91,034	92,039	1,133	72,071	84,618	83,737	80,155
Pulpa Cruda de Moa Oriental con 80 g de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 10 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	90,405	92,204	13,256	76,027	85,675	83,302	88,801

En la tabla 8 se muestra la velocidad de sedimentación al cabo de una hora y de dos con pulpa aditivada y sin esta.

**Tabla 8-** Velocidad de sedimentación al cabo de una hora y de dos con pulpa aditivada y sin esta

Pruebas	Sedimentación pulpa cruda		Sedimentación pulpa lixiviada	
	mm/h	mm/2h	mm/h	mm/2h
Pulpa Cruda de Camarioca Sur (Normal)	131	200	4	35
Pulpa Cruda de Camarioca Sur con 80 g de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 10 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	175	206	147	161
Pulpa Cruda de Moa Oriental (Normal)	173	210	22	36
Pulpa Cruda de Moa Oriental con 80 g de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 10 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	178	217	57	75

A continuación se muestran en la tabla 9 hasta la 12, el del reactivo químico como aditivo, más eficiente para estos usos. Para ello, se experimentó adicionar a la pulpa cruda: Dicromato de potasio, con varias contracciones de 0, 20, 40 y 80 g/t.

En la tabla 9 se muestra la composición química del mineral utilizado como mena crítica de comportamiento operativo en los sedimentadores de lavado de la pulpa lixiviada.

**Tabla 9-** Composición química del mineral utilizado como mena crítica de comportamiento operativo en los sedimentadores de lavado de la pulpa lixiviada

Elementos	Ni	Co	Fe	Mg	Mn	Al	SiO <sub>2</sub>	Cr	Cu	Zn	FM
<b>Pulpa Cruda</b>	1.62	0.096	42.77	1.72	0.648	3.31	8.85	1.62	<b>0.009</b>	0.036	16.45

En la tabla 10 se representa la velocidad de sedimentación de la pulpa lixiviada natural sin aditivo cada 10 minutos de medición.

**Tabla 10-** Velocidad de sedimentación de la pulpa lixiviada natural, sin aditivo cada 10 minutos de medición

	Minutos					
Vs [ mm/h ]	10	20	30	40	50	60
Altura [ mm ].	8	16	31	48	58	66

En la tabla 11 muestra la velocidad de sedimentación de la pulpa lixiviada generada de la misma pulpa cruda de la tabla 9, pero esta vez aditivada con 80 g/t cada 10 minutos de medición.

**Tabla 11-** Velocidad de sedimentación de la pulpa lixiviada generada de la misma pulpa cruda de la tabla 9, pero aditivada con 80 g/t cada 10 minutos de medición

	Minutos					
Vs [ mm/h ].	10	20	30	40	50	60
Altura [ mm ].	31	94	152	160	171	180

En la tabla 12 se muestra de forma comparativa con varias dosis del aditivo.

**Tabla12-** Forma comparativa con varias dosis del aditivo

Exp.	Dosis	Altura	$\rho$	pH
	[ gA/T ].	[ mm ].	[ Kg/L ].	Licor final
		en 1 hora	Pulpa	
1	0	66	1.272	1.05
2	20	96	1.271	0.95
3	40	164	1.268	0.92
4	80	180	1.267	0.94

En la tabla 13, se observan las diferencias en cuanto a la velocidad de sedimentación de las pulpas lixiviadas y las extracciones en (%) de los elementos químicos con la mena natural y con un proceso de aditivación a la pulpa cruda.

**Tabla 13-** Diferencias en cuanto a la velocidad de sedimentación de las pulpas lixiviadas y las extracciones en (%) de los elementos químicos con la mena natural y con un proceso de aditivación a la pulpa cruda

Vs [ mm/h ].	Ext Ni	Ext Co	Ext Fe	Ext Al	Ext SiO <sub>2</sub>
66	94.65	91.52	0.095	78.5	0.090
Vs [ mm/h ].	Ext Ni	Ext Co	Ext Fe	Ext Al	Ext SiO <sub>2</sub>
180	93.62	90.63	0.022	54.53	0.074

Los resultados de la recuperación a escala de banco muestran, una disminución de los elementos valiosos de Ni y Co, cuando se adiciona el  $K_2Cr_2O_4$ , aunque no sucede para todas las corridas efectuadas y no mostradas en el presente artículo; independientemente se extrae menor concentraciones de los elementos acompañantes, lo que favorece en la calidad del producto final, muy propicia a menas de limonitas y en menor efecto a menas de mezclas de limonita-serpentinitas.

Significa que es preciso adicionar los aditivos en el justo momento de descomponerse las fases mineralógicas portadoras del Ni y Co, para que estos elementos pasen a solución, y posteriormente se crean estructuras mineralógicas favorables, que se deben lograr formar, en las autoclaves, al agregar los aditivos, con el objetivo de lograr una buena sedimentación de las pulpas lixiviadas y una mejor recuperación del Ni y Co.

Con dicho procedimiento, debe aumentar la productividad del proceso, con respecto a muestras críticas, durante su proceso en conjunto de la clarificación-densificación, al hacerse más dinámica la operatividad del proceso de forma continua, con respecto a las que no se adicione el dicromato de potasio o sulfato de potasio.

## **Conclusiones**

El uso de la mineralogía tecnológica permite obtener un diagnóstico integral previo de la calidad de las menas, dando paso en la identificación de aquellos sólidos presentes en la pulpa cruda que generan crisis de clarificación y densificación de las pulpas lixiviadas, sin la necesidad de experimentar dicho proceso de lixiviación a menor escalado.

La dosificación de reactivos o aditivos propuestos a determinadas pulpas crudas, con previa identificación de la mineralogía tecnológica, permite mayor estabilidad del proceso de sedimentación de las pulpas lixiviadas. De esta forma se evita las crisis de sedimentación de estas, en busca de mejoras en la operatividad del proceso hidrometalúrgico en la planta de lavadero.

### Referencias bibliográficas

1. GEHRING A. U. and A. M. Hofmeister. The transformation of lepidocrocite during heating: a magnetic and spectroscopic study” (1994); *Clays and Clay Minerals*, **42** (4), p. 409--415.
2. MIRANDA López, J.: “Nueva Interpretación de las crisis de sedimentación originadas por las pulpas lixiviadas en la planta de lixiviación ácida a presión Moa Nickel S.A. “Pedro Sotro Alba”, *Revista Cubana de Química*, (2002), **XIV** (3) p. 52 - 60.
3. MIRANDA López J.: “Cronología de los antecedentes históricos de la explotación de los yacimientos lateríticos por la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión”, *Revista Cubana de Química*, **XV** (1), p. 3 – 8. (2003)
4. MIRANDA López, J. y C. M. Sam Palanco. “Fundamentación teórica y solución práctica en el mejoramiento de la sedimentación de las pulpas Lateríticas, en la Tecnología de Lixiviación Ácida a Presión”; Registro: 1916 – 2006, Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA), (2006), C. Habana, Cuba.
5. MIRANDA López, J. “*Metodología para la evaluación previa de la eficiencia metalúrgica, a partir de las características físico - químicas de los minerales alimentados a los procesos industriales (Mineralogía tecnológica o aplicada)*”, resúmenes en la V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales CINAREM, ISMM de Moa, 11/10/2009.
6. MIRANDA López, J. y Ciro Sam Planco “*Re-evaluación de la fundamentación teórica y solución práctica en el mejoramiento de la sedimentación de las pulpas crudas y lixiviadas para determinados tipos de lateritas en la tecnología Ácida a Presión de las lateritas (Mineralogía-Crisis de sedimentación: 2014)*, Informe Técnico, CEDINIQ-UNI.
7. UPL-PT-G-21 “*Procedimiento técnico del análisis térmico-magnético*” (estudio mineralógico), Vigencia REV. 3., 1 septiembre/2015, UPL, CEDINIQ.

8. UPL-PT-G-23 “*Procedimiento técnico para determinar la pérdida del agua de constitución*” (estudio mineralógico), Vigencia REV. 3., 1 septiembre/2015, UPL, CEDINIQ
9. MIRANDA I. J A. Véliz Y P. Merencio. “*Estudios de las tecnologías Caron y de lixiviación ácida a presión durante el procesamiento las lateritas de baja ley de níquel y de los escombros lateríticos clasificados como: menas industriales o minerales no industriales*”, IX Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales “CINAREM’2017, ISMM de Moa, Dr. Antonio Núñez Jiménez; 14 – noviembre del 2017. <http://cinarem.ismm.edu.cu/resumenes/METALMATER17/Jorge%20Miranda%20Lopez-Estudios%20teorico-preciticos....pdf>
10. MIRANDA López, J., Ernesto López Almira, N. Capote Flores, Loraine Quintero Toirac y Odalis Guerra González. Proyecto 600303, FONCI, CITMA Nacional, “*Programa de cálculo del diagnóstico de las menas alimentadas a los reactores de lixiviación*”, (2017-2018), Informe Técnico, CEDINIQ.Moa
11. MIRANDA López J., A. Véliz Jardines Y. Marsilli Mustelier. “*Índices de control de la calidad de las menas FS en la tecnología HPAL*”, VII Congreso Cubano de Minería (MINERIA”2019), Memoria de GEOCIENCIAS, (2019), ISSN: 2307-499X.
12. MIRANDA López J. L; Sam Palanco C., GRESESQUI MEDINA W. “*Resultado Destacado en el Fórum de Ciencia y Técnica correspondiente al año 2019 de la Unidad de Proyecto Laboratorio del CEDINIQ*”, “*Aditivación con compuestos de potasio a pulpas tipo FS*”, (2019), CEDINIQ, Moa.
13. CASTELLANOS S. J. et al. “*Estudio de las propiedades Físico-química de las pulpas de limonita*”. INFOMIN, 4(2), Julio-Diciembre del 2012.
14. SOBOL S. I.: “*Composición mineralógica de las Lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de Lixiviación del mineral por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en autoclaves*”, Revista Tecnológica, Trabajo N<sup>o</sup> 2, (1968), Cuba.
15. SOBOL, S.I., Rybak, R.S, Kasianov, O.M, Rudnichenko, V.E. y otros, “*Maggemite y okisliennys nikeliev rudoj*”, Noticias de la Academia de Ciencia de la URSS, Serie de Geología. *Revista Tecnológica*, 1, 1969.
16. SILVA, J. Y L. Chaviano Rodríguez. “*Análisis de las posibles causas que originaron las crisis de sedimentación en Espesadores y lavaderos*”, Planta de lavadero, (1980), Informe técnico, Moa.
17. SIMONS C. S. 1956 “*Cinética de la lixiviación ácida del mineral de Moa*”, Planta Piloto Braithwaite, E.U.A. 9/6/1956.

18. MIRANDA López J., SAM PALANCO. C: M: *Solicitud de patente 2002-069*, “*Aditivación compuestos de potasio a pulpas crudas*”, OCPI, C. (2002) Habana (Abandonada por parte del CEDINIQ).
19. CARLSON Theodore E. and Courtney Stuar. S. “*Pressure Leaching of Nickeliferous Laterites with Sulfure Acid*”, AIME, USA, (1960).
20. CERPA N. A., P. Tartaj, T. García-González, C. J. Serna , C. J. Serna “*Influencia del tamaño y forma de partícula en las propiedades coloidales y reológicas de suspensiones lateríticas*”, Univ. de La Habana, Conferencia de Química 99, (1999). Informe técnico.
21. SOBOL S. I. and Kukoev, V. A: “*Structure of tailings particles obtained following the Sulphuric acid leaching of oxidized nickel ores*”; The Soviet Journal of Non-Ferrous Metals, Aug. pp.13-14, (1972).
22. SOBOL S. I.: “*Cálculos de la elevación de la capacidad de los reactores de lixiviación de la fábrica de Moa, basado en la separación de las maghemitas de las colas*”, ECPISA, (1974), Informe Técnico, Moa.
23. PEÑA A. E. R; Cala C. Y; Capote F. N; Casanova G. A; Toledo S. C; Milia G. I. y E. Lisabet S. “*Caracterización mineralógica de tipologías del comportamiento geoquímico de las lateritas del oriente cubano, Ciencias de la Tierra y el Espacio*”, enero-junio, 2017, **18**(1), pp12-23, ISSN 1729-3790.
24. SAM C. P, A. Calzada García y J. Miranda López. “*Evaluación preliminar para mejorar la sedimentación de la pulpa lixiviada en el TK-1 de la Planta de Lavaderos de la Moa Nickel*”. CEDINIQ-Moa Nickel S.A. –PSA, Informe Técnico, (2006).
25. GRESESQUI Medina W. *et al.*: “*Caracterización y lixiviación de muestras de mineral tomadas en los diferentes frentes de minería de la fábrica Pedro Soto Alba*”, CEDINIQ, Informe Técnico, 2019.Moa
26. Haldemann, E. G *et al.* “*Geology of lateritic Deposits Dominican Republic*”, International Laterite Symposium AIME, New York, pags. 42 – 56, 1979.
27. MIRANDA L. J. “*Interrelación de la mineralogía con la tecnología de lixiviación ácida a presión*”, Informe técnico, CEINNIQ, Moa, (2000).

### **Conflictos de interés**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

### **Contribución de cada uno de los autores del artículo.**

Jorge Miranda López: Conformación como autor principal de la investigación y el artículo presentado.

Wilmer Gresesqui Medina: Participó en el estudio, conformación y revisión del artículo, actual.

Ciro Manuel Sam Palanco: Participó como investigador y experimentador.