

CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES AURÍFEROS DE LA ZONA MINERA DE SAN PEDRO FRÍO (BOLÍVAR- COLOMBIA), PARA LA SELECCIÓN DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN

CHARACTERIZATION OF AURIFEROUS ORES FROM THE MINING ZONE OF SAN PEDRO FRIO (BOLIVAR- COLOMBIA) TO SELECTION THE EXTRACTIVE PROCESSES

J. J. YÁNEZ TRASLAVIÑA

*Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, Universidad Industrial de Santander. Sede UIS
Guatiguará. Km. 2 Vía El Refugio, Piedecuesta, Santander-Colombia. Telefax: (57 7) - 6550802
julianyanez@hotmail.com*

I. H. GARCÍA PÁEZ

*Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, Universidad Industrial de Santander.
biohidro@uis.edu.co biohidro@uis.edu.co*

J. E. PEDRAZA ROSAS

*Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, Universidad Industrial de Santander.
jpedraza@uis.edu.co*

D. LAVERDE CATAÑO

*Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, Universidad Industrial de Santander.
dlaverde@uis.edu.co*

Recibido para revisar 24 de Febrero de 2004, aceptado 26 de Julio de 2004, versión final 10 de Diciembre de 2004

RESUMEN: Los procesos de beneficio y tratamiento de minerales auroargentíferos, existentes actualmente en la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar), conllevan a sistemas poco eficientes con porcentajes de recuperación de oro no mayores al 40%. El presente trabajo es la recopilación de los resultados de análisis y caracterización de minerales auroargentíferos de dicha zona minera. Con este artículo, se intenta incentivar a los mineros a realizar un desarrollo compaginado con la universidad, ya que según los resultados obtenidos durante esta investigación, es posible lograr porcentajes de disolución de oro de hasta el 85% para los minerales de San Pedro Frío. Esta afirmación fue posible proponerla, mediante los análisis de la caracterización del mineral.

Mediante la caracterización fisicoquímica del mineral, fue posible la estimación de ciertas condiciones de los procesos metalúrgicos involucrados en una posible planta de tratamiento, es así que el porcentaje de sólidos más adecuado para el manejo de los sólidos en pulpa fue del 40% en peso, la alta cantidad de minerales arcillosos podrían dificultar los procesos de separación sólido-líquido, entre otros especificaciones operativas.

Según la caracterización mineralógica y metalúrgica, el tamaño promedio del oro presente en el mineral, se encuentra a una granulometría menor a 75 μm , esto indica que el proceso de cianuración por agitación resultaría el más adecuado. Los resultados de la lixiviación

diagnóstico, arrogaron resultados muy satisfactorios, ya que el 94% del oro en las muestras se encuentra como oro libre, lo cual podrá incidir en tiempos cortos de cianuración.

PALABRAS CLAVES: Extractiva del oro, caracterización, cianuración, lixiviación diagnóstico.

ABSTRACT: The benefit and treatment process of auriferous minerals that actuality are apply in San Pedro Frio's Miner Place, this carry a slightly efficient systems with percentages of gold recovery not bigger than 40 %. The present work is the summary of the results of analysis and characterization of minerals auriferous of the above mentioned mining zone. With this article, one tries to stimulate the miners to realize a development reconciled with the university, since according to the results obtained during this research, it is possible to achieve percentages of gold dissolution of up to 85 % for the minerals of San Pedro Frio. This affirmation was possible to propose it, by means of the analyses of the characterization of the mineral.

By means of the physicochemical characterization of the mineral, there was possible the estimation of certain conditions of the metallurgical processes involved in a possible plant of treatment, it is so the percentage of solid more adapted for the managing of the solid ones in flesh was 40 % in weight, the high quantity of clay minerals they might impede the processes of separation solidly - liquid, among others operative specifications

According to the mineralogical and metallurgical characterization, the average size of the present gold in the mineral, one finds to a minor grain 75 μm , this indicates that the cyanidation process for agitation would turn out to be the most suitable. The answer of the leaching diagnosis, they assumed very satisfactory results, since 94 % of the gold in the samples is as free gold, which will be able to affect in cyanidation short times.

KEY WORDS: Gold extraction, characterization, cyanidation, leaching diagnostic.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia la mayoría de los yacimientos auríferos son beneficiados y extraídos, sin tener conocimiento preciso de las características de los diferentes tipos de mena en que se presenta este metal precioso, esto ha llevado a un desajuste entre los equipos, los procesos y los parámetros operacionales requeridos para el correcto funcionamiento de una planta de extracción. El desconocimiento de esto acarrea una baja recuperación de oro, mal aprovechamiento de los recursos minerales y altos niveles de contaminación de varias zonas mineras de nuestro país.

En este artículo se presentan los resultados de la investigación, correspondientes a la caracterización de dos tipos tecnológicos de minerales auroargentíferos, provenientes de la zona minera de San Pedro Frío, ubicada en el Departamento de Bolívar, ya que los procesos actualmente implementados por los mineros

de esta zona minera (trituración, molienda, amalgamación, cianuración en tinas (percolación) y cementación con viruta de zinc), conllevan a porcentajes de recuperación no mayores al 40% del oro presente en el mineral.

Mediante una correcta caracterización mineralógica, fisicoquímica y metalúrgica de los tipos tecnológicos de mena, composites, se plantearon los posibles procesos y algunas parámetros de operación, para lograr porcentajes de recuperación de oro de hasta el 90%, sin el uso del proceso de amalgamación. Un ensayo complementario a las fracciones gravimétricas, es la distribución granulométrica del oro. Este ensayo se realizó con el mineral molido hasta D80 = 60 mallas Tyler. La muestra molida (500 g), fue pasada a través de una serie de 4 tamices, se recolectó y pesó el mineral retenido en cada malla. Posteriormente, se determinó la cantidad de oro en cada fracción

granulométrica, mediante la técnica combinada de ensayo al fuego seguido de absorción atómica.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Los dos tipos tecnológicos de mena fueron analizados microscópicamente por la técnica de análisis de material particulado, por difracción de rayos X y por secciones delgadas pulidas. Mediante esta caracterización, se determinó la composición mineralógica, la ocurrencia y distribución del oro en los finos, livianos y pesados.

2.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Con la caracterización geoquímica, se determinaron los tenores de oro y plata de cada una de las muestras, esto se realizó por las técnicas de ensayo al fuego convencional y ensayo al fuego seguido de absorción atómica. Además se determinaron por técnicas de análisis químico elemental como: Espectroscopía de Masa de Plasma Acoplada Inductivamente (ICP-MS), Análisis Instrumental por Activación Neutrónica (INAA) y Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Acoplada Inductivamente (ICP-OES); las concentraciones de algunos elementos que pudieran interferir en los procesos de extracción.

2.3 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA

Debido a que los procesos metalúrgicos extractivos requieren del manejo de pulpas, es necesario determinar algunas características fisicoquímicas del mineral tales como: Densidad, nivel de acidez, tipo de sales solubles, velocidad de sedimentación, viscosidad de pulpa y porcentaje de retención de líquidos.

2.4 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

Con el fin de determinar la respuesta del mineral frente a los procesos de beneficio y extracción, y de esta manera predecir su comportamiento metalúrgico, se realizaron los siguientes ensayos: Índice de Bond, distribución del oro por fracciones granulométricas, grado de lixiviabilidad y la distribución del oro en diferentes matrices.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos y un análisis de estos.

3.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Las tablas 1 y 2 contienen los resultados del análisis microscópico de cada composites, donde se muestran las composiciones mineralógicas presentes en la mena, en la ganga y en las alteraciones y en óxidos.

Tabla 1. Composición mineralógica del composite oxidado

Table 1. Mineralogic composition of oxide composite

| % | Mena | % | Ganga | % | Alteraciones y óxidos |
|----|--------------|----|-----------|----|-----------------------|
| tr | Oro electrum | 40 | Cuarzo | 40 | Hematita-Goethita |
| 3 | Pirita | 15 | Moscovita | tr | Magnetita |
| tr | Calcopirita | tr | Zircón | tr | Rutilo |
| tr | Galena | tr | Titanita | | |

tr: < 0,5%.

Tabla 2. Composición mineralógica del composite sulfurado**Table 2.** Mineral composition of sulphurized composite

| % | Mena | % | Ganga | % | Alteraciones y óxidos |
|----|--------------|----|-----------|----|-----------------------|
| tr | Oro electrum | 40 | Cuarzo | 8 | Hematita-Goethita |
| 40 | Pirita | 10 | Moscovita | 1 | Rutilo |
| tr | Galena | 1 | Zircón | tr | Magnetita |
| tr | Esfalerita | tr | Titanita | tr | Ilmenita |
| tr | Arsenopirita | tr | Clorita | | |
| | | tr | Turmanita | | |

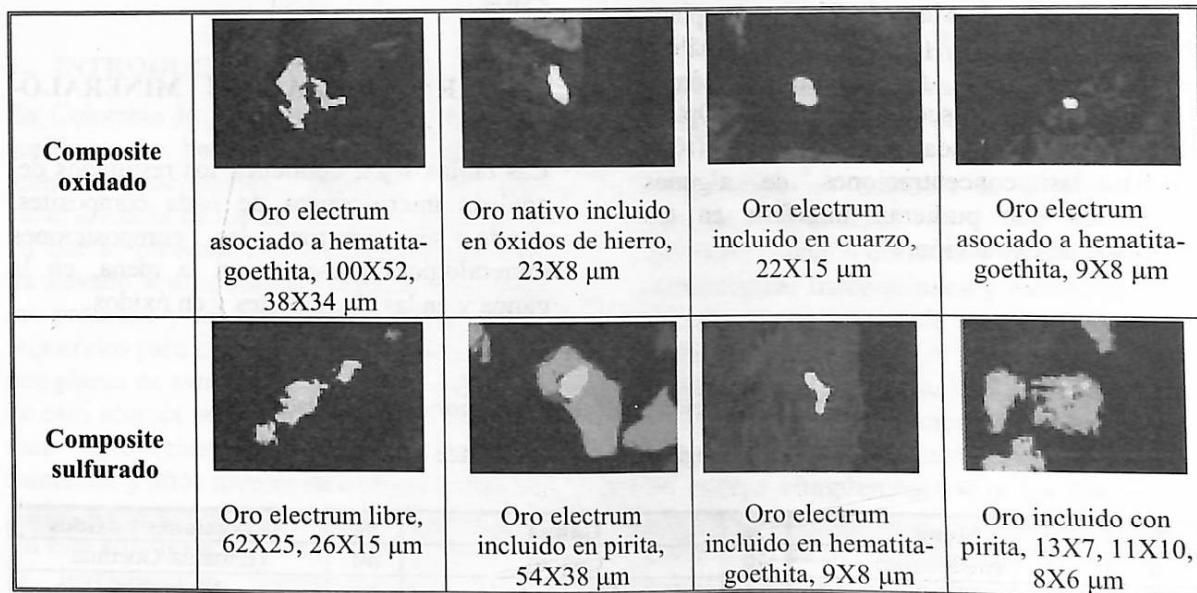
tr: < 0,5%

La presencia de minerales consumidores de cianuro y de oxígeno, tales como los óxidos de hierro y sulfuros de hierro respectivamente (*Lopez, M.E., 1999*), indican que durante el proceso de lixiviación, el composite oxidado será controlado por la concentración de cianuro y para el composite sulfurado, el control lo ejercerá el oxígeno disuelto.

Por otra parte, los dos composites contienen cantidades apreciables de arcilla, situación que dificulta el proceso de lixiviación, ya que las arcillas aumentan la viscosidad de la pulpa, dificultando la difusión del oxígeno en

la solución. Este problema es más crítico para el composite sulfurado por presentar además minerales consumidores de oxígeno. Otros minerales que se presentan en pequeñas cantidades como la galena, calcopirita y esfalerita actúan como consumidores de cianuro.

Mediante la caracterización mineralógica, también se determinó la ocurrencia y el tamaño promedio de las partículas de oro. En la Figura 1 se presentan algunas de las micrografías, obtenidas durante este análisis.

**Figura 1.** Ocurrencia del oro en cada composites**Figure 1.** Gold occurrence in each composite

Según las micrografías tomadas, la mayor ocurrencia del oro es como libre o asociado a óxidos. Sin embargo, no se debe descartar la necesidad de aplicar un pretratamiento al proceso de cianuración que permita la exposición y/o liberación del oro, debido a que se encontraron algunas muestras con oro incluido en sulfuros.

Es importante resaltar que el tamaño de las partículas de oro es muy pequeño, tamaños inferiores a 100 μm , lo que indica que será necesario reducir el mineral hasta una granulometría fina para lograr exponer o liberar el oro. Por otra parte, al presentarse el oro tan fino, la cinética de su disolución es rápida, debido a una mayor área de contacto con la solución lixiviante, lo cual es favorable para el proceso de cianuración.

Debido a las diferentes ocurrencias de mineralización del oro, es posible encontrarlo asociado a minerales en distintos tamaños o fracciones gravimétricas. La determinación de estas fracciones, es un parámetro

importante para la selección de los procesos de extracción, así como para la estimación del grado de molienda requerida para lograr la mayor liberación o exposición del oro bajo el menor consumo energético. Los ensayos de separación en fracciones másicas se realizaron al mineral molido D100 = 80 mallas Tyler, mediante un proceso de separación por medios densos. La fracción de finos, corresponden a aquellos minerales no sedimentables después de 5 minutos de sedimentación en una pulpa en agua destilada al 5 % peso de sólidos; los livianos, es la fracción de minerales no sedimentables en una solución cuya densidad sea 2,964 g/mL (Tetraboetano, TBE) y los gruesos es la fracción restante de las anteriores.

En la Tabla 3 se muestran los porcentajes en peso de finos, livianos y pesados que conforman cada uno de los composites.

Tabla 3. Porcentajes en peso de mineral presente en finos, livianos y pesados para cada composites.

Table 3. Weight percentages of mineral in fines, lights and weight for each composites

| Composite | Finos (%) | Livianos (%) | Pesados (%) |
|-----------|-----------|--------------|-------------|
| Oxidado | 46,5 | 41,5 | 12,0 |
| Sulfurado | 48,2 | 36,6 | 15,2 |

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los porcentajes de oro distribuido en finos, livianos y pesados.

Tabla 4. Distribución del oro en los finos, livianos y pesados para cada composite

Table 4. Gold distribution in fines, lights and weights for each composite

| Composite | Porcentaje de oro (%) | | |
|-----------|-----------------------|----------|---------|
| | Finos | Livianos | Pesados |
| Oxidado | 24,9 | Trazas | 75,1 |
| Sulfurado | 23,1 | 1,0 | 75,9 |

Alrededor del 50% del mineral de cada muestra se encuentra en los finos, además la cantidad de oro presente en ellos es alta,

alrededor del 30%, esto corrobora la ocurrencia del oro libre a tamaños muy finos. El oro presente en los livianos es aquel que viene asociado o incluido a la sílice, por esta

razón este oro puede ser recuperable por los métodos convencionales de cianuración, ya que depende del grado de liberación o exposición del oro durante el proceso de conminución.

La mayor cantidad de oro se encuentra en el mineral pesado, es decir en los sulfuros y óxidos.

Según estos resultados, el uso de procesos de concentración gravimétrica o de lavado para eliminación de arcillas, previos al proceso de cianuración, no son aplicables para este mineral, ya que se occasionarían pérdidas considerables de oro en los finos. Sin embargo es posible pensar en el tratamiento

de finos y pesados por separado, dependiendo de los resultados metalúrgicos, ya que como se puede observar el porcentaje de mineral pesado es bajo (15%) y contiene más del 75% del oro,

3.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Durante la caracterización geoquímica, se determinaron los tenores de oro y de plata de cada composite, cuyos resultados se muestran en Tabla 5. En la Tabla 6 se presentan los tenores químicos determinados para algunos elementos importantes.

Tabla 5. Tenores de oro y de plata de los composites.

Table 5. Gold and silver in composites

| Composite | Tenor de oro (g/t) | Tenor de plata (g/t) |
|-----------|--------------------|----------------------|
| Oxidado | 12,04 | 6,08 |
| Sulfurado | 17,68 | 29,64 |

La relación Au:Ag de los composites oxidado y del sulfurado fueron de 2 y 0,6 respectivamente, según esta relación es posible aplicar procesos de recuperación con carbón activado (*Cardenas, R., 1994*). Para minerales con elevadas cantidades de plata y

bajas de oro, no se recomienda usar carbón activado, ya que la plata compite con el oro durante el proceso adsorción, haciendo que se manejen altos inventarios de carbón activado para recuperar pequeñas cantidades de oro, lo cual no es rentable industrialmente.

Tabla 6. Tenores químicos de algunos elementos presentes en los composites

Table 6. Chemical composition of elements in composites

| Composite | Te | As | Sb | Zn | Cu | Pb | Fe | S |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| | (g/t) | (g/t) | (g/t) | (g/t) | (g/t) | (g/t) | % | % |
| Oxidado | 27,0 | 371 | 5,2 | 340 | 347 | 180 | 12,6 | 0,034 |
| Sulfurado | 34,6 | 315 | 6,2 | 1570 | 410 | 811 | 13,4 | 3,247 |

El telurio es un elemento que se encuentra frecuentemente en menas auroargentíferas, cuando en forma de compuestos de oro-telurio, la mena que lo contiene no responden a los procesos de lixiviación, impide la

extracción del oro dándole refracteridad química al mineral (*Domic, E., 2001*).

El arsénico y el antimonio, pueden estar presentes como arsenopirita (FeAsS) y estibina (Sb₂S₃). Estos minerales son perjudiciales durante el proceso de

cianuración, ya que la arsenopirita consume oxígeno formando un producto que se adhiere a la partícula del oro inhibiendo la reacción con el cianuro; y la estibina es un fuerte consumidor de cianuro y oxígeno (Cardenas, A; et al., 1997).

Las cantidades de zinc, cobre, plomo, hierro y azufre corroboraron la presencia de esfarelita (ZnS), calcopirita ($CuFeS_2$), galena (PbS), pirita (FeS_2) y hematita (Fe_2O_3). El mineral sulfurado contiene mayores porcentajes de azufre, zinc y plomo con respecto al oxidado, debido a la presencia de sulfuros metálicos.

3.3 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA

Durante la caracterización fisicoquímica se determinaron algunos parámetros importantes para la selección de los procesos y diseño de los equipos de la planta de procesamiento.

- *Determinación de densidades.* Se determinaron tres tipos de densidades: densidad aparente aireada, densidad real por desplazamiento de volumen y densidad por picnometría. Para estos ensayos las muestras de mineral fueron molidas hasta un D80 a tres diferentes granulométrica. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Densidades reales y aparentes de cada composite.

Table 7. Real and apparent densities in each composite

| Composite oxidado | | | |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Densidad (g/cc) | 60 Tyler (250 μm) | 100 Tyler (150 μm) | 200 Tyler (75 μm) |
| Densidad aparente | 1,113 | 1,053 | 0,833 |
| Densidad real por desplazamiento de volumen | 2,863 | 2,858 | 3,710 |
| Densidad real picnométrica | --- | --- | 2,825 |
| Composite sulfurado | | | |
| Densidad (g/cc) | 60 Tyler (250 μm) | 100 Tyler (150 μm) | 200 Tyler (75 μm) |
| Densidad aparente | 1,112 | 1,093 | 0,909 |
| Densidad real por desplazamiento de volumen | 2,859 | 2,826 | 3,333 |
| Densidad real picnométrica | --- | --- | 2,830 |

Las diferencias notables de densidades reales por desplazamiento del mineral pasante malla 200 Ty, fue debido a la presencia de arcillas, que al estar a una granulometría fina y en contacto con agua, se hinchan al atrapar parte del líquido en su estructura cristalina (Hurlbut, C.; 1998). Esta diferencia fue más notoria en el composite oxidado debido a la mayor cantidad de arcillas que este contenía.

- *Determinación de sales solubles.* La presencia de sales solubles en los composites fue negativa, ya que según la determinación cualitativamente no se

detectaron las sales ferrosas, férricas, ni sales de cobre y de zinc. Esto indica que no es necesario pensar en el lavado del mineral antes de la cianuración, procedimiento que se acostumbra realizar para prevenir el consumo de cianuro por estas sales.

- *Determinación del grado de Acidez.* La determinación del pH es un parámetro necesario para evaluar el consumo de reactivos, teniendo en cuenta que el proceso de cianuración se realiza en un rango de pH de 10,5 a 11. El pH fue

estimado con agua destilada, siguiendo el procedimiento indicado en la norma

ASTM D 4972-89. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Acidez de los composites

Table 8. Acidity in composites

| Composite | pH |
|-----------|------|
| Oxidado | 5,25 |
| Sulfurado | 5,45 |

Según los resultados de pH, las dos menas fueron de tipo ácido y sería necesario antes del proceso de cianuración, la adición de reactivos como cal para elevar el pH a los niveles requeridos.

- Determinación de las velocidades de sedimentación. Los ensayos de velocidad de sedimentación proporcionaron criterios de selección para los procesos de

separación sólido-líquido. En la Figura 2 se muestran las curvas de sedimentación representativas de cada mena a una granulometría de 200 Tyler. Por medio del método de Coe-Clavenger (Foust, A et al., 1997; Vásquez, C. Pardavé W.; 1996) se determinaron las curvas de velocidad de sedimentación las cuales se presentan en la Tabla 9.

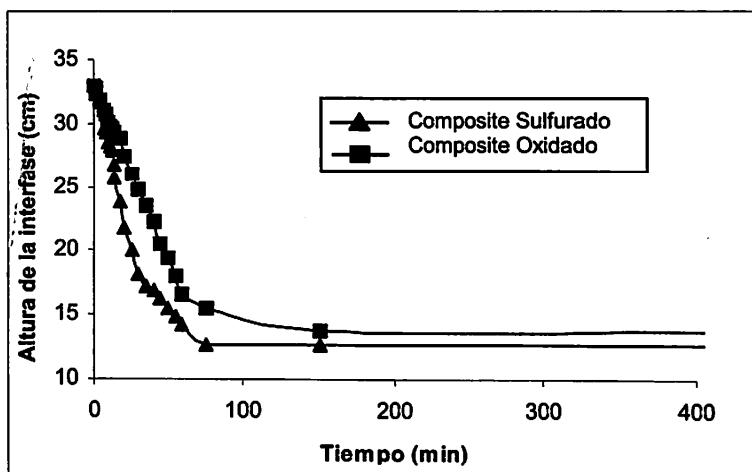


Figura 2. Curvas de sedimentación a D80 200 mallas Tyler.

Figure 2. Sedimentation curves to D80 200 Tyler mesh

Tabla 9. Velocidades de sedimentación a diferentes granulometrías, pasante 80%.

Table 9. Sedimentation velocities to different size 80% pass

| Velocidades de sedimentación | Compost Oxidado | | | Compost Sulfurado | | |
|------------------------------|-----------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
| | 60 Ty | 100 Ty | 200 Ty | 60 Ty | 100 Ty | 200 Ty |
| cm / min | 0,908 | 0,786 | 0,275 | 0,967 | 0,700 | 0,371 |

Según estos resultados, el composite oxidado presenta velocidades de sedimentación menores a todas las granulometrías, debido posiblemente a la mayor cantidad de arcillas que dificultan el proceso de sedimentación. Por tal motivo y con el fin de acelerar las velocidades de sedimentación y obtener áreas de espesamiento menores, se recomienda evaluar algunos reactivos que actúen como agentes floculantes como la cal o polímeros sintéticos.

- **Determinación de la viscosidad.** Se determinó la viscosidad en pulpa, a diferentes porcentajes de sólidos, con el fin de estimar el porcentaje de sólidos más adecuado para los procesos que involucre manejo de pulpas, especialmente en el proceso de agitación. Las muestras fueron molidas hasta una granulometría de D80 200 mallas Tyler y el equipo empleado fue un viscosímetro rotatorio de agujas. Los resultados de estos análisis se presentan en la Figura 3.

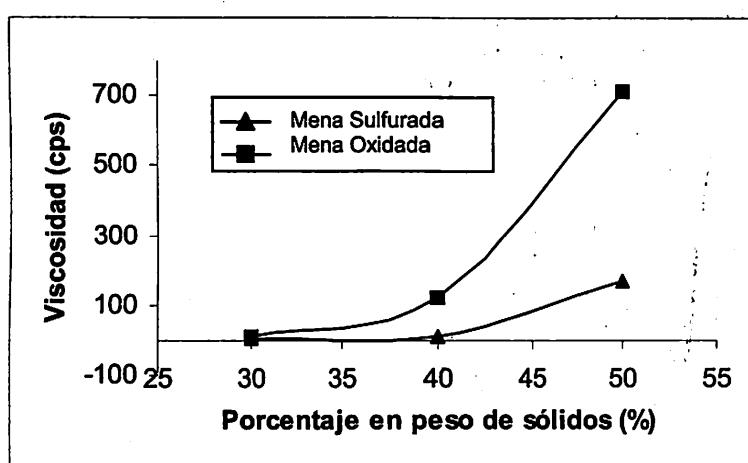


Figura 3. Curvas de viscosidad de pulpas minerales a diferentes porcentajes de sólidos en peso.

Figure 3. Viscosity curves of mineral slurries in different weight solid percentage

Se observa que la viscosidad del mineral oxidado es mayor que la del sulfurado para todo el rango de porcentaje de sólidos, este comportamiento es debido a la mayor cantidad de arcillas que tiene el composite oxidado.

Para porcentajes de sólidos mayores al 40%, se presenta un aumento excesivo en la viscosidad para ambas muestras, por este motivo se estima este porcentaje como apropiado para el manejo de pulpas durante los procesos que requieran agitación. No es aplicable tratar pulpas con porcentajes de sólidos menores al 40%, ya que se requerían equipos con mayores capacidades para tratar la misma cantidad de mineral.

- **Determinación del porcentaje de retención de líquidos.** Para la determinación de este parámetro, las muestras fueron molidas hasta una

granulometría D80 a diferentes mallas. De cada muestra se tomaron 50 gramos y se preparó una pulpa al 10% en peso de sólidos. La pulpa se mantuvo en agitación durante 2 horas a 1500 rpm, con el fin de lograr mojar todo el mineral. Posteriormente la pulpa se dejó en reposo por 24 horas y luego se filtró al vacío con papel franja negra, hasta observar el líquido en la parte superior de la torta. La torta filtrada se pesó en una balanza analítica con sensibilidad de hasta 0,1 g, y luego se secó en estufa a una temperatura de 100 °C hasta obtener un peso constante. La diferencia entre los pesos de la torta húmeda y seca, corresponde al valor de líquido retenido, el cual puede ser expresado en porcentaje, siendo el 100% el peso de la torta húmeda. Los resultados de estos ensayos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Porcentajes de retención de líquidos a diferentes granulometrías, pasante 80%.**Table 10.** Retention percentages in liquids of different size, pass 80%

| Composite | Porcentaje de retención de líquidos (%) | | |
|---------------------|---|-----------|-----------|
| | 60 Tyler | 100 Tyler | 200 Tyler |
| Composite oxidado | 30,0 | 32,5 | 35,3 |
| Composite sulfurado | 25,2 | 27,0 | 30,7 |

Los porcentajes de retención de líquidos para ambas muestras son altos. Este comportamiento predice la dificultad para la implementación de procesos de filtración. El composite oxidado presentó porcentajes de retención de líquidos mayores al sulfurado, esto se atribuye nuevamente a la presencia de arcillas y finos que retienen y obstaculizan la filtración de las soluciones.

3.4 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

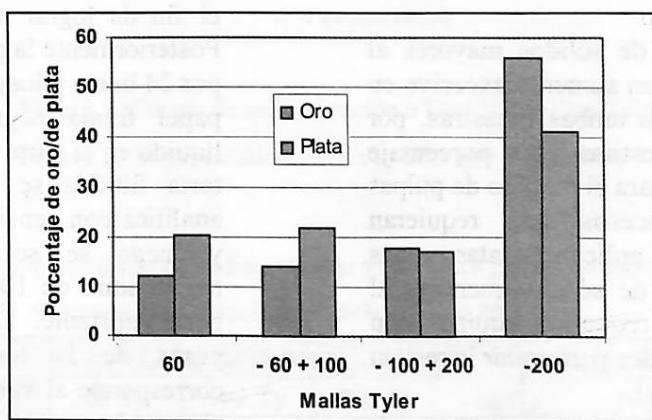
Con la caracterización metalúrgica se determinó la respuesta del mineral a los procesos beneficio y extracción.

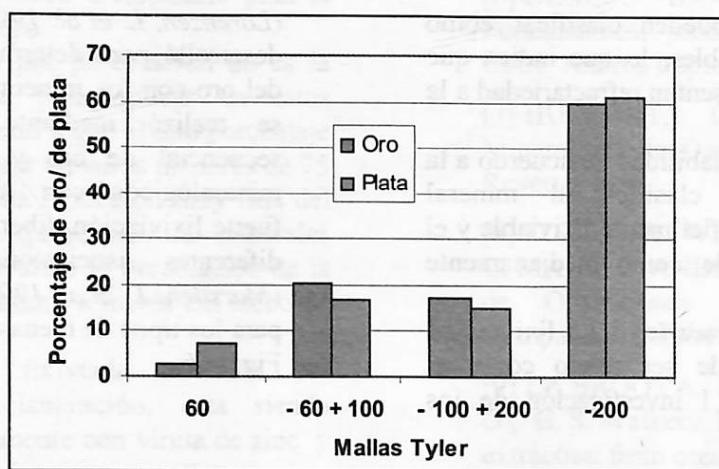
- *Determinación del Índice de Bond.* Este parámetro se determinó con el fin de estimar el consumo energético y posteriormente emplearlo en el dimensionamiento de los equipos de comminución necesarios para el montaje de la planta. Por otra parte, mediante este parámetro es posible estimar el mineral predominante en la mena, basándose en

las referencias de los índices de bond para minerales puros.

El índice de Bond o Work Index, para estos minerales fue de 14,979 Kwh/t. Esto nos corrobora los resultados de la caracterización mineralógica, en donde se estimó una cantidad de cuarzo superior al 40% en los composites; ya que el Work Index del cuarzo es 14,4 (Benvindo, A., et al, 1998).

- *Determinación de la distribución de oro y de plata por fracciones granulométricas.* Se determinó este parámetro, con el fin de establecer el rango de granulometría en el cual se encuentra el oro. Las muestras fueron molidas hasta D80 60 mallas Tyler y posteriormente tamizadas usando las mallas 60, 100 y 200 Tyler. Se peso y se determinó el tenor de oro y de palta en cada una de las fracciones granulométricas. En las figuras 4 y 5, se presentan los resultados para cada composite.

**Figura 4.** Distribución de oro y de plata del mineral oxidado**Figure 4.** Gold silver distribution fo oxide mineral

**Figura 5.** Distribución de oro y de plata del mineral sulfurado**Figure 5.** Gold and silver distribution of sulfurized mineral

La mayor cantidad de oro se encuentra en la granulometría fina, - 200 Tyler (-75 μm), lo que corrobora que el oro se encuentra a un tamaño muy fino. Por tal motivo, no es aplicable la implementación de procesos de concentración gravimétrica, ya que se perdería parte del oro en las colas de concentración. Por otra parte, para lograr exponer o liberar el oro, se recomienda moler el mineral hasta una granulometría fina, - 200 Tyler.

- **Determinación del Grado de Lixiviabilidad.** Se determinó por el ensayo de lixiviación en botella, usando como reactivo lixiviante el cianuro de sodio (NaCN). El grado de lixiviabilidad de una mena aurífera se clasifica de acuerdo al porcentaje de oro o plata disueltos a las 96 horas de tratamiento con cianuro, los resultados para cada tipo de mineral se presentan en la Tabla 11. En la Tabla 12 se presenta la clasificación del tipo de mena según el grado de lixiviabilidad.

Tabla 11. Porcentajes de oro y de plata disueltos a las 96 horas de lixiviación en botella.**Table 11.** Gold and silver percentages dissolved in 96 hours of bottle lixiviation

| Composite | Oro disuelto (%) | Plata disuelta (%) |
|---------------------|------------------|--------------------|
| Composite oxidado | 87,12 | 48,71 |
| Composite sulfurado | 94,06 | 84,77 |

Tabla 12. Grado de lixiviabilidad de un mineral de acuerdo al porcentaje de oro disuelto (*La Brooya, S. R., et al, 1994; Albert, T., 2000*).**Table 12.** Lixiviation grade of mineral as percentage of gold disolved

| Oro disuelto (%) | Grado de lixiviabilidad |
|------------------|-------------------------|
| < 65 | Difícilmente Lixivable |
| 65 - 85 | Medianamente Lixivable |
| > 85 | Altamente Lixivable |

Según la cantidad de oro disuelto, los dos composites se pueden clasificar como altamente lixiviados, lo que indica que las menas no presentan refractariedad a la cianuración.

El grado de lixiviabilidad de acuerdo a la plata disuelta, clasifica al mineral oxidado como difícilmente lixiviable y el mineral sulfurado como medianamente lixiviable.

- *Lixiviación Diagnóstico.* La lixiviación diagnóstico puede ser usado como el primer paso en la investigación de los

problemas experimentados en una planta (*Lorenzen, L. et al, 1993*). Este ensayo se desarrolló para determinar la asociación del oro con los minerales de ganga. Este se realizó mediante una disolución secuencial de oro y los componentes mineralógicos con una progresiva y fuerte lixiviación, liberando el oro de las diferentes asociaciones mineralógicas (*Marsden, J., et al, 1993*). Los resultados para los tipos de menas se presentan en la Figura 6.

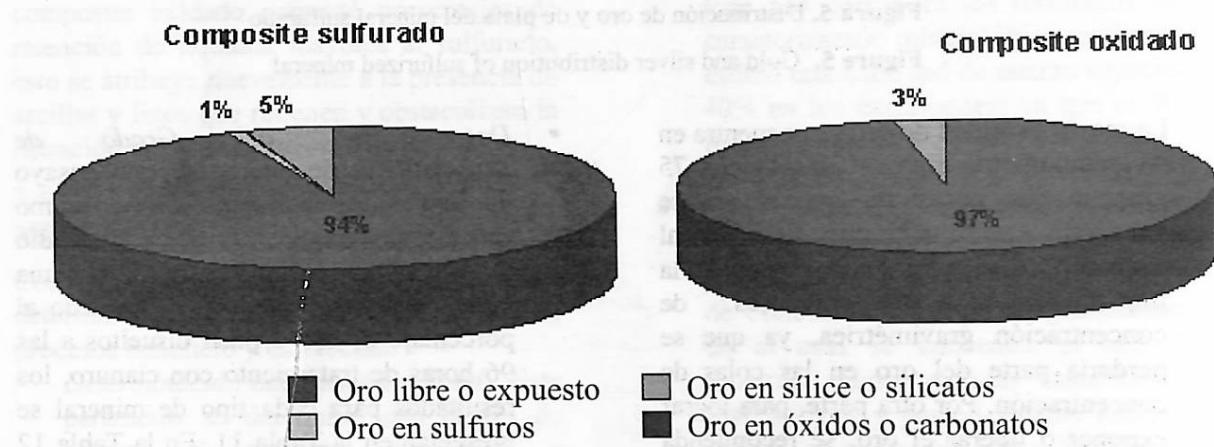


Figura 6. Ocurrencia del oro en los dos composites.

Figure 6. Gold occurrence in composites

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el oro presente en el mineral, se presenta a un tamaño muy fino ($< 75 \mu\text{m}$) y que la gran mayoría está como oro libre o expuesto. Por tal motivo se requiere que el mineral sea molido finamente para su posterior tratamiento directo de cianuración.

Se concluyó que el proceso de tratamiento apropiado para el mineral es cianuración convencional por agitación, ya que la granulometría fina es apropiada para este tipo de cianuración, trabajando con una pulpa al 40% en peso de sólidos.

Los procesos para la recuperación del oro disuelto pueden ser el proceso CIP (Carbon-

In-Pulp) o el proceso CIL (Carbon-In-Leaching), ya que la cantidad de arcillas presentes en el mineral dificultan los procesos de separación sólido-líquido. Además las cantidades de plata disueltas en la solución son bajas y no representaría excesivos consumos de carbón.

Finalmente se concluyó que los dos composites presentan comportamiento bastante similar, por lo que pueden ser mezclados durante los procesos en planta.

Se puede deducir claramente, que los problemas que se presentan actualmente en zona minera de San Pedro Frío, son debidos a múltiples factores:

- El inadecuado proceso y control de la comminución, conlleva a no lograr el

- grado de reducción o necesario para la liberación del oro.
- La lixiviación por percolación no es la más adecuada para aplicar en estos minerales, debido a que al alto porcentaje de oro presente a tamaños menores de 75 μm , implica una reducción muy fina del mineral y la presencia de minerales arcillosos, dificultan la percolación de la solución de cianuro a través del lecho de mineral.
 - La solución lixiviada obtenida del proceso de cianuración, esta siendo tratada directamente con viruta de zinc y sin desoxigenar, esto conlleva a un consumo excesivo de zinc y un alta contaminación de la solución pobre con cianuro de zinc.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Minercol, la Alcaldía del Municipio de Santa Rosa y a la Universidad Industrial de Santander por la financiación de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] ALBERT, T. General online Heap leach teswork. Kappes, Cassiday and Associates, USA, 2000.
- [2] ASTM E 400-71 Standart test meted for spectrographic analysis of ores, minerals and rocks by the Fire assay preconcentration technique. Reappoved 1988.
- [3] BENVINDO, A., VALENTE, M., DE ALMEIDA, S. Tratamiento de Minérios. Centro de Tecnología Mineral. 2^a Edición. Brasil. 1998.
- [4] BRENT, J.H. Dissolution chemistry of gold and silver in different lixiviant. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. Volumen 4, 1998.
- [5] CARDENAS, R. Metalurgia Extractiva del Oro. Bolivia. Imprenta FOCET "Imral". 1994.
- [6] DOMIC, E. Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones. Chile. Andros Impresos. 2001.
- [7] HURLBUT, C. Manual de Mineralogía de Dana. España. Editorial Reverté. 1998.
- [8] FOUST, A. WENZEL, L. CLUMP, C. MAUS, L. ANDERSEN, L. Principios de Operaciones Unitarias. México. Compañía Editorial Continental. 1997.
- [9] LA BROOYA, S. R; LINGEA, H. G., G. S. Walkera. Review of gold extraction from ores. Minerals Engineering, Volume 7, 1994, Pages 1213-1241.
- [10] LOPEZ, M.E. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de los minerales auroargentíferos. Tesis de Maestría de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Industrial de Santander, Colombia. 1999.
- [11] L. LORENZEN , J.S.J. VAN DEVENTER. The identification of refractoriness in gold ores by the selective destruction of minerals. Minerals Engineering, Vol. 6, Nos. 8-10, 1993.
- [12] MARDEN, J.; HOUSE, I. The chemistry of gold extraction. Ellis Horwood, Estados Unidos. 1993.
- [13] VÁSQUEZ, C., PARDAVÉ W. Manual de Prácticas "Procesamiento de materiales primas y manejo de sólidos particulados". Universidad Industrial de Santander. 1996.
- [14] WOTRUBA, H. Technologies for Small Scale Mining. CASM 3rd Annual Meeting and Learning Event. Elmina, Ghana. 2003.
- [15] WOTRUBA, H. Tecnología limpia para la pequeña minería aurífera. Seminario Taller. Pequeña Minería Aurífera: Hacia un manejo ambiental de mercurio y cianuro. Bucaramanga, Colombia. 2004.

Según la cantidad de oro disuelto, los dos composites se pueden clasificar como altamente lixiviados, lo que indica que las menas no presentan refractariedad a la cianuración.

El grado de lixiviabilidad de acuerdo a la plata disuelta, clasifica al mineral oxidado como difícilmente lixiviable y el mineral sulfurado como medianamente lixiviable.

- *Lixiviación Diagnóstico.* La lixiviación diagnóstico puede ser usado como el primer paso en la investigación de los

problemas experimentados en una planta (*Lorenzen, L. et al, 1993*). Este ensayo se desarrolló para determinar la asociación del oro con los minerales de ganga. Este se realizó mediante una disolución secuencial de oro y los componentes mineralógicos con una progresiva y fuerte lixiviación, liberando el oro de las diferentes asociaciones mineralógicas (*Marsden, J., et al, 1993*). Los resultados para los tipos de menas se presentan en la Figura 6.

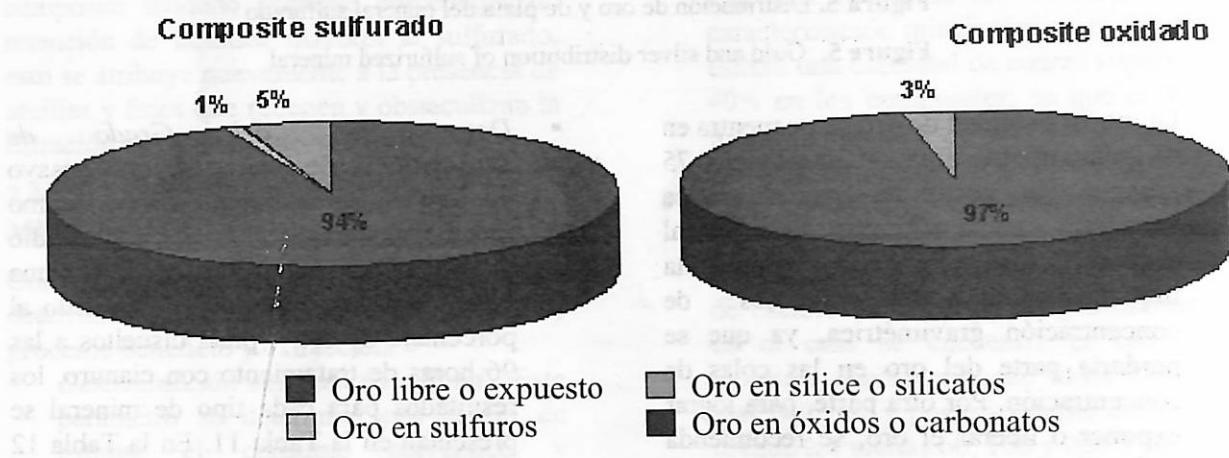


Figura 6. Ocurrencia del oro en los dos composites.

Figure 6. Gold occurrence in composites

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el oro presente en el mineral, se presenta a un tamaño muy fino ($< 75 \mu\text{m}$) y que la gran mayoría está como oro libre o expuesto. Por tal motivo se requiere que el mineral sea molido finamente para su posterior tratamiento directo de cianuración.

Se concluyó que el proceso de tratamiento apropiado para el mineral es cianuración convencional por agitación, ya que la granulometría fina es apropiada para este tipo de cianuración, trabajando con una pulpa al 40% en peso de sólidos.

Los procesos para la recuperación del oro disuelto pueden ser el proceso CIP (Carbon-

In-Pulp) o el proceso CIL (Carbon-In-Leaching), ya que la cantidad de arcillas presentes en el mineral dificultan los procesos de separación sólido-líquido. Además las cantidades de plata disueltas en la solución son bajas y no representaría excesivos consumos de carbón.

Finalmente se concluyó que los dos composites presentan comportamiento bastante similar, por lo que pueden ser mezclados durante los procesos en planta.

Se puede deducir claramente, que los problemas que se presentan actualmente en zona minera de San Pedro Frío, son debidos a múltiples factores:

- El inadecuado proceso y control de la comminución, conlleva a no lograr el

- grado de reducción o necesario para la liberación del oro.
- La lixiviación por percolación no es la más adecuada para aplicar en estos minerales, debido a que al alto porcentaje de oro presente a tamaños menores de 75 μm , implica una reducción muy fina del mineral y la presencia de minerales arcillosos, dificultan la percolación de la solución de cianuro a través del lecho de mineral.
 - La solución lixiviada obtenida del proceso de cianuración, esta siendo tratada directamente con viruta de zinc y sin desoxigenar, esto conlleva a un consumo excesivo de zinc y un alta contaminación de la solución pobre con cianuro de zinc.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Minercol, la Alcaldía del Municipio de Santa Rosa y a la Universidad Industrial de Santander por la financiación de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] ALBERT, T. General online Heap leach teswork. Kappes, Cassiday and Associates, USA, 2000.
- [2] ASTM E 400-71 Standart test meted for spectrographic analysis of ores, minerals and rocks by the Fire assay preconcentration technique. Reappoved 1988.
- [3] BENVINDO, A., VALENTE, M., DE ALMEIDA, S. Tratamiento de Minérios. Centro de Tecnología Mineral. 2^a Edición. Brasil. 1998.
- [4] BRENT, J.H. Dissolution chemistry of gold and silver in different lixiviants. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. Volumen 4, 1998.
- [5] CARDENAS, R. Metalurgia Extractiva del Oro. Bolivia. Imprenta FOCET "Imral". 1994.
- [6] DOMIC, E. Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones. Chile. Andros Impresos. 2001.
- [7] HURLBUT, C. Manual de Mineralogía de Dana. España. Editorial Reverté. 1998.
- [8] FOUST, A. WENZEL, L. CLUMP, C. MAUS, L. ANDERSEN, L. Principios de Operaciones Unitarias. México. Compañía Editorial Continental. 1997.
- [9] LA BROOYA, S. R; LINGEA, H. G., G. S. Walkera. Review of gold extraction from ores. Minerals Engineering, Volume 7, 1994, Pages 1213-1241.
- [10] LOPEZ, M.E. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de los minerales auroargentíferos. Tesis de Maestría de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Industrial de Santander, Colombia. 1999.
- [11] LORENZEN , J.S.J. VAN DEVENTER. The identification of refractoriness in gold ores by the selective destruction of minerals. Minerals Engineering, Vol. 6, Nos. 8-10, 1993.
- [12] MARSDEN, J.; HOUSE, I. The chemistry of gold extraction. Ellis Horwood, Estados Unidos. 1993.
- [13] VÁSQUEZ, C., PARDAVÉ W. Manual de Prácticas "Procesamiento de materiales primas y manejo de sólidos particulados". Universidad Industrial de Santander. 1996.
- [14] WOTRUBA, H. Technologies for Small Scale Mining. CASM 3rd Annual Meeting and Learning Event. Elmina, Ghana. 2003.
- [15] WOTRUBA, H. Tecnología limpia para la pequeña minería aurífera. Seminario Taller. Pequeña Minería Aurífera: Hacia un manejo ambiental de mercurio y cianuro. Bucaramanga, Colombia. 2004.