

# Mejora de los procesos de beneficio y extracción de minerales auroargentíferos del asentamiento minero de San Pedro Frío, Colombia<sup>(\*)</sup>

J.J. Yáñez Traslaviña\*\*, M.A. Vargas Ávila\*, I.H. García Páez\* y J.E. Pedraza Rosas\*

## Resumen

El asentamiento minero San Pedro Frío, Colombia, es una región rica en minerales auroargentíferos. Actualmente, los mineros de la región emplean procesos de tratamiento como amalgamación, cianuración por percolación y precipitación con viruta de zinc. Debido al desconocimiento de las características del mineral que allí se explota, los procesos de beneficio y tratamiento de oro y plata resultan inadecuados y poco eficientes, ocasionando, además, contaminación ambiental por el uso inapropiado del mercurio y cianuro. En este trabajo se realizó la caracterización del mineral obteniéndose parámetros fundamentales para la selección técnica de los procesos de extracción y recuperación de oro y de plata. El trabajo experimental se orientó al estudio de los procesos de cianuración por agitación y de adsorción con carbón activado en pulpa. Como resultado final, se presentó una propuesta de tratamiento para mejorar la recuperación de los metales preciosos y disminuir los niveles de contaminación ambiental.

## Palabras clave

Minerales auroargentíferos. Caracterización. Cianuración. Adsorción.

## Improvement mineral dressing and extraction processes of gold-silver ores from San Pedro Frio Mining District, Colombia

## Abstract

The San Pedro Frío district mining, Colombia, is a rich region producing gold-silver ores. Nowadays, the extraction processes used are amalgamation, percolation cyanidation and precipitation with zinc wood. Due to the ignorance of the ore characteristics, gold and silver treatment processes are inadequate and not efficient. In addition the inappropriate use of mercury and cyanide cause environmental contamination. In this research the ore characterization was carried out obtaining fundamental parameters for the technical selection of more efficient gold and silver extraction processes. Experimental work was addressed to the study of both processes the agitation cyanidation and the adsorption on activated carbon in pulp. As a final result proposed a flowsheet to improve the precious metals recovery and reduce the environment contamination.

## Keywords

Gold-silver ores. Characterization. Cyanidation. Adsorption.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la Serranía de San Lucas, Sur de Bolívar, Colombia, se encuentran ricos y prometedores yacimientos auroargentíferos<sup>[1]</sup> que, desde años atrás, vienen siendo explotados por un considerable número de pequeños mineros. Tal es el caso del asentamiento minero de San Pedro Frío, donde se tomaron las muestras minerales para realizar este estudio experimental.

El bajo nivel tecnológico predomina en la zona, a causa del desconocimiento de las tecnologías modernas y adecuadas a las características de los minerales y, especialmente, por la baja capacidad económica y organizativa de los mineros, lo que ha conllevado la implementación de procesos artesanales, produciendo como consecuencia, además de la baja recuperación del oro, que no supera el 50%, la contaminación ambiental generalizada. El mineral que se extrae de los filones, se tritura y se muele

(\*) Trabajo recibido el día 13 de junio de 2003 y aceptado en su forma final el día 1 de febrero de 2005.

(\*\*) 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. maemet17@uis.edu.co, biohidro@uis.edu.co, jpedraza@uis.edu.co

manualmente en la mayoría de los casos y, en menor grado, se utilizan trituradoras de mandíbula y molinos de pisones como alternativa de trituración y molienda. Luego, para extraer y recuperar el metal precioso, los mineros utilizan el proceso de amalgamación con mercurio en barriles de baja capacidad, seguido del tratamiento de los residuos o colas de amalgamación mediante el proceso de cianuración en tinas de percolación y, finalmente, precipitan el oro y la plata en cajas con viruta de zinc.

El uso combinado de los procesos de amalgamación y posterior cianuración de las colas, conlleva un doble impacto ambiental e, incluso, doble costo en la operación. Por medio de un correcto estudio metalúrgico del mineral, es posible el descartar uno de estos dos procesos<sup>[2 y 3]</sup>, por lo que, en la planificación de este trabajo se decidió evaluar la posibilidad de mejorar la cianuración, descartando la amalgamación que, aunque simple y efectiva en la recuperación del oro libre, no es recomendable desde el punto de vista ambiental e, incluso, en países desarrollados ya se ha restringido, por el alto riesgo y costo ambiental que su utilización implica, más si se tiene en cuenta el tipo de minería que se desarrolla en la región de estudio.

La cianuración de los minerales auroargentíferos empleada en la actualidad puede efectuarse de manera estática o dinámica, empleando diferentes métodos de lixiviación: en pilas, por percolación en tinas y por agitación en tanques<sup>[4 y 5]</sup>. Con este último método, se logra una mejor interacción entre el cianuro y las partículas de oro liberadas o expuestas, que no se alcanza con la lixiviación estática por percolación o en pilas<sup>[4]</sup>. Para la cianuración dinámica por agitación, el mineral debe molerse hasta, por lo menos, 100 mallas Tyler, 149  $\mu\text{m}$ , a fin de exponer el oro a la solución lixivante y lograr mantener el mineral en completa suspensión. La cianuración por agitación generalmente se utiliza para tratar minerales con alto contenido de metales preciosos, especialmente cuando el oro de las menas se encuentra en partículas finas, por su rápida y completa disolución en corto tiempo.

Para recuperar el oro disuelto en el proceso de cianuración, hoy en día se dispone de dos procesos de precipitación: la cementación con polvo de zinc y la electrodeposición, con o sin pretratamiento, de las soluciones cianuradas, utilizando, bien carbón activado, resinas de intercambio iónico o extracción por solventes orgánicos<sup>[5 y 6]</sup>. El Proceso *Carbon in Pulp*, CIP, en el que el carbón se añade a la pulpa de mineral después de la disolución del oro, es uno de los procesos, mundialmente, más

utilizado<sup>[4]</sup>. El otro proceso que utiliza carbón activado en pulpa es el Proceso *Carbon in Leach*, CIL, el cual presenta una variante al proceso CIP ya que, en el CIL, la adsorción del oro disuelto se produce simultáneamente con la cianuración. Este último proceso se aplica, especialmente, cuando los minerales contienen materiales adsorbentes del oro disuelto, es decir, con el conocido efecto *preg-robbing*, tales como materiales carbonáceos o algunos tipos de minerales arcillosos como la illita<sup>[7]</sup>.

Con base en las consideraciones anteriores y en pro de un mayor desarrollo tecnológico y un menor impacto ambiental en el Asentamiento Minero de San Pedro Frío, se desarrolló este trabajo con el objeto de mejorar la recuperación de oro, eliminar el uso del mercurio y disminuir la contaminación con cianuro, mediante la experimentación de los procesos de cianuración por agitación y la recuperación con carbón activado en pulpa. Antes de iniciar el estudio de estos dos procesos, se llevó a cabo la caracterización de las muestras de mineral, determinando y cuantificando las características más influyentes en los dos procesos, así como las necesarias para el diseño de una planta de procesamiento.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales

La experimentación se realizó con muestras representativas de mineral de Mina Vieja, Mina Nueva y Mina Quemada pertenecientes, las tres, a la zona minera de San Pedro Frío.

Con base en la caracterización geoquímica y mineralógica de las muestras de las tres minas se concluyó que éstas se podían clasificar en dos tipos de materiales, uno oxidado y otro sulfurado. Establecida esta clasificación, se procedió a triturar y moler todas las muestras hasta -80 mallas Tyler para, posteriormente, mezclar y homogeneizar las del mismo tipo y obtener, así, dos clases de materiales con los cuales se realizó el trabajo experimental. Los resultados que se presentan en esta publicación corresponden a los obtenidos con las muestras de Mina Vieja, que fueron muy similares a los obtenidos con las muestras de las otras dos minas.

### 2.2. Caracterización de las muestras

#### 2.2.1. Composición geoquímica

La composición elemental, para 53 elementos, incluidos oro y plata, se determinó con diferentes

técnicas espectrométricas, tanto de plasma como de absorción atómica, utilizando un espectrómetro másico de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) Elan 6000 Perkin-Elmer Sciex, un espectrómetro de emisión óptica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) Perkin-Elmer Plasma 2000 y un espectrofotómetro de absorción atómica (AA) modelo 210 VGP, Buck Scientific. Adicionalmente, los contenidos de oro y de plata, fueron determinados por la técnica de ensayo al fuego según Norma ASTM E400-02 [8].

### 2.2.2. Caracterización mineralógica

Esta, se realizó con el fin determinar las especies mineralógicas de mena, de ganga y de alteración, así como la presencia del oro en las muestras.

Inicialmente, todas las muestras recolectadas, 55 en total, tal como provenían de las minas se analizaron microscópicamente, en forma visual, con la ayuda de un microscopio estereoscópico binocular Nikon SMZ-2T. Después de seleccionar las más representativas de cada mina, se analizaron mediante difracción de rayos X y microscopía óptica de secciones delgadas pulidas, utilizando un difractómetro RIGAKU Rint 2200 y un microscopio petrográfico binocular Olympus BX60F5.

Analizando los resultados mineralógicos junto con los geoquímicos de las muestras de mina, se pudieron clasificar los minerales de las tres minas en dos tipos de menas, una sulfurada y otra oxidada, con lo que se pudieron obtener dos tipos de materiales para la experimentación. De estos dos materiales, a -80 mallas Tyler, se tomaron muestras para analizarlas como materiales particulados, utilizando las técnicas de microscopía óptica de secciones delgadas pulidas y la de absorción atómica. Para ello, se analizaron los productos obtenidos al someter las muestras, primero, a una decantación en agua, seguida de una separación en medios densos ( $2,9 \text{ g/cm}^3$ ) y luego, una separación magnética. Con esta metodología, además de las especies mineralógicas presentes en las menas, fue posible determinar la distribución del oro en los finos no sedimentables y en los minerales pesados y livianos.

Como complemento a esta caracterización también se aplicó la metodología de lixiviación diagnóstico [4], con la que se puede determinar, en muestras a determinado grado de molienda, la proporción de oro que está libre o expuesto al cianuro y el que se encuentra incluido en los diferentes tipos de especies mineralógicas, que son poco o nada solubles en soluciones cianuradas, alternando cianuración

convencional con lixiviaciones, primero, con ácido sulfúrico más dióxido de manganeso y luego, con ácido nítrico, con lo que se va liberando, progresivamente, el oro incluido en esas especies mineralógicas.

### 2.2.3. Caracterización fisicoquímica

La evaluación de algunos parámetros fisicoquímicos de los dos tipos de mineral, como son la densidad, el contenido de sales solubles, la acidez, el porcentaje de retención de líquidos, la velocidad de sedimentación del mineral en forma de partículas, la viscosidad de las pulpas minerales, se realizó con el fin de estimar las condiciones más apropiadas de los procesos de lixiviación y recuperación del oro disuelto, como también para el diseño y control de los procesos y plantas de procesamiento de estos minerales.

La determinación de las densidades se realizó por picnometría, según Norma ASTM D854-02 [9], con las muestras molidas hasta -200 Tyler. La evaluación cualitativa de las sales solubles, se realizó mediante la determinación colorimétrica de las sales ferrosas, férricas, de zinc y de cobre, en soluciones de lavado de los minerales, por adición de ferrocianuro de potasio, ferricianuro de potasio y amoníaco, respectivamente. El ensayo para estimar los niveles de acidez de los minerales, se realizó según Norma ASTM D4972-89 [10]. Las velocidades de sedimentación de las partículas de minerales a diferentes granulometrías se determinaron según el método de Coe-Clavenger modificado [11]. Las viscosidades de las pulpas de mineral se determinaron con el viscosímetro rotatorio de agujas Brookfield, según Norma ASTM D2196 Rotational [12]. La determinación del porcentaje de retención de líquidos se evaluó, a diferentes granulometrías, basándose en la variación de peso al contactar una muestra de mineral con suficiente agua y, luego, dejándola escurrir.

### 2.2.4. Caracterización metalúrgica

Con el fin de predecir el comportamiento de los dos tipos de mena frente a los procesos de beneficio y extracción hidrometalúrgica se evaluaron tanto la distribución granulométrica del oro como el grado de lixivabilidad.

Para determinar la distribución granulométrica del oro en los dos tipos de materiales, el mineral fue molido, inicialmente, hasta -42 mallas Tyler; después, por tamizado en seco, utilizando la serie

de tamices 60/100/200 mallas Tyler y pesada de cada fracción, se determinó la distribución granulométrica, en peso, de cada material. Posteriormente, a cada fracción de mineral se le determinó el contenido de oro, mediante la técnica de ensayo al fuego-absorción atómica<sup>[8]</sup>.

El grado de lixiviabilidad se determinó mediante ensayos de lixiviación en botella. Las pruebas se llevaron a cabo en un molino de rodillos, sobre el que se colocaron las botellas con la pulpa de mineral previamente preparada. Cada ensayo se realizó durante 96 h de lixiviación, manteniendo la concentración de NaCN en 1.000 ppm y el pH entre 10,5 y 11.

### 2.3. Estudio de cianuración por agitación

Este proceso se seleccionó como proceso de extracción a evaluar, tanto para las menas oxidadas como para las sulfuradas, teniendo en cuenta los resultados de su caracterización, especialmente, por el alto contenido de oro, con muy alta proporción de partículas de oro en tamaño fino e, incluso en las lamas o finos no sedimentables y, también por la presencia de minerales de alteración.

Con el fin de determinar el grado de molienda adecuado para el proceso de lixiviación, se realizaron los ensayos de cianuración a dos granulometrías, D80 100 Ty y 200 Ty. Cada ensayo se efectuó con 200 g de muestra, pulpa al 40% en peso, de sólidos, una concentración de cianuro de sodio (tipo comercial, al 96% de pureza) mantenida y controlada en 1.000 ppm de cianuro libre por un titulador automático Metrohm Titrino 751 GPD. Por otra parte, el pH de la pulpa se controló en el rango de 10,5-11, con un pHmetro Mettler Toledo MP 120, mediante la adición de lechada de cal. Estos ensayos se realizaron en vasos de vidrio con agitación de 1.000 rpm, proporcionada por un agitador mecánico Janke & Kunkel, durante 24 h.

Otra variable estudiada fue la concentración de oxígeno durante la cianuración, que se controló con un electrodo medidor de oxígeno Metrohm. Para determinar su efecto, además de las pruebas anteriores en las que el oxígeno en la solución cianurada de, aproximadamente, 4 ppm, solo se aportaba por la agitación mecánica, también se efectuaron pruebas con suministro adicional de O<sub>2</sub>, a concentraciones del orden de 8 ppm, inyectando aire durante el tiempo de cianuración de 8 h, por medio de una bomba tipo pecera regulada a un flujo de 2 ml aire/min/ml pulpa.

Con objeto de determinar las curvas cinéticas de disolución, se tomaron muestras, periódicamente, de la solución lixiviada y se cuantificaron las concentraciones de oro y de plata disueltos, mediante la utilización de la técnica espectrofotométrica de absorción atómica.

### 2.4. Estudio de adsorción de oro y plata con carbón activado

Con el fin de evaluar la cinética de adsorción de oro y plata disueltos en cada uno de los dos tipos de menas se realizaron ensayos de adsorción con pulpa de minerales, unos, posteriores a la cianuración y, otros, junto con la cianuración; es decir, se estudiaron los procesos CIP y CIL, respectivamente. El carbón activado que se empleó fue un material granulado, Filtracarb CL50 6x12, suministrado por Carbon Link Corporation, USA.

Para la realización de los ensayos de adsorción mediante el proceso CIP se tomaron 500 ml de pulpa, al 40% en sólidos, previamente cianurada y determinadas las concentraciones de oro y de plata en solución. A cada pulpa se le adicionó la cantidad estimada de carbón activado y se mantuvo en agitación a 1.000 rpm durante 8 h. Las cantidades de carbón activado evaluadas se variaron entre 0,15 y 0,70 mg carbón/g oro en solución. Con el fin de estimar la cinética de adsorción del oro y la plata, se tomaron, periódicamente, muestras de solución en las que se cuantificó la cantidad remanente de estos metales en solución, mediante la técnica de absorción atómica.

Los ensayos de adsorción de oro y plata mediante el proceso CIL se llevaron a cabo con 500 ml de pulpa, bajo las mejores condiciones determinadas en el estudio de cianuración. Por otra parte, la cantidad de carbón activado empleado para estos ensayos fue la misma que se usó en el proceso CIP cuando se obtuvieron los mejores resultados. Para la determinación de los porcentajes de oro y plata absorbidos, se cuantificaron los contenidos de estos metales en el mineral inicial y en el carbón activado cargado, mediante la técnica de ensayo al fuego.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Caracterización de los minerales

#### 3.1.1. Composición geoquímica

En la Tabla I se presentan los contenidos de oro, plata y otros elementos químicos, de interés en la

**Tabla I.** Composición geoquímica

*Table I. Geochemical composition*

Material	Au (g/t)	Ag (g/t)	Te (g/t)	Zn (g/t)	Cu (g/t)	Pb (g/t)	Fe (%)	S (%)
Oxidado	17,64	12,11	15,1	340	347	180	12,6	0,03
Sulfurado	31,75	31,00	22,6	1570	410	811	13,4	3,24

cianuración de minerales auroargentíferos, para los dos tipos de mena o materiales de experimentación.

Como se observa en esta tabla, los dos materiales presentan un alto contenido de oro, especialmente el sulfurado, lo cual lleva a suponer que, éstos, se puedan tratar, con gran economía, mediante una lixiviación por agitación, donde los costos de molienda se compensarían con la producción de oro. Por otra parte, el relativo bajo contenido de plata, con relaciones de Ag:Au, aproximadamente de 1 para el mineral sulfurado y de 0,67 para el mineral oxidado, hace posible aplicar el proceso de adsorción con carbón activado para la recuperación del oro disuelto; ya que para minerales con contenidos altos de plata no es rentable la aplicación de este proceso, debido a los altos inventarios de carbón que se necesitarían.

### 3.1.2. Caracterización mineralógica

Los resultados en cuanto a las especies mineralógicas que conforman los dos tipos de menas se presentan en la tabla II.

Los dos tipos de mena presentan un alto contenido de cuarzo, lo que indica que la resistencia a la reducción de tamaño de las muestras, está controlada por la dureza de éste. Por otra parte, la presencia de minerales arcillosos como la illita, perjudicará el proceso de lixiviación ya que se ha demostrado que ésta puede actuar como material de efecto *preg-robbin* durante la cianuración<sup>[7]</sup>. El material oxidado presenta cantidades apreciables de material alterado, implicando un alto porcentaje de finos, lo que podría dificultar las operaciones de espesamiento y filtración.

Tal y como se observa en la figura 1, el oro en estos materiales se presenta tanto *electrum* como nativo y en forma de partículas libres, asociadas e incluidas, especialmente, a minerales oxidados, en tamaños finos, entre 80 a 8 µm.

Por otra parte, el oro en estas menas molidas a -80 mallas Tyler se encuentra distribuido, tanto en

**Tabla II.** Composición mineralógica

*Table II. Mineralogical composition*

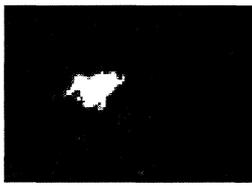
	Especie	Material oxidado	Material sulfurado
MENA (% en volumen)	Oro ( <i>electrum</i> , nativo)	Trazas	Trazas
	Pirita	1	40
	Galena	0	Trazas
	Escalerita	0	Trazas
GANGA (% en volumen)	Cuarzo	55	40
	Mica ( <i>moscovita</i> - <i>illita</i> )	20	10
	Zircón	Trazas	1
	Titanita	Trazas	Trazas
	Turmalina	0	Trazas
	Feldespato	Trazas	0
ALTERACIÓN (% en volumen)	Clorita	Trazas	Trazas
	Hematina-goethita	20	8
	Magnetita	Trazas	Trazas
	Ilmenita	Trazas	Trazas
	Rutilo	4	1

los finos no sedimentables como en los componentes livianos y pesados, con densidades menores o mayores a 2,9 respectivamente, de acuerdo a como se muestra en la tabla III.

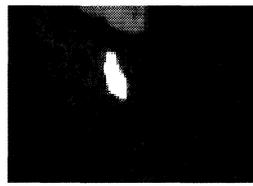
Se observa, claramente, que alrededor del 75% del oro presente en las dos menas se encuentra con los minerales pesados, es decir, con los óxidos y sulfuros metálicos; mientras que su porcentaje es muy bajo en los minerales livianos tipo cuarzo. Aproximadamente, el 24% en la fracción de las lamas o finos no sedimentables representa un porcentaje valioso de oro, recomendándose, por lo tanto, no realizar lavados o deslodados del mineral, antes del proceso de cianuración.

Los resultados del ensayo de lixiviación diagnóstico, realizado a -200 mallas Tyler, se presentan en la tabla IV, en la que se observa que, a esta granulometría de las menas el oro, está, prácticamente, todo liberado o expuesto a la acción del

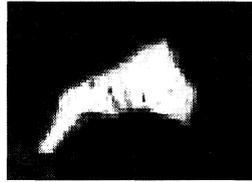
**Mineral oxidado**



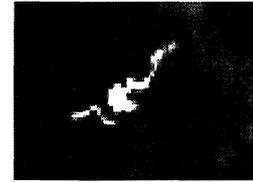
Oro electrum libre, 68x55 µm



Oro electrum incluido en hematita-goethita, 23x8 µm

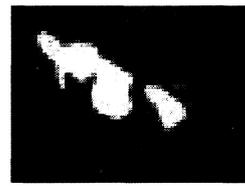


Oro nativo libre, 85x40 µm

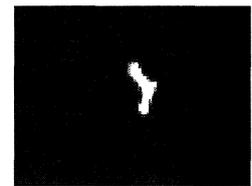


Oro nativo asociado a hematita, 145x45 µm

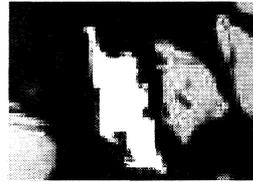
**Mineral sulfurado**



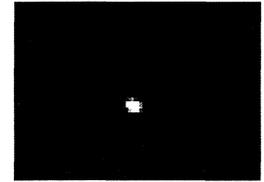
Oro electrum libre, 62x25, 26x15 µm



Oro electrum incluido en hematita, 25x12 µm



Oro electrum libre con bordes de hematita, 81x29 µm



Oro electrum asociado en hematita-goethita, 9x8 µm

**Figura 1.** Presencia del oro en las menas. Secciones delgadas pulidas.

Figure 1. Gold occurrences at ores. Thin polished sections.

**Tabla III.** Distribución del oro en finos, livianos y pesados. Mineral -80 mallas Tyler

Table III. Gold distribution in fine, light and heavy. Mineral -80 Tyler mesh

Material	Distribución de oro (%)		
	Finos*	Livianos	Pesados
Oxidado	24,72	0,59	74,69
Sulfurado	23,06	0,95	76,00

\* Lamas o material no sedimentables

**Tabla IV.** Distribución de oro determinada mediante lixiviación diagnóstica

Table IV. Gold distribution for diagnostic leaching

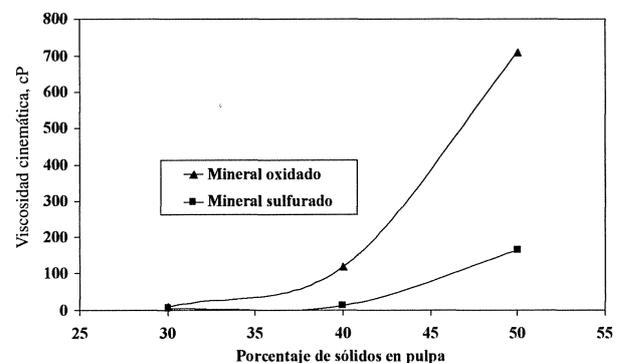
Situación del oro	Material oxidado (%)	Material sulfurado (%)
Libre o expuesto	97	93
Incluido en óxidos o carbonatos	0	5
Incluido en sulfuros	0	1
Incluido en cuarzo y silicatos	3	1

cianuro, con lo cual se esperaba una excelente cianuración por agitación a este grado de molienda.

**3.1.3. Caracterización fisicoquímica**

Los parámetros fisicoquímicos determinados brindaron una información complementaria para la selección de los procesos de cianuración por agitación y recuperación con carbón activado. En la tabla V y en la figura 2, se presentan los resultados obtenidos de esta caracterización.

Según la tabla V, no se detectó la presencia de sales solubles de hierro, zinc y cobre. Esto, indica que no es necesario lavar el mineral antes del proceso de cianuración, proceso que, normalmente, se realiza para prevenir el consumo excesivo de cianuro. La no presencia de estas sales es benéfica para estos minerales ya que en los finos se encuentra



**Figura 2.** Curvas de viscosidad de las menas.

Figure 2. Viscosity curves from ores.

**Tabla V.** Caracterización fisicoquímica

*Table V. Physicochemical characterization*

Parámetro	Tipo de material	
	Oxidado	Sulfurado
Sales solubles, Si o No	Ferrosas	No
	Férricas	No
	De cobre	No
	De zinc	No
Velocidad de sedimentación, cm/s	+ 60 Tyler	1,01
	+ 100 Tyler	0,73
	+ 200 Tyler	0,34
Retención de líquidos, %	+ 60 Tyler	30,0
	+ 100 Tyler	32,5
	+ 200 Tyler	35,3
Acidez, pH	5,3	4,3
Densidad real, g/cm <sup>3</sup>	2,82	2,83

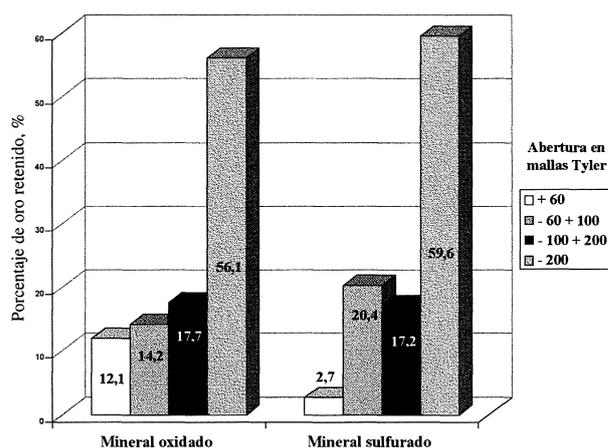
alrededor del 25% del oro total, el que sería arrastrado como lamas al realizar la etapa de lavado.

Por otra parte, las bajas velocidades de sedimentación y los altos porcentajes de retención de líquidos predicen la dificultad que estos minerales tendrán en operaciones de separación sólido/líquido, debido a la presencia, en buen porcentaje, de minerales ultrafinos y arcillosos. Así, no resulta fácil la clarificación de las soluciones, etapa necesaria en la precipitación del oro por el proceso de cementación con polvo de zinc. Para estos casos, es recomendable el uso de procesos de adsorción con carbón activado, CIP o CIL, en cuanto no se requiere de las etapas de espesamiento, filtración y clarificación para la recuperación del oro y la plata disueltos.

Según las curvas de viscosidad mostradas en la figura 2, el porcentaje de sólidos apropiado para el manejo en pulpa de estos minerales es del 40% en peso, de sólidos. Las pulpas con porcentajes mayores a este valor, presentan viscosidades altas debido a la presencia de minerales arcillosos, lo que conlleva dificultades durante la agitación y el transporte de las pulpas. Por otra parte, manejar pulpas más diluidas acarrearía sobrecostos de operación, puesto que necesitarían equipos con mayor capacidad.

### 3.1.4. Caracterización metalúrgica

Los resultados de distribución de oro y de plata por fracciones granulométricas, presentados en la figura 3, muestran porcentajes mayores al 50 % de estos metales en la fracción de -200 mallas Tyler. Es-



**Figura 3.** Distribución del oro.

*Figure 3. Gold distribution.*

to, corrobora la alta presencia del oro en las fracciones finas de los minerales.

Por otra parte, al evaluar el comportamiento de estos minerales frente al proceso de cianuración, mediante los ensayos de lixiviabilidad en botella, se logró clasificar estos materiales como minerales altamente lixiviables, según se presenta en las tablas VI y VII, lo que indica que éstos dos tipos de menas no presentan refractariedad a la cianuración.

### 3.2. Estudio del proceso de cianuración por agitación

En la figura 4 se presentan las curvas de disolución de oro de cada material, a diferentes tamaños

**Tabla VI.** Prueba de lixiviabilidad

*Table VI. Leaching test*

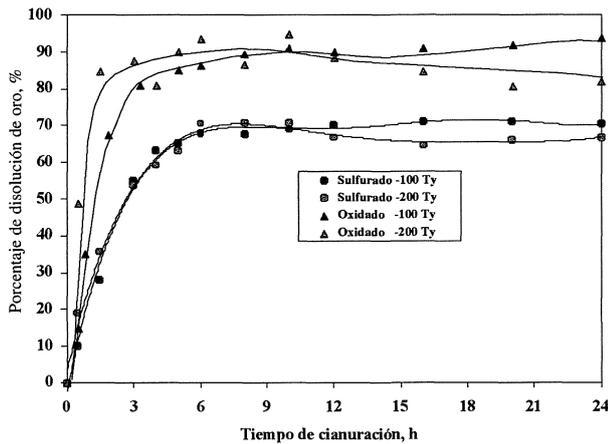
Mineral	Oro disuelto, %	Plata disuelta, %
Oxidado	87,12	48,71
Sulfurado	94,06	84,77

**Tabla VII.** Grado de lixiviabilidad

*Table VII. Leaching grade*

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

Fuente: La Booya, S. R., et al, 1994; Albert, T., 200



**Figura 4.** Cinética de cianuración a dos tamaños de partículas de los materiales.

Figure 4. Cyanidation kinetic at two particles size of materials.

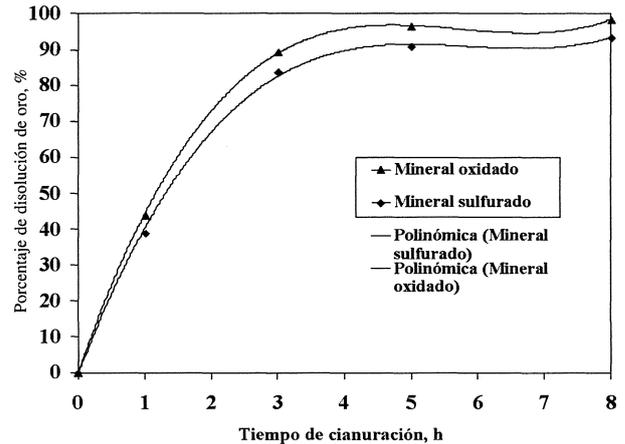
granulométricos. Estos resultados muestran que la cinética y porcentajes de disolución de oro son similares para las dos granulometrías en cada tipo de mineral, lo que permite concluir que no es necesaria una molienda tan fina.

Por otra parte, se determinó que el tiempo adecuado para alcanzar los mayores porcentajes de disolución de oro es de 8 h. Esto, corrobora la presencia del oro en tamaños muy finos y su fácil liberación, ya que al obtenerse una mayor área superficial y, por consiguiente, un mayor contacto con la solución lixiviante, la disolución del metal precioso se acelera notablemente.

En estas curvas se observan algunos descensos en los porcentajes de disolución del oro a través del tiempo, lo que se asocia con el efecto *preg-robbing* ocasionado por la presencia de la illita; inconveniente que es posible disminuir mediante la implementación simultánea de los procesos de cianuración y de adsorción de oro con carbón activado.

De otro lado, debido a la gran diferencia en el contenido de pirita en los dos materiales, el menor grado de disolución del oro, como era de esperarse, lo presentó el material sulfurado, debido a que esta especie es consumidora de oxígeno, lo cual inhibe el proceso de cianuración. Con el fin de disminuir este efecto, se estudió la adición de oxígeno durante la cianuración, inyectando continuamente aire a la pulpa agitada mecánicamente, mostrándose los resultados en la figura 5.

Comparando los porcentajes máximos de disolución de oro en las figuras 4 y 5, se observa claramente un incremento al aumentar la concentra-



**Figura 5.** Cinética de cianuración con inyección de aire.

Figure 5. Cyanidation kinetic with air injection.

ción de oxígeno disponible durante la cianuración. Este efecto fue muy notorio para el mineral sulfurado, ya que los porcentajes máximos de extracción de oro variaron del 71 % al 93 %, al inyectar aire a la pulpa.

Con los resultados anteriores correspondientes a Mina Vieja y con similares para Mina Nueva y Mina Quemada, se pudo determinar que se podían reunir los materiales de las tres minas para efectuar el proceso de cianuración por agitación mecánica e inyección continua de aire, obteniendo altas disoluciones de oro, lo cual se corroboró efectuando una prueba experimental que reportó disoluciones del orden del 95 %.

### 3.3. Estudio de adsorción de oro con carbón activado

Según las características similares de las menas, tales como la dificultad en la separación sólido-líquido, la presencia de arcilla illita, los contenidos altos de oro con bajos de plata y los porcentajes de disolución de oro, conllevaron a determinar la viabilidad de la aplicación del proceso de adsorción con carbón activado en pulpa.

Los resultados del estudio del proceso CIP, se muestran en la figura 6. Se observa que al aumentar la cantidad de carbón en la pulpa, aumenta la velocidad de adsorción de oro hasta una dosificación de carbón donde la capacidad de carga de oro es máxima. Además, se observa que al incrementar la cantidad de carbón en la pulpa, el porcentaje de adsorción de oro no varía, pero la adsorción de la plata sí aumenta. Es decir, que al añadir carbón en exceso se emplearía, solamente, para aumentar la

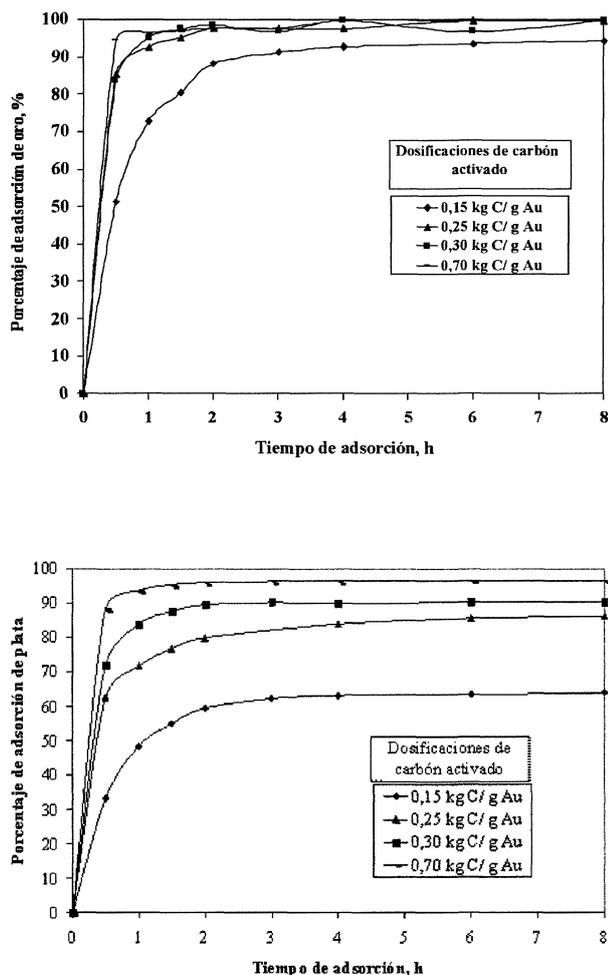


Figura 6. Cinética de adsorción de oro y de plata, proceso CIP.

Figure 6. Gold and silver adsorption kinetic, CIP process.

recuperación de la plata. Según estos resultados, la dosificación de carbón activado más adecuada es la de 0,25 kg C/g Au, puesto que se alcanzan recuperaciones del oro disuelto cercanas al 99 % y de plata hasta el 86 %.

Se observa en las curvas de la figura 6 que, debido a la alta cinética de adsorción, el tiempo máximo de adsorción puede ser de 4 h.

Para la evaluación del proceso CIL, se añadió la mejor dosificación de carbón resultante del análisis de resultados del proceso CIP, es decir, 0,25 kg C/g Au. El tiempo de adsorción debió ser el tiempo mínimo de cianuración, 8 h. Los resultados del proceso CIL se muestran en la figura 7. Los porcentajes de recuperación de oro y de plata obtenidos en el proceso CIL, 96,6 %, son menores a los obtenidos con el proceso CIP, debido al menor tiempo de cianuración, ya que para el proceso CIP el mineral se mantuvo en la solución de cianuro,

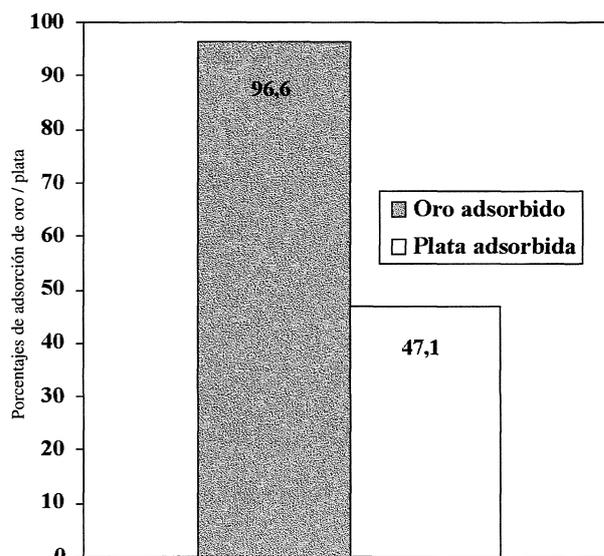


Figura 7. Porcentajes adsorción de oro y de plata, proceso CIL.

Figure 7. Gold and silver adsorption percentages, CIL process.

por 12 h, distribuidas en 8 h de cianuración más 4 h de adsorción.

### 3.4. Mejoras tecnológicas propuestas

Con los resultados obtenidos durante el desarrollo de este estudio, similares para las tres minas de donde se tomaron las muestras, se realizó el diseño básico de ingeniería de una planta para el beneficio, extracción y recuperación del oro. En la figura 8, se presenta el diagrama de bloques de la planta propuesta, donde se incluyen los procesos de

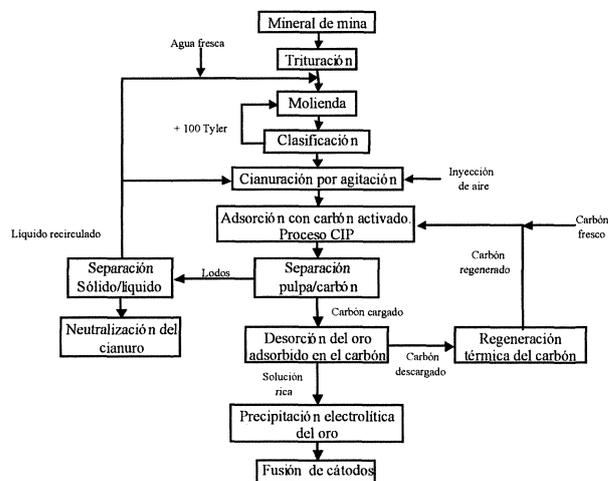


Figura 8. Diagrama de flujo propuesto.

Figure 8. Flowsheet proposed.

cianuración por agitación y recuperación de oro con carbón activado. Las mejoras planteadas para aumentar los porcentajes de disolución y extracción de oro que, actualmente, se obtienen con los minerales del Asentamiento Minero de San Pedro Frío se ven representadas en los aumentos en la recuperación de oro de, hasta el 95 %.

#### 4. CONCLUSIONES

- El proceso de cianuración por agitación es apropiado para este mineral puesto que, debido al tamaño fino del oro, se requiere una molienda hasta una granulometría de 80-100 mallas Tyler para su liberación.
- Debido a la presencia de oro en los finos del mineral (oxidado: 24,72 % y sulfurado: 23,06 %), no se recomienda emplear procesos que impliquen la eliminación de líquidos antes del proceso de cianuración, tales como lavados o concentración gravimétrica.
- Se recomienda emplear procesos de adsorción con carbón activado para la recuperación del oro disuelto puesto que, además de ser eficientes, no requieren la implementación de procesos de separación sólido/líquido, de gran dificultad para minerales finos y arcillosos.
- Los procesos recomendados en este trabajo reducen los niveles de agentes contaminantes del ambiente, en los vertidos, puesto que se elimina totalmente el manejo de mercurio y se tiene un mayor control sobre las cantidades de cianuro libre, en las colas.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa Colombiana de Minerales -MINERCOL y a la Alcaldía de

Santa Rosa del Sur de Bolívar por el soporte económico destinado para el desarrollo de este trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] INGEOMINAS, *Reporte sobre zonas mineras en Colombia*, 2003.
- [2] H. WOTRUBA, *Seminario Taller. Pequeña Minería Aurífera*, Bucaramanga, Colombia, 2004.
- [3] H. WOTRUBA, *CASM, 3rd Annual Meeting and Learning Event*, Elmina, Ghana, 2003.
- [4] J. MARSEN y I. HOUSE, *The chemistry of gold extraction*, Ellis Horwood, Inglaterra, 1993.
- [5] R. CARDENAS, *Metalurgia extractiva del oro*, Ed. Imprenta FOCET, "Imral" Ltda. Oruro, Bolivia, 1994.
- [6] F.J. ALGUACIL, *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 419-425.
- [7] J.E. PEDRAZA y M.E. LÓPEZ, *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia. Colombia 22 (2001) 67-80.
- [8] ASTM E400-02.
- [9] ASTM D854-02.
- [10] ASTM D4972-01.
- [11] A.S. FOUST, *Principios de operaciones unitarias*, Compañía Editorial Continental S.A., México, 1998.
- [12] ASTM D2196-99.
- [13] N. GÖNENN, *Hydrometallurgy* 69 (2003) 169-176.
- [14] W. LENAHAN, y R. MURRAY-SMITH, *Assay and analytical practice in the South African Mining Industry*, Johannesburg, 1986.
- [15] K.L. REES y J.S.J. VAN DEVENTER, *Hydrometallurgy* 58 (2000) 151-167.
- [16] G. STANLEY, *The extractive metallurgy of gold in South Africa*. Vol. 2, Johannesburg, 1987.
- [17] M. VEIGA, *Process Mineralogy Course*, The University of British Columbia, Dept. Mining and Mineral Process Engineering, Canada, 2000.