

# Inhibición del efecto preg-robbing de la arcilla illita en la cianuración de las menas auroargentíferas del municipio de Vetas, Santander - Colombia

María E. López G.\*, Julio E. Pedraza R.\*\*

## Resumen

En esta investigación se estudió la composición mineralógica de tres menas auroargentíferas mediante microscopía óptica, fluorescencia y difracción de rayos X, absorción atómica, ensayos al fuego y otros análisis físico-químicos para aplicarlos en los procesos de cianuración. Se evaluaron pruebas de cianuración por fracciones granulométricas, cianuraciones convencionales y no convencionales con NaCN, KCN, KCl+ NaCN, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+ NaCN. Las menas presentaron mineralización compuesta por sulfuros, principalmente pirita y óxidos, la ganga, compuesta básicamente por cuarzo y, como minerales accesorios se encontró la arcilla illita. El oro en secciones pulidas presentó un tamaño entre 2 y 19 μm y se encontró libre, incluido a la pirita en el tipo de mena II estudiado, o muy asociado a la pirrotina e incluido o en contacto con la ilmenita, en el tipo de mena III. Se observó el efecto “preg-robbing” de la illita y oro fino incluido en la pirita difícil de cianurar. El porcentaje de disolución de oro se aumentó cuando se utilizaron compuestos de potasio en las soluciones de cianuración, con lo que se inhibió el efecto “preg-robbing” de las arcillas. Se encontró correlación entre la información geológica y la caracterización metalúrgica.

----- *Palabras clave:* caracterización mineralógica, menas auroargentíferas, cianuración del oro, efecto preg-robbing, illita.

## Abstract

In this research was to study the mineral composition of three gold and silver bearing ores using optic microscopy, X-rays fluorescence, X-rays diffraction, atomic absorption, fire assay and other physical-chemical analysis to be applied it in the cyanidation processes. Leaching assays were performed with different granulometric fractions, conventional and not conventional assays cyanidation using NaCN, KCN, KCl+ NaCN, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+ NaCN. The ores presented mineralization composed by sulphides (mainly pyrite) and oxides; gangue (mainly quartz) and illite as additional mineral. Gold in the polished sections was found between 2 and 19 μm and also it was found free gold, included

---

\* Ingeniera. M Sc. Minas y Metalurgia. Profesora de cátedra del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Antioquia. Grupo GIPIMME. E-mail: melopez@udea.edu.co.

\*\* Ingeniero. M Sc. Metalúrgico. Profesor Universidad Industrial de Santander. E-mail: jpedraza@uis.edu.co. Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente.

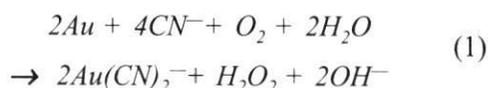
into pyrite and very associated to the pyrrhotite in Type II ore, and included or in contact with illmenite in Type III ore. It was observed the preg-robbing effect of the illite and fine gold included into pyrite and very difficult to cyanidate. The gold dissolution percentage increased when potassium compounds were applied in the cyanidation solutions. It was found a methodology to correlate the geological information with the metallurgical characterization.

----- *Key words:* mineralogical identification, gold and silver bearing ores, gold cyanidation, preg-robbing effect, illita.

## 1. Introducción

En la extracción de oro a partir de sus menas, es fundamental identificar todos los minerales involucrados: la ganga acompañante, los minerales asociados al oro, el oro contenido en los minerales y los minerales que interfieren con la cianuración.

La reacción principal en los procesos de disolución de oro a partir de los minerales que lo contienen, es su disolución en presencia de cianuro alcalino (K y Na principalmente). Habashi [1] demostró la naturaleza electroquímica del proceso y planteó la siguiente reacción:



Durante la cianuración, el oro que se ha disuelto como complejo de cianuro de oro,  $Au(CN)_2^-$ , puede adsorberse sobre la superficie de minerales carbonáceos o arcillosos, causando el efecto conocido como “preg-robbing”. El oro es entonces extraído de la solución de lixiviación y como consecuencia se obtienen bajas extracciones del metal valioso.

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización mineralógica y de pruebas de cianuración en muestras de menas auroargentíferas, en donde se observa este efecto y también pruebas de cianuración no convencional que aumentan el porcentaje de disolución del oro cuando se utilizan compuestos de potasio como inhibidor de la especie arcillosa presente.

## 2. Metodología y resultados experimentales

El trabajo desarrollado hizo parte del proyecto “Montaje de una planta piloto demostrativa para el procesamiento de minerales auroargentíferos. Fase II”, realizado entre la Universidad Industrial de Santander —Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente— y la Secretaría de Planeación del Departamento de Santander. El trabajo experimental es el producto de dos tesis, una de maestría [2] y otra de pregrado [3] en Ingeniería Metalúrgica.

En la investigación fueron estudiados tres materiales auroargentíferos procedentes de minas localizadas en el municipio de Vetas (Santander - Colombia). Se seleccionaron tres muestras teniendo en cuenta la concentración de pirita y que corresponden a diferentes tipos de menas:

**Tipo de mena I:** Pirita > 70%.

**Tipo de mena II:** Pirita 30-70%. Se encuentra con ilmenita y magnetita (< 20%).

**Tipo de mena III:** Pirita < 30%. Se encuentra con ilmenita (40%), magnetita y hematita (11%), galena (10%).

La figura 1 detalla el procedimiento experimental que se siguió en esta investigación.

Se siguió una metodología que condujo a la caracterización mineralógica exhaustiva, y permitió obtener la descripción cualitativa y cuantitativa de los minerales y de los elementos químicos que componen las menas y en esta fase diseñar las pruebas de cianuración con el objetivo de alcanzar las máximas disoluciones de oro.

### 2.1. Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica se llevó a cabo con pruebas como:

1. Estudio macroscópico
  2. Estudio microscópico
  3. Difracción de rayos X
  4. Análisis elemental
- Análisis cualitativo por fluorescencia de rayos X.
  - Determinación cuantitativa de elementos metálicos.
  - Tenores de oro y plata por vía seca.
  - Determinación de sales solubles.

Los resultados de estos análisis se resumen en las tablas 1 a 4.

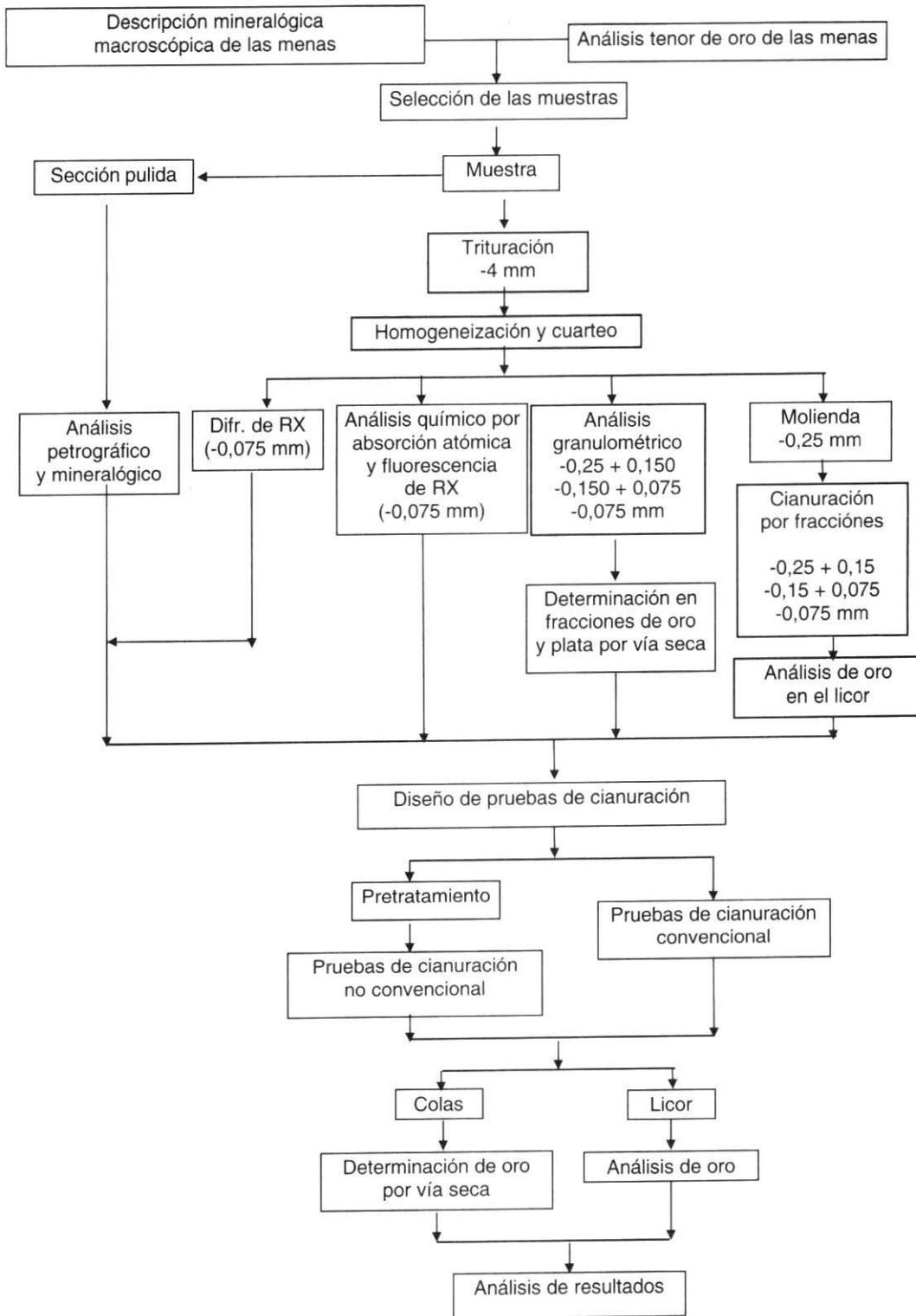


Figura 1 Esquema del procedimiento experimental

**Tabla 1** Resultados de la composición química elemental

<i>Elemento</i>	<i>Tipo I</i>	<i>Tipo II</i>	<i>Tipo III</i>
Ac (%)*	0,16	0,03	0,20
Al (%)*	17,00	12,00	15,00
Ag (g/ton)	273,50	22,00	671,50
As (%)*	0,12	0,07	0,15
Au (g/ton)	7,50	3,00	8,50
Ca (%)*	-	-	-
Cd (g/ton)	8,74	0,70	23,63
Co (g/ton)	85,50	20,85	0,82
Cr (%)	0,04	0,03	0,03
Cu (%)	0,03	0,05	0,02
Fe (%)	1,96	2,96	2,87
Hg (g/ton)	14,85	9,60	12,40
K (%)*	0,12	0,12	0,15
Mn (%)	0,08	0,01	0,02
Mg (%)*	0,80	0,17	0,44
P (%)*	0,33	0,66	0,30
Pb (%)	0,18	0,04	0,24
Rb (%)*	0,04	0,02	0,04
S (%)	3,20	5,20	2,80
Sb (%)*	-	-	-
Si (%)*	69,00	69,00	73,00
Ti (%)*	0,70	0,55	0,51
Zn (%)	0,12	0,09	0,33
Zr (%)*	-	-	-

\* Datos cualitativos determinados mediante fluorescencia de rayos X.

— No se detectó

Para las menas tipos II y III se encontraron las siguientes características del oro en las secciones pulidas:

#### Tipo de mena II

- Oro. Esta incluido en la pirita como agregado en forma de gancho o individuos muy

asociados a la pirrotina, pero en contacto neto con ésta. También esporádicamente se presenta libre con tamaños de 6  $\mu$ m. El tamaño promedio del oro incluido es de 10  $\mu$ m (entre 2 y 19  $\mu$ m).

#### Tipo de mena III

- Oro. Se presenta como agregados granulares incluidos en la ilmenita o rodeando a este mineral. En ambos casos se forma a lo largo de fracturas en la roca. El tamaño de grano promedio es 7  $\mu$ m (entre 5 y 14  $\mu$ m).

##### 2.1.1. Preparación de las muestras de experimentación

Las muestras se redujeron de tamaño por trituración primaria y secundaria en trituradoras de quijadas y se llevaron a un tamaño más fino, mediante molienda en un molino de discos. Se homogeneizaron, se cuartearon y se tamizaron según la granulometría requerida en cada prueba. También se realizó la lixiviación de diagnóstico que se detallará en el próximo artículo de los autores.

##### 2.2. Pruebas de lixiviación

Con la información obtenida en la caracterización se procedió con las pruebas hidrometalúrgicas.

La tabla 5 muestra la distribución granulométrica obtenida en las muestras, para encontrar la granulometría adecuada de las menas estudiadas el procedimiento recomendó separar la muestra en las fracciones ( $-0,250$  mm +  $0,150$  mm), ( $-0,150$  mm +  $0,074$  mm) y  $-0,074$  mm.

Las pruebas de la cianuración convencional y no convencional se realizaron con muestras que tuvieran tamaño  $-0,150$  mm (100 mallas Tyler), que fue la granulometría con que se obtuvieron los mejores porcentajes de disolución en la cianuración convencional por fracciones granulométricas.

**Tabla 2** Resultados de la caracterización mineralógica

Grupo	Mineral	Técnica empleada	% por tipo de mena		
			Tipo I	Tipo II	Tipo III
Metales preciosos	Oro nativo, Au	Análisis mineralógico		< 1,0	< 1,0
Sulfuros	Pirita, FeS <sub>2</sub>	Análisis mineralógico	8,6	8,6	2,8
	Covelina, CuS	Análisis mineralógico		< 1,0	
	Calcopirita, CuFeS <sub>2</sub>	Análisis mineralógico	0,1	0,4	1,4
	Pirrotina, Fe <sub>1-x</sub> S	Análisis mineralógico		0,4	
	Galena, PbS	Análisis mineralógico			10,0
Silicatos	Cuarzo, SiO <sub>2</sub>	Análisis mineralógico	60,0	80,0	60,0
	Plagioclasa	Análisis mineralógico	20,0	5,0	12,0
Sulfosales	Tetrahedrita, Cu <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	Análisis mineralógico		< 1,0	< 1,0
Minerales de arcilla	Illita, (K,H <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Dif. de rayos X	3,6	3,0	5,0
	Celadonita, K(Mg,Fe,Al) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Dif. de rayos X	1,8		
	Zaherita, Al <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>5</sub> (OH) <sub>26</sub>	Dif. de rayos X	< 1,0		
Óxidos	Ilmenita, FeTiO <sub>3</sub>	Análisis mineralógico	0,5	1,7	5,5
	Hematita, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Análisis mineralógico		0,3	1,4
	Magnetita, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Análisis mineralógico	0,8	0,6	1,4
	Jacobsita, MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Dif. de rayos X	2,7		
Haluros	Matlokita, PbFCl	Dif. de rayos X	1,8		

**Tabla 3** Tenores de oro y plata en las muestras totales estudiadas y por fracciones granulométricas

Tipo de mena	Tenores de oro	
	(g/ton)	(%)
I	7,5 (*7,6)	
II	3,0 (*3,3)	
III	8,5 (*8,3)	
I fracción 0,250/0,150 mm	8,0	29,26
I fracción 0,150/0,074 mm	7,5	30,08
I fracción-0,074 mm	7,5	40,66
II fracción 0,250/0,150 mm	5,0	41,19
II fracción 0,150/0,074 mm	4,0	42,09
II fracción-0,074 mm	1,5	16,42
III fracción 0,250/0,150 mm	5,8	16,25
III fracción 0,150 + 0,074 mm	9,6	26,44
III fracción-0,074 mm	8,8	57,31

\* Tenores recalculados a partir de leyes de tenores por fracciones y análisis granulométrico.

**Tabla 4** Análisis cualitativo de sales solubles en las muestras estudiadas

Muestra	Sales ferrosas	Sales férricas	Sales de zinc y cobre
I	++++	++++	----
II	----	----	----
III	----	----	----

(- - -) No se detectaron. (++++) Existentes.

**Tabla 5** Distribución granulométrica de las muestras estudiadas

Fracción (mm)	Porcentaje retenido		
	Tipo de mena I	Tipo de mena II	Tipo de mena III
-0,250 + 0,150	27,80	27,88	23,26
-0,150 + 0,074	30,48	35,35	22,86
-0,074	41,72	36,77	53,88

### 2.2.1. Cianuración por fracciones granulométricas

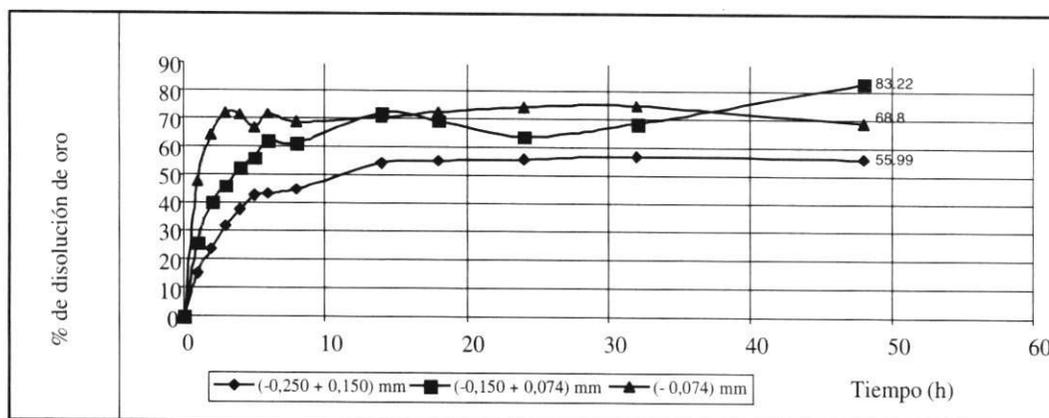
Se realizaron pruebas utilizando las tres fracciones granulométricas antes mencionadas, con el fin de determinar la granulometría más adecuada para implementar el proceso de cianuración de las menas estudiadas. Las condiciones fueron las siguientes:

- Peso del mineral: 200 g
- Porcentaje de sólidos: 33%
- Concentración de cianuro: 2 kg/ton mineral
- Velocidad de agitación: 1.000 r.p.m.
- pH: 10,5-11, corregido con lechada de cal
- Tiempo de agitación: 48 horas

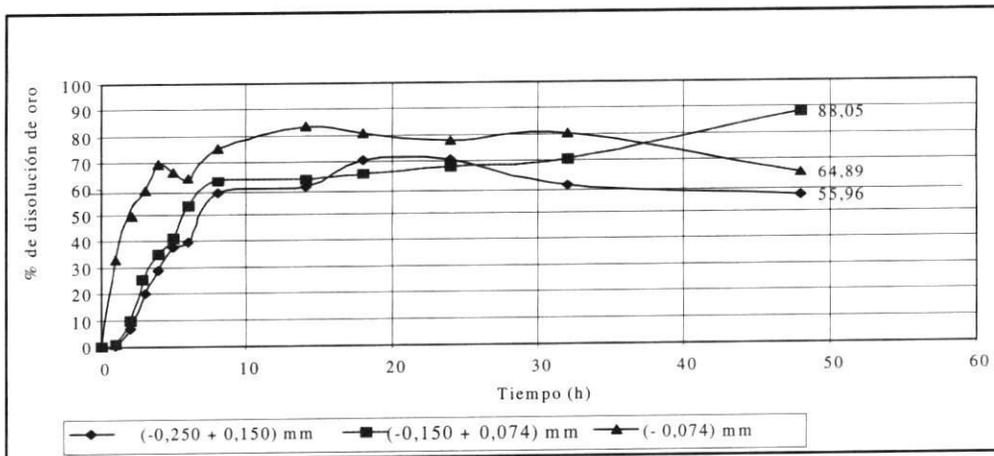
Las figuras 2 a 4 presentan las isotermas de extracción descritas por las muestras en las lixiviaciones convencionales con NaCN por fracciones.

### 2.2.2. Cianuración convencional y no convencional

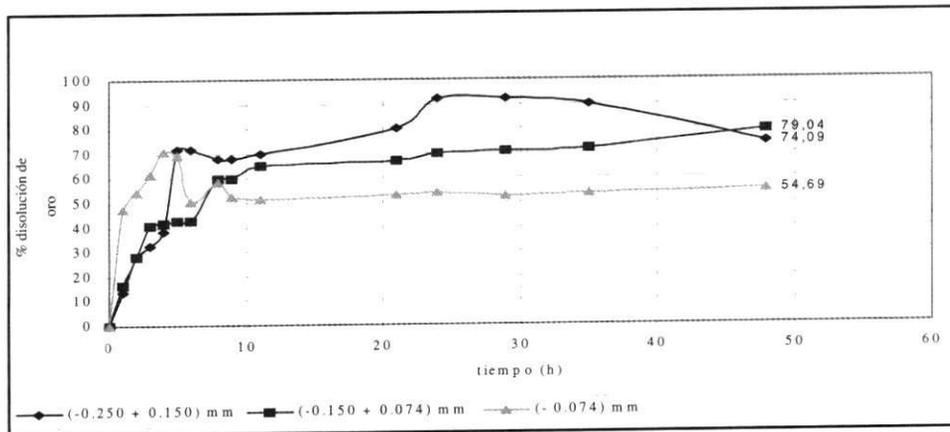
De acuerdo con las particularidades mineralógicas se ensayaron varios tipos de cianuraciones: con cianuro de potasio (KCN) y con cianuro de sodio (NaCN); con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y cianuro de sodio, con cloruro de potasio (KCl) y con cianuro de sodio. La cianuración que se realizó con KCN se hizo con el objetivo de inhibir la acción de las arcillas con



**Figura 2** Velocidad de disolución del oro en fracciones granulométricas para la mena del tipo I



**Figura 3** Velocidad de disolución del oro en fracciones granulométricas para la mena del tipo II



**Figura 4** Velocidad de disolución del oro en fracciones granulométricas para la mena del tipo III

los iones de K. Para verificar la acción del potasio se realizaron pruebas adicionando KCl a la pulpa de cianuración. Con el uso del peróxido de hidrógeno se buscó oxidar los minerales consumidores de oxígeno, además de suministrar el oxígeno necesario en el proceso de cianuración.

Todas las pruebas se realizaron bajo las siguientes condiciones operacionales:

pH natural de trabajo: 5,5-6,5

Peso del mineral: 200 g

Porcentaje de sólidos: 30%

Velocidad de agitación: 1.000 r.p.m.

pH: 10,5-11, corregido con lechada de cal

Los tratamientos de todas las pruebas se resumen en la tabla 6.

Los diferentes pretratamientos se realizaron con los siguientes objetivos:

- Secado al sol en presencia de cal por veinticuatro horas. Se hizo para descomponer los sulfuros. Para evitar la reactividad de la pirrotina en la mena tipo II y poder controlar el pH posteriormente no se adiciona cal debido a su reactividad a pH altamente básicos. El tratamiento se hizo para el tipo de mena I y III con adición de cal.

**Tabla 6** Condiciones de las pruebas de cianuración

Tipo de mena	Pretratamiento	Concentración libre de agente lixiviante kg/ton
I	Ninguno	NaCN, 1 kg/ton mineral
	Lavado de la muestra con agua, secado al sol 24 horas con cal y preaireación por agitación durante 4 horas	KCN, 1 kg/ton mineral
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> agregado gradualmente durante la cianuración [4]
		NaCN, 1 kg/ton mineral
		NaCN, 1 kg/ton mineral + KCl
II	Ninguno	NaCN, 1 kg/ton mineral
	Secado al sol 24 horas Preacteación por agitación durante 4 horas	KCN, 1 kg/ton mineral
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> agregado gradualmente durante la cianuración [4]
		NaCN, 1 kg/ton mineral
		NaCN, 1 kg/ton mineral + KCl
III	Ninguno	NaCN, 1 kg/ton mineral
	Secado al sol 24 horas con cal y preaireación por agitación durante 4 horas	KCN, 1 kg/ton mineral
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> agregado gradualmente durante la cianuración [4]
		NaCN, 1 kg/ton mineral
		NaCN, 1 kg/ton mineral + KCl

- Preacteación por agitación durante cuatro horas. Se realizó con el fin de disolver los sulfuros y suministrar el oxígeno a la pulpa antes de adicionar el cianuro.

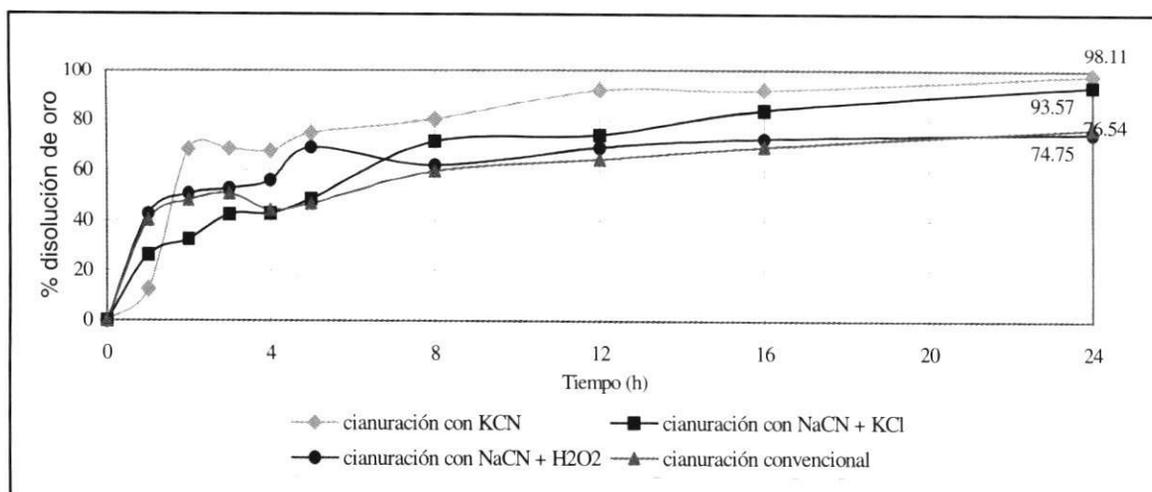
Los dos procedimientos anteriores se aplicaron para todas las muestras de experimentación.

- Lavado de la muestra con agua. Se realizó para eliminar las sales solubles, la única mena que reportó contenido de sales fue la del Tipo

I y por tanto a ésta fue la única que se le efectuó lavado.

Las figuras 5 a 7 presentan la disolución de oro a una granulometría 0,150 mm (-100 mallas Tyler) para las cianuraciones convencionales y no convencionales, entiéndase en las gráficas como cianuración convencional la realizada con NaCN.

La tabla 7 presenta un resumen de los resultados alcanzados en la etapa hidrometalúrgica.



**Figura 5** Velocidad de disolución del oro para la mena del tipo I

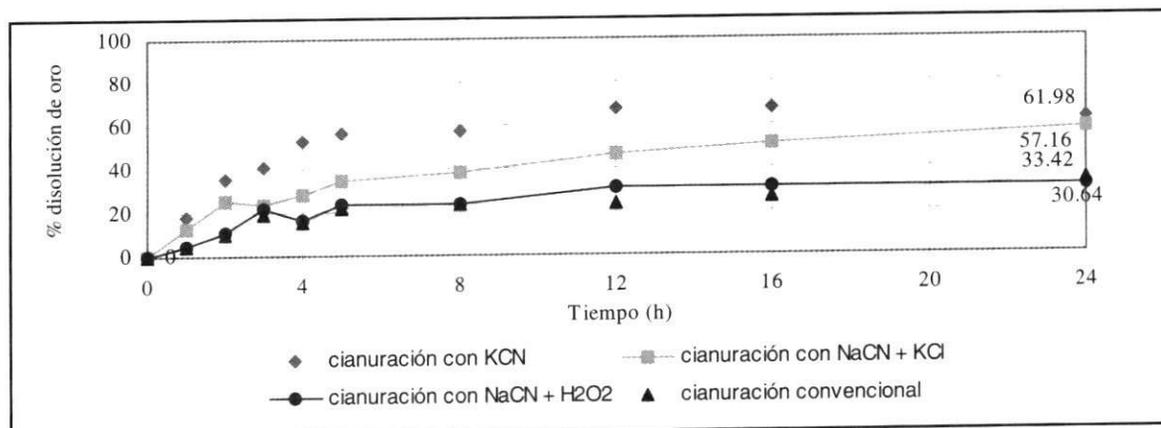


Figura 6 Velocidad de disolución del oro para la mena del tipo II

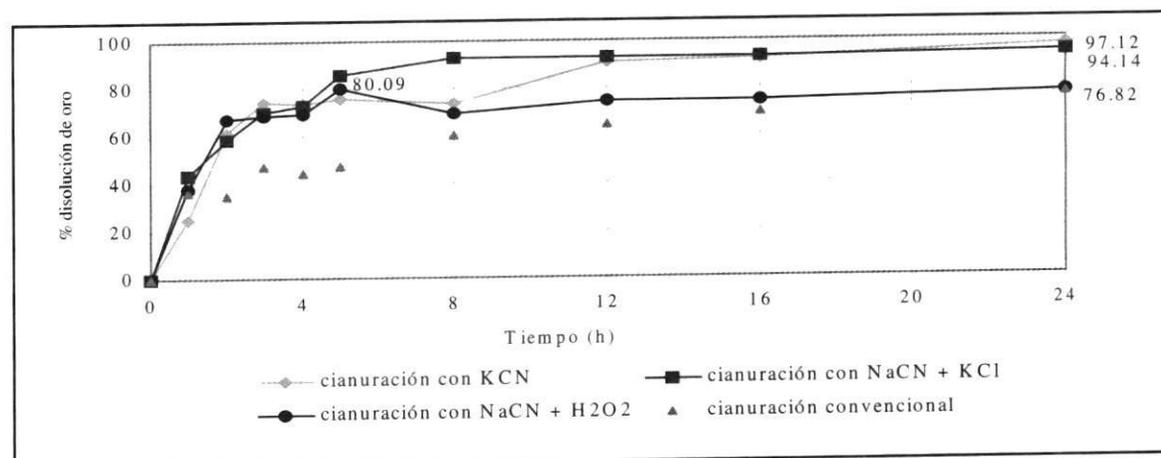


Figura 7 Velocidad de disolución del oro para la mena del tipo III

Tabla 7 Resumen de los resultados de lixiviación a las 24 horas

Tipo de mena	Característica de la prueba	Consumo de cianuro (kg/ton mineral)	Disolución de oro (%)
I	Cianuración convencional con NaCN	1,4	76,5
	Cianuración con NaCN adicionando el peróxido	2,8	74,8
	Cianuración con NaCN adicionando KCl	1,9	93,6
	Lixiviación con KCN	4,3	98,1
II	Cianuración convencional	1,4	33,4
	Cianuración con NaCN adicionando el peróxido	1,6	30,6
	Cianuración con NaCN adicionando KCl	1,3	57,2
	Lixiviación con KCN	3,0	62,0
III	Cianuración convencional	1,6	76,5
	Cianuración con NaCN adicionando el peróxido	1,0	76,8
	Cianuración con NaCN adicionando KCl	2,8	94,1
	Lixiviación con KCN	5,0	97,1

### 3. Discusión de los resultados

#### 3.1. Caracterización mineralógica

En cuanto a la composición mineralógica de las menas se encuentra que el porcentaje de mineralización (minerales útiles) es bajo para los tres tipos de mena, no supera el 23% y está compuesto básicamente por sulfuros y óxidos. Los elementos cianicidas y consumidores de oxígeno están relativamente en baja proporción. La pirita es el sulfuro que predomina. La ganga acompañante, cuarzo, principalmente, y plagioclasa (serie de feldspatos de Na y Ca), no representa problema ya que ésta no reacciona en el proceso de cianuración, caso contrario a las arcillas encontradas, las cuales pueden actuar como intercambiadores iónicos y adsorber el oro ya disuelto en la solución. El análisis por difracción de rayos X permitió identificar las diferentes arcillas que se encuentran en las menas. La arcilla que se encontró fue la illita, entendiéndose por el término illita un grupo de minerales, que incluye nombres como mica hidratada, sericita y bravasita.

La illita  $(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ , presente en los tres tipos de menas, exhibe el efecto preg-robbing, que se observa en la cianuración de la fracción —200 mallas Tyler.

El oro que se observó en las secciones pulidas para las menas tipo II y III, se encuentra como oro nativo y tiene tamaño de grano bastante fino. El oro que se presenta asociado con la ilmenita en el tipo de mena III, permite prever una exposición a los reactivos de lixiviación después de la molienda, caso contrario a la mena tipo II que contiene el oro muy fino incluido en la pirita y es casi imposible de ser expuesto.

#### 3.2. Pruebas de lixiviación

##### 3.2.1. Cianuración por fracciones granulométricas

Se encontró que la mayor disolución de oro en ese tiempo de lixiviación se presentó para todas las muestras en la fracción —0,0150 + 0,074 mm. Gráficamente se puede observar este hecho en

las figuras 2, 3 y 4 en donde también se presenta la cinética de disolución del oro. La fracción granulométrica —0,074 mm no mostró disoluciones considerables (para la mena del tipo II fue la fracción que se comportó con menor disolución de oro), comportamiento explicable pues en ella se encuentra el mayor porcentaje de la arcilla illita. De las curvas cinéticas se puede deducir que un tiempo de veinticuatro horas es adecuado para el tratamiento de los tres tipos de mena, tiempos mayores no reportan aumento significativo en la disolución del oro.

Todas las pruebas de lixiviación presentaron curvas con aumentos o disminuciones en la disolución de oro en algunos intervalos del tiempo. O sea que, no presentan el comportamiento normal para este tipo de curvas en donde la disolución siempre aumenta con el tiempo a menos que se presenten reprecipitaciones. Por lo anterior se puede postular que este comportamiento podría deberse a la presencia de la arcilla illita en todas las muestras, la cual en algunos casos actúa como un intercambiador iónico [5] y tiene capacidad para adsorber el oro presente en solución cianurada. Esta en su globalidad se considera una estructura cargada negativamente, carga que es balanceada con una cantidad equivalente de cationes solventes inorgánicos [6]. Es por eso que en la lixiviación del oro, los cationes  $Au^+$  posiblemente son atrapados por ésta, impidiendo que se quede estable el complejo de oro  $Au(CN)_2^-$  formado en estos procesos de disolución del oro ( $Au(CN)_2^- = Au^+ + 2CN^-$ ). Hay que tener en cuenta que la capacidad de intercambio de una partícula aumenta cuando su tamaño decrece, pues se presenta mayor área superficial. La reactividad de la arcilla depende de dos factores, uno es el tamaño de grano y el otro la propiedad textural.

Las mejores disoluciones de oro con cianuro, obtenidas con la fracción granulométrica —0,150 + 0,074 mm y no con la —0,074 mm, indican que no es necesario liberar las partículas de oro a tamaños inferiores, sino que las partículas estén expuestas al cianuro como se requiere para el proceso de lixiviación y que esta exposición se dé sin ninguna interferencia.

3.2.2. Pruebas de cianuración modificada

En el diagrama de barras de la figura 8, se presentan comparativamente los resultados de las lixiviaciones realizadas para los diferentes tipos de mena estudiados.

Con los resultados de cianuración convencional realizados a una granulometría —0,150 mm (-100 mallas Tyler) se determina, según criterios de La Brooy [7], que la mena tipo II, es altamente refractaria (disolución de oro < 50%) con disolución a las 24 horas de 33,4% y las tipo I y III medianamente refractarias (disolución de oro entre 50-80%), con extracciones del 76,5%. La cianuración convencional presentó bajas disoluciones para todos los tipos de mena. El efecto de las arcillas no es tan marcado como lo es para el caso de la cianuración de la fracción —0,074 mm, ya que el porcentaje en peso de las arcillas está distribuido en toda la muestra.

Se evidenció el efecto positivo que tienen los iones de potasio en la pasivación de las arcillas, especialmente en la illita, observado al realizar la cianuración con KCN, con el cual se obtuvo la máxima disolución. Un caso similar se presentó con la cianuración modificada con KCl, prueba que le sigue en cantidad de oro disuelto. Este comportamiento es observable en todos los tipos de mena, comprobándose que la refractariedad se debe principalmente a las arcillas en los tipos

de mena I y III y en menor grado en el tipo de mena II, mena que presenta también refractariedad debido a la inclusión del oro dentro de la pirita, pues a pesar de los pretratamientos realizados la disolución de oro no supera el 65% (figura 8), lo que permite concluir que el oro en su totalidad no estuvo en contacto con el cianuro. Con los resultados obtenidos en este estudio se comprobó la efectividad del potasio para estabilizar las arcillas, concordando con otras investigaciones en donde se ha encontrado que los cationes simples del KCl y del NH<sub>4</sub>Cl sirven de intercambiadores iónicos para estabilizar las estructuras de las arcillas [6]. Robert [8], encontró que las arcillas al tratarlas con KOH, se estabilizan debido al efecto del K. En esta investigación la cianuración modificada con KCl, reportó altas extracciones pero en un tiempo mayor que el obtenido con KCN. El Cl<sup>-</sup>, producto de la disociación del KCl aparentemente no alteró el proceso de cianuración, pues se mantuvo el consumo razonable de cianuro y nunca se bajó el pH a rangos ácidos, como para llegar a tener las condiciones propicias para la formación del complejo AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup>, y que se hubiera manifestado en el consumo alto del agente lixivante causado por la formación de HCN en el proceso. Este comportamiento indica que todo el oro se encontró en forma de ion complejo, Au(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup>, y que la reacción en todas las lixiviaciones con NaCN o KCN, fue la siguiente:

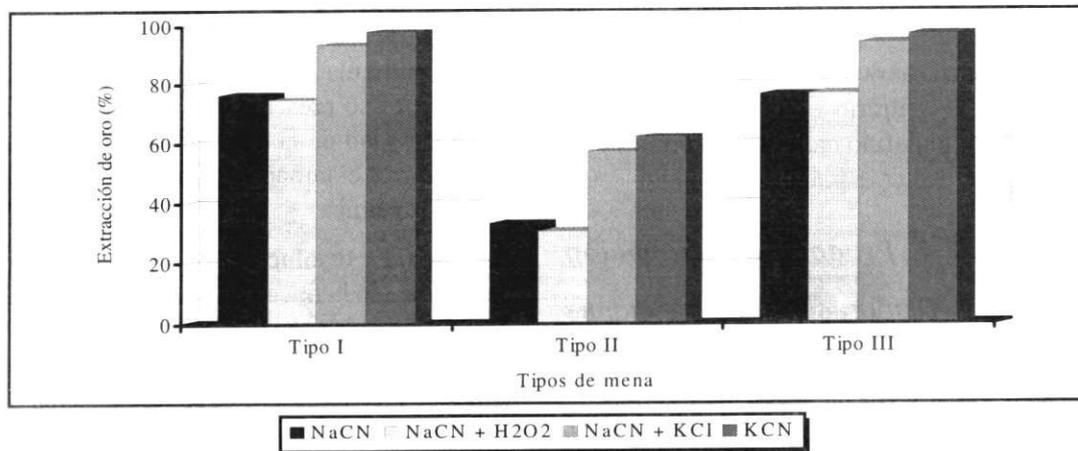
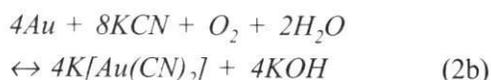
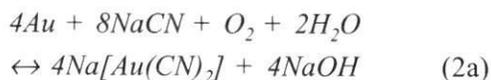


Figura 8 Disolución de oro para las diferentes lixiviaciones y diferentes tipos de mena



Los resultados de las cianuraciones modificadas con peróxido de hidrógeno y su similitud con los resultados de la cianuración convencional (figura 8) confirman el hecho de que la refractariedad de las menas estudiadas es principalmente física [9], debido a la presencia de las arcillas que atrapan el oro desde las soluciones ricas. La mena tipo II es la excepción pues presenta otra clase de refractariedad física debido al encapsulamiento del oro en la pirita. El peróxido de hidrógeno no favoreció la disolución del oro (por el contrario la disminuyó en las menas tipo I y II), deduciéndose que posiblemente la refractariedad de origen químico es mínima. En el caso de esta cianuración modificada con peróxido de hidrógeno, posiblemente el ion cianuro disponible no fue consumido completamente para la disolución del oro, sino que reaccionó con el peróxido para producir cianato de la siguiente manera:



Respecto a los resultados del consumo de agente lixivante  $CN^-$  (tabla 7) se puede decir que para la cianuración convencional y modificada con peróxido de hidrógeno los consumos fueron similares comparados con los valores de 0,45-1,81 kg/ton de mineral reportados por la bibliografía [10]. Estos valores son aceptables desde el punto de vista económico más no efectivos, debido a los bajos porcentajes de disolución. La cianuración modificada con KCl, reportó consumos razonables de NaCN y buena efectividad. La cianuración con KCN, reportó altos consumos de cianuro comparados con las otras cianuraciones. Sin embargo, este efecto se compensa con su efectividad en la disolución de oro, aunque no es tan ventajoso como cuando el K se suministra con el KCl que consume aproximadamente la mitad de cianuro y produce extracciones un poco menores.

## 2. Conclusiones

- Las características que pueden incidir en el proceso de disolución del oro por cianuración son:

Para los tipos de mena I y III:

<i>Característica</i>	<i>Significado relativo</i>
Contenido de illita	
Cianicidas	

Para el tipo de mena II:

<i>Característica</i>	<i>Significado relativo</i>
Oro fino incluido en pirita	
Contenido de illita	
Cianicidas	

- La illita adsorbe el oro durante la lixiviación y reduce su disolución en la cianuración, efecto conocido como preg-robbing, que clasifica la refractariedad como física. Este fenómeno se observó marcadamente en la fracción —74  $\mu$ m en la que las arcillas están concentradas, pues éstas son partículas menores a 4  $\mu$ m de diámetro y presentan área superficial muy alta.
- Las mejores disoluciones de oro con cianuro encontradas para todos los tipos de mena fueron para la fracción 0,150 + 0,074 mm, indicando que aunque el tamaño del oro es fino, no se requiere una molienda fina para los tipos de mena I y III; basta con que se esté expuesto al reactivo.
- Con los resultados de cianuración convencional se determina que la mena tipo II, es altamente refractaria con extracción de 33,4% de Au y las tipo I y III medianamente refractarias, con extracciones del 76,5% de Au.
- Los resultados de las cianuraciones modificadas con peróxido de hidrógeno y su similitud con los resultados de la cianuración convencional confirman el hecho de que la refractariedad de todas las menas es física, principalmente y que los elementos consumidores de oxígeno no eran los que causaban las bajas extracciones.

- Efectivamente se evidenció el efecto positivo que tienen los iones de potasio en la pasivación de las arcillas, observado al realizar la cianuración con KCN, con el cual se obtiene la máxima disolución de oro 98,1, 62 y 97,1% para los tipos de mena I, II y II respectivamente y la de cianuración modificada con KCl, prueba que le sigue en cantidad de oro extraído. El efecto preg-robbing de las arcillas se eliminó con los iones de potasio, y las extracciones de oro alcanzaron porcentajes altos.

### Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al profesor Carlos Alberto García por realizar los análisis mineralógicos, a las ingenieras Sandra Matus y Lignarely Quintero por ejecución de las pruebas de lixiviación y a la Secretaría de Planeación del Departamento de Santander por su respaldo económico.

### Referencias

1. Habashi, F. "One hundred years of cyanidation". In: *C.I.M. Bull* 80 (905). 1987. pp. 108-114.
2. López, M. E. *La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de los minerales auroargentíferos*. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físico-químicas. 1999. p. 194.
3. Matus, S. y Quintero, L. *Desarrollo del proceso de cianuración de minerales auroargentíferos basados en una caracterización tecnológica*. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físico-químicas. 1999. p. 101.
4. Córdoba, E. y Pinzón, J. *Peróxido de hidrógeno en el tratamiento de minerales auroargentíferos*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1995. p. 142.
5. "Influence of clays on borehole stability: A literature survey". In: *Review de Institute francais du petrole*. Vol. 50. No. 2. 1995.
6. Donal, G. *Clay stabilization-criteria for best performance*. Dallas: AIME. 1982. pp. 127-138.
7. La Brooy, S.R. *et al.* "Review of gold extraction". In: *Minerals engineering*. Vol. 7. No. 10. 1994. p. 1.215.
8. Robert, D. "Stabilizing clays with potassium hydroxide". In: *Journal*, 1984. pp. 1.366-1.374.
9. Yannopoulos, J. C. *The extractive metallurgy of gold*. New York: Ed. VNR. 1991. p. 281.
10. Cárdenas, A. *Metalurgia extractiva del oro*. Oruro: 1994, p. 340.