CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS DE CIANURACIÓN INTENSIVA DE MUESTRAS MINERALES CON CONTENIDO DE ORO DEL DISTRITO MINERO PONCE ENRÍQUEZ – ECUADOR

Juan Guerrero Barreto[1], Fernando Morante[2], Luis Santos Sobral[3]

[1]Ingeniero de Minas 2006
[2]Director de Tesis. Ingeniero Geólogo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Postgrado España, Universidad Politécnica de Madrid 2004, profesor de la ESPOL desde 1998
[3]Co-Director de Tesis. Ingeniero Químico, Universidad Federal Rural de Rio de Janeiro, Postgrado Inglaterra, Imperial College of Science And Medicine, IC 1993.

RESUMEN

En éste trabajo, son presentados los resultados obtenidos en la caracterización y ensayos de cianuración intensiva de cuatro muestras minerales provenientes del distrito minero de Ponce Enríquez: mineral de cabeza (JG-01), concentrado de flotación (JG-03), y colas de cianuración (JG-04 y CH-01).

Las muestras fueron caracterizadas por difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica y ensayos al fuego. Los análisis fueron efectuados en los laboratorios del Centro de Tecnología Mineral (CETEM) de Brasil.

En el laboratorio, se realizaron dos etapas de ensayos de cianuración intensiva donde se variaron los parámetros tales como: concentración de cianuro, aireación, pH y granulometría.

Se determinó que las leyes de las muestras JG-01, JG-03, JG-04, CH-01 fueron 9.4, 23.7, 56.7 y 14.8 g/t respectivamente. Para los ensayos de cianuración intensiva en las muestras CH-01, JG-01, JG-03 y JG-04, se consiguió una disolución de oro de: 30.3%, 47.2%, 71.9%, 28.4% respectivamente en la Etapa I; mientras que para la etapa II fueron 22.3%, 52.5%, 54.6% y 18.9%, respectivamente.

Si los tenores y el precio de oro (559.8 USD/onza troy) se mantienen en ese rango, este método resulta conveniente para su aplicación.

ABSTRACT

In this research, the authors present the results obtained in the characterization and intensive cyanidation testing collected about four samples from Ponce Enríquez's mine: head sample (JG-01), flotation concentrate (JG-03) and leach residues (JG-04 and CH-01).

These samples were characterized by X- ray diffraction (DRX), optical microscopy, and fire assay. Two phases analysis of intensive cyanidation were made in the Mineral Technology Center lab (CETEM) in Brazil, changing parameters such as: cyanide concentration, aeration, pH and particle sizes.

These research determined that, gold grade samples JG-01, JG-03, JG-04, CH-01 are 9.4, 23.7, 56.7 and 14.8 g/t respectively. In the phase I of intensive cyanidation tests, the gold dissolution of samples JG-01, JG-03, JG-04, CH-01 were: 30.3%, 47.2%, 71.9% and 28.4%, respectively, whereas for tests of phase II were 22.3%, 52.5%, 54.6% and 18.9%, respectively.

If the grade and price of gold (559.8 USD/onze troy) are maintained, this method will result in an optimal application.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en el Ecuador existen yacimientos y grandes cantidades de residuos minerales con características refractarias y contenidos importantes de oro que no se han podido recuperar (2). Lamentablemente en el Ecuador, la minería del oro sufre por la falta de laboratorios que puedan ayudar a los investigadores a desarrollar una tecnología apropiada para éste fin.

Por otra parte, la principal fuente de ingresos del Cantón Ponce Enríquez es la minería y su distrito cubre 1500 Ha. La Concesión minera fue otorgada formalmente por el Estado ecuatoriano a la Cooperativa Bella Rica en Abril de 1991 (3). El precio del oro actualmente esta en 500 USD/onza troy.

La cianuración intensiva es aplicada principalmente para la disolución de oro de grano grueso (> 14 mesh), método alternativo para la amalgamación y en menas con contenido de minerales de sulfuros, como es el caso de la pirita (4).

Actualmente las empresas mineras de oro del mundo, están utilizando la lixiviación intensiva por sus ventajas sobre las de la amalgamación, debido a que produce menos contaminación y una mayor recuperación de oro. En procesos de pre-tratamiento, como es el caso del ataque de bacterias, el tiempo de lixiviación es muy prolongado (varios meses); por tanto, para poder recuperar rápidamente parte de la inversión en las plantas que utilizan este proceso, se ven obligadas a utilizar la cianuración intensiva como una primera etapa y cianuración convencional en la etapa después del pre-tratamiento; pues hasta el momento, ningún método es más eficiente y económico como lo es la disolución de oro con cianuro. La cianuración intensiva es también eficiente en presencia de minerales sulfurosos, pues produce una atmósfera fuertemente oxidante capaz de romper la armazón de estos minerales.

METODOLOGÍA

Este proyecto fue desarrollado en el CETEM en Rio de Janeiro-Brasil. La caracterización y análisis de las muestras fueron efectuadas en el departamento de Coordinación de Análisis Mineral (COAM-Brasil), mientras que los ensayos de cianuración intensiva fueron desarrollados en el departamento de metalurgia extractiva del CETEM.

Muestreo

Se realizaron salidas de campo, para recolectar 7 muestras representativas de dos yacimientos: De la planta de tratamiento de COMIMACH S.A. (concesión Bella Rica) y de la planta de tratamiento de ORENAS S.A. (concesión Santa Martha), de las cuales solo cuatro fueron seleccionadas para su posterior análisis (tabla I).

Tabla I.- Detalle de muestras seleccionadas

Muestra #	*Código*	*Peso (Kg.)*	*Lugar*	*Descripción*
1	CH-01	2,0	Bella Rica	Cola de Cianuración 1
2	JG-01	1,4	Santa Martha	Cabeza (mineral de mina)
3	JG-03	1,0	Santa Martha	Producto de Flotación
4	JG-04	1,2	Santa Martha	Cola de Cianuración 2

La empresa ORENAS S. A. proporcionó las muestras JG-01, JG-03, JG-04. El producto de flotación lo obtuvo la empresa concentrando el mineral de cabeza (JG-01). La muestra CH-01 fue tomada de las colas de cianuración en la empresa COMIMACH S.A. Las muestras frescas fueron recolectas con pala, luego homogenizas y quartedas, separándolas para los respectivos análisis.

Caracterización de las Muestras Minerales

Las 4 muestras de minerales de sulfuros fueron, caracterizadas como se describe a continuación: Se separo una fracción de las muestras para análisis de difracción de rayos X, para la determinación de las especies minerales y otra fracción para ensayos al fuego (Fire Assay) para determinación de las leyes de oro.

Para el análisis de difracción de rayos X (DRX) se utilizó un equipo Siemens/Brucker – AXS D5005, equipado con espejo de Goebel para eje paralelo de rayos X, detector de Ioduro de sodio (NaI) de estado sólido. La radiación utilizada fue Cu Kα (40 kV/40 mA); la velocidad del goniómetro fue de 0,02° 2θ por paso con tiempo de cuenta de 1,0 segundo por paso. La interpretación fue efectuada por comparación con patrones contenidos en PDF 02 (ICDD, 1996) en el software Brucker Diffrac ^{Plus}

Ensayos de Cianuración Intensiva

La metodología y los cálculos para los ensayos de cianuración, fueron seguidos con base al manual de instrucción de uso para estudios de cianuración del CETEM (4).

Los ensayos de cianuración intensiva se dividieron en dos etapas:

La primera etapa consistió en tratar el mineral con la granulometria original (D_{80} =150 – 75 um); porcentaje de sólidos del 17%, concentraciones de NaCN inicial de 13 g/l y NaOH de 1 g/l, donde el pH se mantuvo en 11. El tiempo de residencia fue de 6 horas sin aireación. A cada hora se tomaron alícuotas de muestra liquida de 10 ml para colectar datos y obtener la curva de disolución de oro por análisis de absorción atómica. Por otra parte, cada dos horas se tomaron alícuotas de 10 ml para la determinación del consumo de cianuro por el método titrimetrico, usando como agente titulador nitrato de plata y como indicador rodanina al 5%. Durante los ensayos de la primera etapa no se mantuvo la concentración inicial de NaCN.

En la segunda etapa se trató el mineral con granulometría -150 mesh, porcentaje de sólidos del 17%, concentraciones de NaCN inicial de 13 g/l. El pH de 10.5 se controló con la adición de cal. El tiempo de residencia fue de 24 horas con aireación. Las alícuotas de 10 ml de muestras liquidas fueron tomadas a cada cierto periodo de tiempo para colectar datos y obtener la curva de disolución de oro y para la determinación del consumo de cianuro. Durante los ensayos de la segunda etapa se mantuvo la concentración inicial de NaCN.

Finalmente, para todos los ensayos, el residuo líquido fue filtrado y guardado en botellas codificadas para posteriores confirmaciones y ensayos de degradación de cianuro. Entre tanto, el residuo sólido fue lavado con agua destilada caliente y secado en una estufa a 35^0C para análisis de tenor de oro.

La tabla II muestra en resumen los parámetros de cada una de las etapas de los ensayos de cianuración intensiva.

Tabla II.- Parámetros de cada una de las dos etapas de Cianuración Intensiva.

Variable	***Etapa I***	***Etapa II***
[CNNa] inicial (g/L)	13	Variable
[CNNa] inicial mantenida	No	Si
Aireación	No	Si
pH	11.0	10.5
Controlador de pH	NaOH	CaO
Tamaño de grano	Original	-150 mesh
Porcentaje de sólidos (%)	17	17
Tiempo de residencia (h)	6	24
Temperatura (C^0)	25	25

Fue utilizado básicamente un sistema reaccional para estudiar el proceso de cianuración intensiva de las muestras de minerales de sulfuros con contenido de oro. Básicamente consiste en recipientes de vidrio Pyrex con capacidad de uno o dos litros dependiendo del volumen de pulpa, con tapa de vidrio apropiada con cuatro orificios para permitir la entrada del agitador, la toma de muestras, inyección de aire y medidas de pH. Además, se contó con un agitador mecánico Nova Etica, una bomba de aire y medidor de pH digital PM600 (ver figura 1).

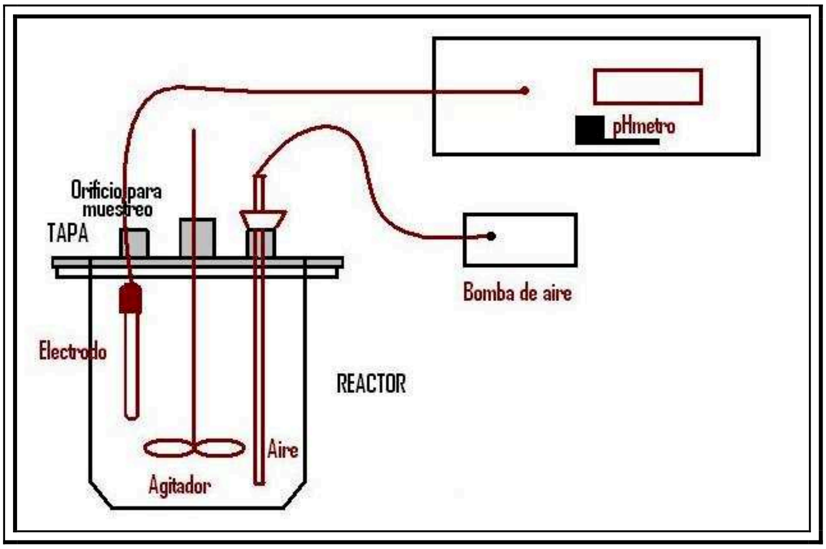

Fig. 1.- Representación grafica del equipamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización

En general todas las muestras presentan contenidos de minerales sulfurosos y como principal mineral accesorio el cuarzo. La figura 2 muestra las especies minerales determinadas por análisis de DRX para la muestra JG-03(concentrado de flotación).

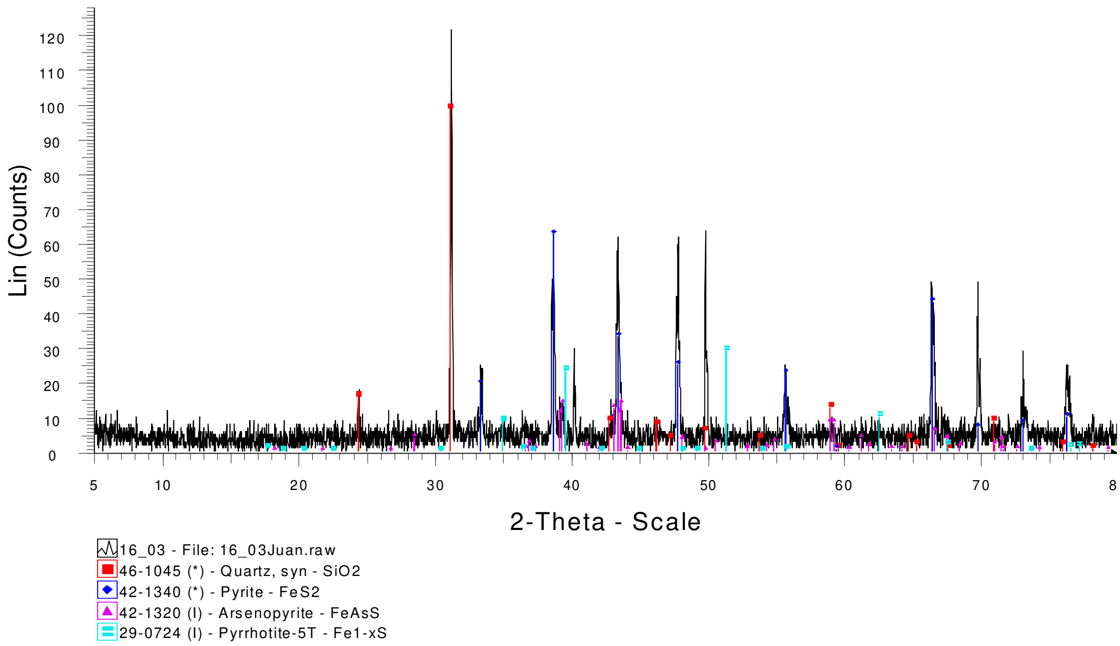

Fig. 2.- Difractograma de la muestra JG-03.

Las tablas III y IV muestran en resumen las principales especies minerales, los tenores de oro y la granulometría original.

Tabla III.- Principales especies minerales y su abundancia en las muestras originales.

Código	*Composición Mineralógica*	*Fórmula*	*Abundancia (%)*
CH-01	Cuarzo	SiO_2	80
	Pirita	FeS_2	10
	Pirrotina	$Fe_{1-x}S$	2
JG-01	Cuarzo	SiO_2	85
	Pirita	FeS_2	5
JG-03	Cuarzo	SiO_2	20
	Pirita	FeS_2	75
JG-04	Cuarzo	SiO_2	85
	Pirita	FeS_2	5

Tabla IV.- Tenores de oro y tamaño de grano de las muestras originales.

Código	*Tenor Oro (g/t)*	*D_{80} (um)*
CH-01	9.4	225
JG-01	25.7	150
JG-03	46.7	75
JG-04	14.8	150

Recuperación de Oro de los Materiales Lixiviados.

Para la determinación del porcentaje de recuperación de oro para cada una de las etapas, se tomaron como referencia los resultados de los ensayos al fuego de las muestras originales y de los residuos sólidos de los ensayos de cianuración (ver figura 3 y 4)

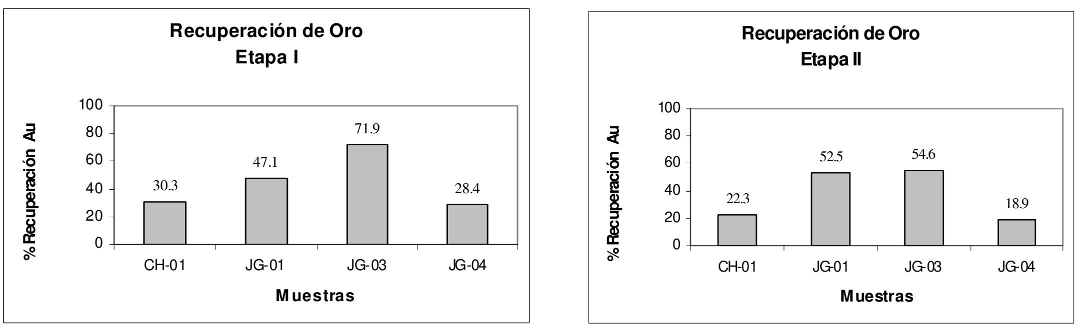

Fig. 3.- Recuperación de oro de las muestras minerales en la etapa I.y II

Efecto de la concentración de Cianuro, Oxigeno y nivel de pH.

En la segunda etapa, la adición de cianuro libre no promovió la disolución de oro, pero favorece la disolución del cobre. Esto se pudo apreciar por la intensidad del color azul (característico del cobre) luego del ataque ácido para degradar el cianuro.

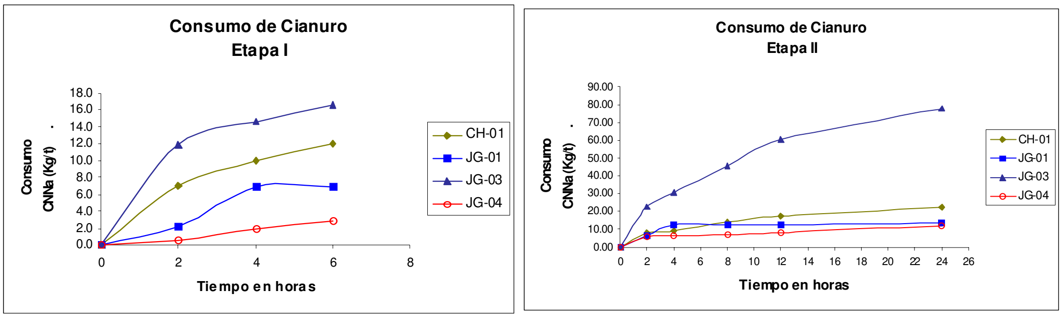

Fig. 4 Consumo de Cianuro en las muestras de la etapa I, con pH 11 sin aireación y tiempo de residencia de 6 horas, y en la etapa I, con pH 10.5, con aireación y tiempo de residencia de 24 horas

En la primera etapa se controló el pH con NaOH, reactivo mas soluble y caro que la cal utilizada para la segunda etapa. En general el pH se mantuvo en los ensayos y el consumo en las muestras CH-01, JG-01, JG-03 y JG-04 fue de 0.28, 0.35, 2.85, 0.38 Kg/t de cal respectivamente para las pruebas en la segunda etapa. La aireación de la pulpa, generada por una bomba de aire, no cumplió el efecto de generar una buena transferencia de oxigeno en la pulpa y por consiguiente una buena disolución de oxigeno en ésta.

Comparando las graficas 4 y 5 en las dos etapas de cianuración intensiva se observa que al bajar la concentración de cianuro también se disminuye la disolución de oro, lo que concuerda con el análisis de los resultados de los ensayos de la muestras CH-01, JG-04.

Efecto del tiempo de residencia

La figura 5, muestra la cinética de disolución de oro para las diferentes concentraciones de cianuro de cada una las muestras minerales y, observando a éstas, se interpreta que un buen tiempo de residencia de las muestras para una cianuración intensiva es de 6 horas. Prácticamente, poca es la disolución de oro y alto el consumo de cianuro después de las primeras 6 horas. Otra información importante que se puede obtener de las gráficas, es que se demuestra que hasta un cierto límite, para altas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución de oro aumenta en función de la cantidad de oxígeno disuelto en la solución. En este caso, la inyección de aire no fue la suficiente para poder oxidar una mayor cantidad de sulfuros.

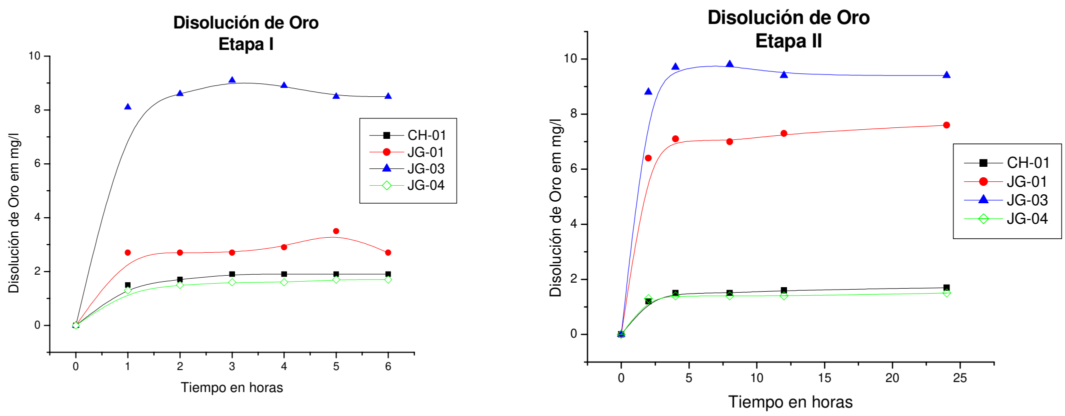

Fig. 5.- Comportamiento de la disolución de oro en los ensayos de la primera y segunda etapa.

Efecto de la granulometria de las muestras

Para el caso de la muestra JG-01, la conminución de ésta, produjo un aumento en la recuperación. Esto se puede apreciar más en detalle observando la figura 5. Por otra parte, la disminución de tamaño del 100% a -105 micras, liberó más sulfuros y causó que el consumo de cianuro se incrementara hasta un 50%. El caso de la muestra JG-01 demuestra que en la primera etapa el consumo a las 6 horas fue de 7.5 Kg./t contra un 15 Kg./t en el mismo tiempo para los ensayos de la segunda etapa.

Costos del Proyecto

Uno de los objetivos de este proyecto es implementar la tecnología desarrollada en las empresas del sector minero de Ponce Enríquez. En esta parte, se evalúan las variables que modifican el costo de operación como son: la adición de reactivo y el tiempo de residencia; es decir, calcular un costo estimado de operación.

La tecnología aplicada actualmente en COMIMACH S.A., se ha tomado como referencia de una operación industrial de cianuración convencional que se realiza en el distrito minero de Ponce Enríquez (6).

***TablaV* -** Comparación de la tecnología desarrollado por COMIMACH S.A. vs cianuración intensiva

Variable	*Parámetros*	
	COMIMACH S.A.	***Cianuración Intensiva (muestra JG-01)***
[NaCN] inicial (Kg/t)	1	6.5
[NaCN] inicial mantenida	Si	No
Aireación	Si	Si
pH	11.0	10.5
Controlador de pH	CaO	CaO
Tamaño de grano (µm)	225	105
Porcentaje de sólidos (%)	45	17
Tiempo de residencia (h)	9	6
Temperatura (C^0)	25	25
Recuperación (%)	80.0	52.5

Actualmente, el costo de cianuración y adsorción de oro con carbón en pulpa es 25 USD/m^3 (6), proceso que lleva un período de 9 horas de lixiviación y 7 horas de adsorción.

Los datos para el cálculo de los costos de operación se presentan en la tabla VI, donde se presentan éstos cambiados a las unidades requeridas para el cálculo.

Tabla VI.- Datos para el calculo de costo de operación

Costos*	Valor (USD/t)
Costo $_{\text{operación/ 16 horas}}$	16.70
Costo $_{\text{operación/ 13 horas}}$	13.56
Costo $_{\text{reactivos}}$	47.50
CNNa	1.90**

*Datos proporcionados por la empresa COMIMACH S.A.
** (USD/kg)

Suponiendo que las condiciones de adsorción sean las mismas en los dos casos y que no hubiesen alteraciones en el precio, se tiene que:

Costo total de Operación:

Costo $_{\text{operación I}}$ = Costo $_{\text{reactivos}}$ + Costo $_{\text{total / 13 horas}}$
Costo $_{\text{operación}}$ = 47.5 + 13.56
Costo $_{\text{operación}}$ = 61.06 USD/t

De la misma forma se efectuó el cálculo en las otras muestras. La tabla VII resume los costos de operación junto con la cantidad de oro disuelto para cada una de las muestras ensayadas. El precio del oro cerró el 20 de enero del 2006 en 559.80 USD la onza troy (7).

Tabla VII.- Costos de operación y oro disuelto en los ensayos

Muestra	Costo (USD/t)	Oro Disuelto (g/t)	Oro Disuelto (USD/t)	Utilidad (USD/t)
CH-01*	108.50	2.9	52.2	-56.3
JG-01*	108.50	12.1	217.8	109.3
JG-03*	108.50	33.6	604.08	496.3***
JG-04*	108.50	4.2	75.6	38.35
CH-01**	37.25	2.1	37.80	0.55
JG-01**	61.06	13.5	243	181.94
JG-03**	108.50	25.5	459	350.5***
JG-04**	37.25	2.8	50.4	13.15
COMIMACH	**16.70**	**1.4**	**25.2**	**8.5**

*I etapa,
** II etapa
*** Para este caso no están considerados los costos de flotación.

Los valores en negrita corresponden a los ensayos donde el costo de producción es menor al precio total del oro diluido.

Análisis Comparativos con las Tecnologías Actuales

La mayoría de las empresas de procesamiento mineral trabajan con cianuración; en realidad no hay un solo método o tratamiento para aplicar esta tecnología. El método de cianuración tradicional agrega cianuro en cantidades bajas y para grandes volúmenes la inyección de aire es necesaria. Por lo tanto, en el caso de las bajas concentraciones de cianuro, es el factor predominante en la disolución de las partículas de oro; mientras que, para el caso de la cianuración intensiva, es decir con altas concentraciones de cianuro, es importante además la adición de oxigeno, porque depende de cuanto éste se oxide en la reacción (atmósfera oxidante) para que sea posible la abertura de los minerales sulfurosos y la disolución de oro.

CONCLUSIONES

Al término de este trabajo se puede concluir que: las muestras poseen altas leyes de oro, una importante presencia de minerales sulfurosos y cuarzo como mineral accesorio. Además Observando los costos y sus utilidades, si los tenores y el precio de oro se mantienen en ese rango, este método resulta conveniente para su aplicación.

REFERENCIAS

1. Guerrero J., Caracterización Y Ensayos De Cianuración Intensiva De Muestras Minerales Con Contenido De Oro Del Distrito Minero Ponce Enríquez – Ecuador(Tesis Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2006)
2. Guevara A. y De la Torre E., Importancia de los Estudios Mineralógicos en el Procesamiento de minerales auríferos refractarios. Memorias del Seminario Internacional Minería, Metalurgia y Medio Ambiente, Escuela Politécnica Nacional, 2003, p. 98 -110.
3. PRODEMINCA, Depósito Porfíricos y Epi-Mesotermales Relacionados con Intrusiones de la Cordillera Occidental y Real Vol. 4, Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador, 2000, 316 p.
4. Marsden J., House L., *The Chemistry of Gold Extration*, Ed. (Ellis Horwood Series in Metals and Associated Materials 1992), Ore Deposit and Process Mineralogy, 1992, pp 45-92.
5. Pinheiro A., Instrução de Uso para Estudos de cianetação, Instrução de trabalho elaborada para o CETEM/MCT, 2000, 7p.
6. Encalada V., Cianuración con carbón en pulpa, Revista Económica de la Cámara de Minería de Machala, CMM01-2004, 2004, p. 20-21.
7. http://www.nytimes.com/aponline/business/AP-Dollar-Gold.html
8. Longley l., McAllum A., Katsikaro N., Intensive Cyanidation: onsite application of inline leach reactor to gravity gold concentrate, minerals engineering, vol 16, 2003, p. 411-419.