

APLICACIÓN A ESCALA DE BANCO DEL PROCESO CIL A UNA MENA DE ORO DE ALTA LEY.**BENCH SCALE APPLICATION PROCESS TO CIL MENA HIGH GRADE GOLD.**

María de Fátima Bugallo Davis⁽¹⁾, Héctor Denys Speck, José Castellanos Suárez⁽¹⁾, Marcela Figueredo Frías⁽¹⁾, Aylin de Armas, Eduardo Antonio de la O⁽¹⁾, Maritsa Cortez⁽¹⁾

En este trabajo se presentan los resultados del diseño y corrida de la aplicación a escala de banco del proceso carbón en lixiviación (CIL) a una mena de oro de alta ley. Para el proceso de lixiviación adsorción se emplearon 4 recipientes plásticos de 5 L utilizados como reactores con un volumen efectivo de 3,5 L, interconectados de manera tal que sólo permitiera el flujo continuo de la pulpa, la cual se mantuvo en agitación mediante la adición de aire suministrado por compresor. Cada 24 horas se trasegaba de forma manual 57 g base seca del carbón activado Norit RO 3515 granular extrusado de forma cilíndrica empleado en esta experiencia. La concentración de carbón por tanque fue de 40 g/L de pulpa para los TK 1 y 4 y de 20 g/L de pulpa para los TK 2 y 3. La ley de Au diseñada para el carbón de salida fue de 4kg/t y la alcanzada durante la corrida osciló entre 2 y 2,5 kg/t. a Las principales causas en esta diferencia se debió a la ley de oro en el mineral y al flujo másico alimentado durante la corrida de la prueba. Se comprobó la compatibilidad de la muestra al proceso CIL.

Palabras clave: Carbón en lixiviación, carbón activado

Designing and running bench scale test results reached from the treatment of a high grade golden ore using the carbon in leaching process (C.I.L.) are shown in this paper. Four 5-liter-plastic containers with an effective capacity of 3.5 L for the leaching-adsorption process were used as reactors interconnected so that it permits continuous flow of the pulp which was agitated by air supplied from a compressor 57.0 g of granular dry base activated carbon Norit RO 3515 were moved every 24 hours' carbon concentration in tanks 1 and 4 was 40 g/L, and 20 g/l for tanks 2 and 3. Gold concentration of 4 Kg/t was designed for the loaded carbon and the concentration reached during the test running varied from 2 to 2.5 Kg/t. The mains causes of this difference obeys to the low grade ore employed , and lower mass flow feeding during the test run in comparison with the one designed. It was demonstrated that the golden ore sample studied is suitable to C.I.L process.

Keywords: carbon in leach, activated carbon, gold

Recibido: 20 de marzo del 2015

Aprobado en su forma original: 18 de mayo del 2015

(1) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Varona 12028 Km^{1/2} Boyeros, La Habana, Cuba, CP-10800 Correo electrónico: fatima@cipimm.minem.cu

INTRODUCCIÓN

El proceso de carbón en lixiviación o CIL, como también se conoce por su sigla en inglés, constituye una variante del proceso Carbón en pulpa o CIP. La diferencia entre ambos procesos consiste en que en el proceso de carbón en pulpa, los procesos de lixiviación y adsorción ocurren en reactores separados, primero se lixivia el oro, y la pulpa con el oro disuelto fluye hacia un tren de reactores donde se efectúa la adsorción en el carbón mediante un proceso a contracorriente en el proceso CIL, ambos procesos, lixiviación-adsorción, ocurren de manera casi simultánea dentro de los mismos tanques, así, es factible reducir los costos y evitar que otra materia orgánica pueda adsorber prematuramente el oro disuelto del circuito. (Suárez de Abreu y col. 1991; Yannopoulos, 1991; Marsden and House, 1993; Rees and Van Deventer, 2001, Domic, 2001).

Cada proceso (lixiviación y adsorción) tiene sus propias características. Comparativamente se puede decir que el proceso de lixiviación es más lento y requiere de una agitación más fuerte que el proceso de adsorción, esto implica que en el diseño del tamaño de los reactores para un proceso CIL se tiene que tener en cuenta fundamentalmente el tiempo de lixiviación requerido y que la agitación debe ser fuerte para garantizar la transferencia del oxígeno requerido en la solubilización del oro lo cual pudiera conllevar a una mayor pérdida de oro por atrición del carbón.

La mena de oro tomada para este estudio fue anteriormente investigada a escala de laboratorio aplicando un proceso de carbón en pulpa y en este estudio se quiere comprobar si se mantiene la compatibilidad de la mena con el proceso CIL sin afectación de los índices tecnológicos alcanzados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Planificación del sistema CIL

Para planificar un sistema CIL es necesario considerar no sólo las propiedades fundamentales del carbón activado a emplear como son la densidad aparente, la capacidad específica selectiva y la resistencia mecánica, sino también los principales parámetros del sistema como son: Concentración de oro en la pulpa alimentada (cabeza), concentración de oro en la pulpa agotada (cola), densidad de la pulpa, concentración de carbón en pulpa, ley de oro en el carbón de salida, pH, tiempo de retención de la pulpa, entre otros.

En la concepción del proceso CIL a escala de banco se tomaron los principales parámetros tecnológicos establecidos cuando se estudió el proceso CIP para esta misma mena, ellos fueron:

Carbón activado empleado: Norit RO 3515 granular extrusado de forma cilíndrica. Estos carbones son especialmente diseñados para procesos de recuperación de oro.

Ley de Au en el mineral: 40 g/t

Densidad de la pulpa (g/L): 1336,6 – 1359,5 g/L, que equivale a trabajar con un % de sólido entre 40 – 42.

pH: 10,5 – 11

Cantidad de reactores: 4

Concentración de carbón: 40 g de carbón/L de pulpa en los reactores 1 y 4 y 20 g de carbón/L de pulpa en los reactores 2 y 3.

Ley de Au en carbón de salida: 4 kg/t

Tiempo de retención de la pulpa en el circuito: 29,4 h

Granulometría del mineral: 90 % bajo 200 mallas (0,074 mesh).

Concentración de cianuro: 1 g/L

Otros parámetros supuestos

Perfil de oro en carbón del inventario: 4, 2, 1 y 0,5 kg/t

Eficiencia de lixiviación total: 93,8 %

Eficiencia de lixiviación por reactor: 50, 40, 2,5 y 1,3 %

Eficiencia de adsorción total: 98 %

Sistema de lixiviación-adsorción empleado:

El sistema de lixiviación-adsorción empleado en esta experiencia (Figura 1) está formado por:

- 4 recipientes plásticos de 5 L utilizados como reactores con un volumen efectivo de 3,5 L, interconectados de manera tal que sólo permita el flujo continuo de la pulpa, la cual se mantiene en agitación mediante la adición de aire suministrado por compresor.
- Una tanqueta de 20L con 15 L de volumen efectivo para recepcionar la pulpa cruda, provisto de un agitador mecánico para mantener la pulpa homogénea y una bomba peristáltica para garantizar el flujo estable de alimentación al primer reactor del sistema de adsorción.
- Una tanqueta de 20L con 15L de volumen efectivo para recolectar la pulpa agotada en Au que sale del sistema.
- Recipiente de 20 L con tapa horadada que contiene el cianuro que se alimenta al sistema mediante bomba peristáltica para garantizar el flujo estable del mismo.

El desarrollo de estos procesos (CIP o CIL) contempla tres fases o etapas:

- a) 1era Fase: Carga de los carbones del inventario.
- b) 2da Fase: Estabilización del sistema
- c) 3era Fase: De operación

Para diseñar la primera fase (carga en oro de los carbones del inventario) es preciso determinar primeramente la cantidad de pulpa que se requiere para lograr el perfil de oro previamente establecido, y para ello hay que considerar la suma de los mg de Au en carbón de cada uno de los reactores en

correspondencia con las cargas de Au fijadas, el flujo de pulpa de alimentación al sistema y los mg de Au en el sólido de la pulpa alimentada, así como las eficiencias de lixiviación y adsorción esperadas. Posteriormente se debe prever el tiempo requerido, para alcanzar las cargas fijadas teniendo en cuenta la cantidad de pulpa calculada y el flujo con que se alimentará la pulpa.

Otro cálculo importante es la cantidad de carbón a trasegar en correspondencia con el tiempo de trasiego fijado, para lo cual se tiene que considerar el flujo de oro que entra al sistema, las eficiencias de lixiviación y adsorción establecidas así como la ley de oro en el carbón de salida que se desea obtener.

En un circuito CIP el control de la carga de los carbones se puede lograr más fácilmente que en un circuito CIL por análisis del oro en el licor de entrada y salida de cada reactor, pero en un circuito CIL este control tendría que llevarse a cabo por análisis del oro en el carbón del inventario, lo cual es un análisis más caro, más engorroso y lleva mucho más tiempo.

El proceso más fácil para cargar los carbones del inventario sería alimentar la pulpa al primer reactor con el flujo de pulpa establecida dejando que fluya hacia los otros reactores por reboso, una vez que se alcance aproximadamente la mitad del volumen efectivo de pulpa en cada uno de los reactores se activa la agitación por aire con el objetivo de mantener el sólido de la pulpa en suspensión, y se añade el peso del carbón establecido. Posteriormente se inicia la adición de cianuro y cuando el carbón del primer tanque alcance la concentración de oro programada se realiza el primer trasiego y comienza la fase de estabilización. Pero de esta forma el proceso es más lento y se necesitaba acelerarlo, para ello se siguió la siguiente estrategia.

Estrategia seguida para la carga de los carbones

Según la planificación realizada, a los reactores 1 y 4 le correspondió una concentración de carbón de 40 g/L de pulpa equivalente a 140 g de carbón en cada reactor y a los reactores 2 y 3 le correspondió una concentración de carbón de 20 g/L de pulpa, equivalente a 70 g de carbón en cada uno.

Con el objetivo de acelerar la fase de carga de los carbones se desarrolló la siguiente estrategia:

Se llenó de pulpa el reactor No. 1 desde el inicio con los 3,5 L de la pulpa cruda, la cantidad de cianuro correspondiente y 25 g de carbón /L que correspondería a 88 g totales como inventario, y se mantuvo durante 7,24 horas (que representaban 7 horas y 14 minutos) sin alimentar pulpa, durante este tiempo se analizó cada 1 hora el pH y la concentración de cianuro para reponer, en caso necesario, la cantidad de cianuro que haría falta para mantener la concentración en 1 g/L. Pasado las 7 horas y 14 minutos, se comenzó a alimentar pulpa con el flujo calculado de 0,48 L de pulpa. En el segundo reactor se adicionó una concentración de carbón /L de pulpa igual a 18, que correspondería a 63 g totales, a los otros dos reactores se le adicionó la cantidad de carbón planificado de 70 y 140 g. Cuando se cumplió el tiempo de 2,82 días, tanto el carbón del reactor 1 y el carbón del reactor 2 debieron haberse cargado con 4 kg/t de Au. En este momento se realizó un trasiego de la siguiente forma:

Al Reactor No. 1: Se le añadieron 24 g de carbón cargado procedentes del reactor No. 2 y 28,51 g de carbón fresco.

Al Reactor No. 2: Además de la extracción de los 24 g de carbón para añadirlo al reactor 1, se le deben extraer 25,3 g de carbón cargado para sacarlos del sistema y se le adicionan entonces 49,3 g de carbón fresco.

Al Reactor No. 3: Se le extraen 57 g de carbón que se sacan del sistema y se le añade la misma cantidad de carbón trasegados del reactor No 4.

Al Reactor No 4: Se le añaden 57 g de carbón fresco.

Con este movimiento de carbón se debe alcanzar aproximadamente la ley de oro en los carbones del inventario planificada para cada reactor de 4, 2, 1 y 0,5 kg/t respectivamente.

Una vez realizado este trasiego comenzaría la **FASE DE ESTABILIZACIÓN**. Esta fase es relativamente corta, en dos o tres ciclos el sistema ya debe lograr su estabilización y comenzaría la **FASE DE OPERACIÓN**.

Pre-acondicionamiento del carbón:

Previamente a su uso en un sistema de adsorción el carbón debe pre-acondicionarse este proceso consiste en redondear las aristas (puntas y cuñas afiladas las cuales son fácilmente desgastadas bajo las condiciones de proceso. Similarmente, partículas planas y partículas deterioradas (cuarteadas o fracturadas) son susceptibles a la degradación rápida en sistemas de adsorción, resultando en pérdidas de carbón fino y cualquier contenido de oro. (Tomalá, 1998)

Para ello se pesó 1 kg de carbón, se dividió en dos partes iguales y se colocó en sendos pomos plásticos (botellas) con un volumen de agua corriente en una relación L/S de 3, se puso a rotar en el molino de rodillo durante 8 horas, posteriormente se vertió el carbón en un tamiz de 0,5 mm, se enjuagó varias veces con agua corriente y se puso a arear.

Determinación del % de sólido del carbón lavado y escurrido.

Con el objetivo de conocer cuántos gramos de carbón lavado y escurrido se corresponde con un peso seco de 57 g (es la cantidad de carbón a trasegar diariamente durante la prueba) se determinó, a una muestra de carbón en esas condiciones, el % de sólido en el equipo Determinador de humedad.

Preparación de la pulpa mineral:

La pulpa de mineral empleada en esta experiencia fue preparada en las instalaciones de la planta piloto del CIPIMM teniendo en cuenta el pasaporte que acompañó a la muestra mineral extraída de la mina.

Los datos entregados de la pulpa preparada fueron los siguientes:

Ley de Au en mineral: 40 g/t
% de sólido en la pulpa: 38- 40
Grado de fineza: 90 % bajo 200 mallas (-0,074mm)

Con estos datos se realizó la planificación de toda la prueba, sin embargo, posteriormente se comprobó que la ley de Au real en el mineral era de 26,6g/t y no de 40 g/t como decía el pasaporte, esto fue debido a un incremento en la dilución durante la extracción de la muestra, lo cual, lógicamente, tuvo su impacto en los resultados obtenidos como se explicará posteriormente.

Controles y puntos de muestreos durante la prueba:

Los controles fundamentales establecidos fueron:

- a) **pH:** el pH de la pulpa de alimentación y en la pulpa del 1^{er} reactor debe mantenerse entre 10,5 y 11, no sólo como valor de pH protector para evitar el desprendimiento del gas cianuro de hidrógeno, sino además para evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis del mismo. Su medición y control se planificó cada 1 hora.
- b) **Flujo de alimentación de pulpa cruda:** El flujo de alimentación de pulpa al sistema de adsorción debe mantenerse en 8 mL/min. Con esto se asegura la entrada estable del metal precioso a lixiviar. Su medición y control se planificó cada 1 hora.

- c) **Concentración de cianuro en el reactor 1:** La concentración de cianuro en el reactor No. 1 se debe mantener en 1 g/L, el control se realiza cada 1 hora y en caso necesario debe reponerse la cantidad de cianuro para mantener su concentración en la condición nominal de trabajo.
- d) Se debe velar también que exista la suficiente aireación en los reactores para garantizar un contacto estrecho entre la masa de pulpa y el carbón.

Trasiego del carbón

El procedimiento establecido para el trasiego consistía en la extracción, con ayuda de un muestreador conformado por una malla de 2 mm, de una cantidad de carbón, que una vez lavado con agua corriente y escurrido tuviese un peso aproximado de 128 g. Este peso de carbón lavado y escurrido se corresponde con los 57g de carbón seco a trasegar.

El trasiego del carbón se planificó realizarlo cada 24 horas y la estrategia seguida consistió en extraer primeramente del reactor No 1 la cantidad de carbón cargado que salía del sistema. Luego se extraía el carbón del reactor No 2 y se adicionaba al reactor No 1, seguidamente el carbón extraído del reactor No 3 se adicionaba al reactor No 2, posteriormente se extraía el carbón del reactor No 4 y se adicionaba al reactor No 3 y por último al reactor No 4 se le adicionaba los 57 g de carbón fresco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla No 1 se exponen comparativamente los valores de los principales parámetros calculados para el sistema CIL diseñado y los alcanzados durante la corrida experimental.

Tabla 1. Puntos de muestreos durante la prueba.

| <i>Punto de muestreo</i> | <i>Tiempo</i> | <i>Cantidad de muestra a tomar.</i> | <i>Análisis a realizar</i> |
|--------------------------------------|--|---|---|
| <i>TK de pulpa cruda.</i> | <i>Al iniciar una templa.</i> | 1L | <i>pH, % de sólido, densidad de la pulpa, concentración de Au y Ag en la fase sólida.</i> |
| | <i>Cada 2 h durante el tiempo que dure la templa. (Cada templa tiene 15 L)</i> | | <i>pH, % de sólido, densidad de la pulpa.</i> |
| <i>Reactor 1</i> | <i>Cada 1 hora</i> | <i>50 mL del reboso de cada uno de los reactores.</i> | <i>pH, cianuro y Au en licor</i> |
| <i>Reactor 2</i> | | | |
| <i>Reactor 3</i> | | | |
| <i>Reactor 4</i> | | | |
| <i>TK compósito de pulpa agotada</i> | <i>Cada vez que termine una templa</i> | 1L | <i>pH, cianuro, Au y Ag en licor y Au en sólido.</i> |
| <i>Perfil de Au en carbón</i> | <i>1 hora antes de realizar el trasiego</i> | <i>1g en base seca</i> | <i>Au y Ag</i> |

Tabla 2. Resultados comparativos de los principales parámetros tenidos en cuenta para la planificación del sistema CIL.

| PARÁMETROS | DISEÑO | CORRIDA |
|--|-----------|--------------|
| Volumen de pulpa alimentada al sistema (L) | 112,8 | 105,75 |
| % de sólido promedio | 40 | 38,43 |
| Densidad de la pulpa alimentada promedio (g/L) | 1336,6 | 1318,90 |
| Ley de Au promedio (g/t) | 40 | 26,57 |
| Flujo volumétrico de pulpa promedio(L/h) | 0,48 | 0,473 |
| Flujo másico de pulpa (g/h) | 646,15 | 625,96 |
| Flujo másico de mineral (g/h) | 258,46 | 240,56 |
| Flujo másico de licor (g/h) | 387,69 | 385,40 |
| Flujo de Au promedio que entró al sistema (mg/h) | 10,34 | 6,39 |

Como se puede observar resalta fundamentalmente la ley de Au del mineral tomada como referencia para el diseño y la real con la que se corrió la prueba, esta última representa un 33,6 % menor.

También se observa diferencia en el % de sólido de la pulpa alimentada, lo cual incidió en la disminución del flujo másico del mineral de 258,46 a 240,56 g/h, lo que implica una insuficiencia en la alimentación de Au al sistema que representa 38 % menos de Au del que debía haberse alimentado.

Estos dos aspectos son los causantes de la carga de Au lograda en los carbones como se mostrará posteriormente En la Figura 1. se muestra el comportamiento de la carga de los carbones en cada reactor, información obtenida a partir de los análisis de las muestras de carbones extraídos durante los perfiles realizados 1 hora antes de cada trasiego. Aquí se observa el comportamiento típico de estos sistemas el carbón del reactor CIL 1 que es el que ha atravesado todo el circuito es el que alcanza la mayor carga de oro y en orden decreciente los carbones de los demás reactores.

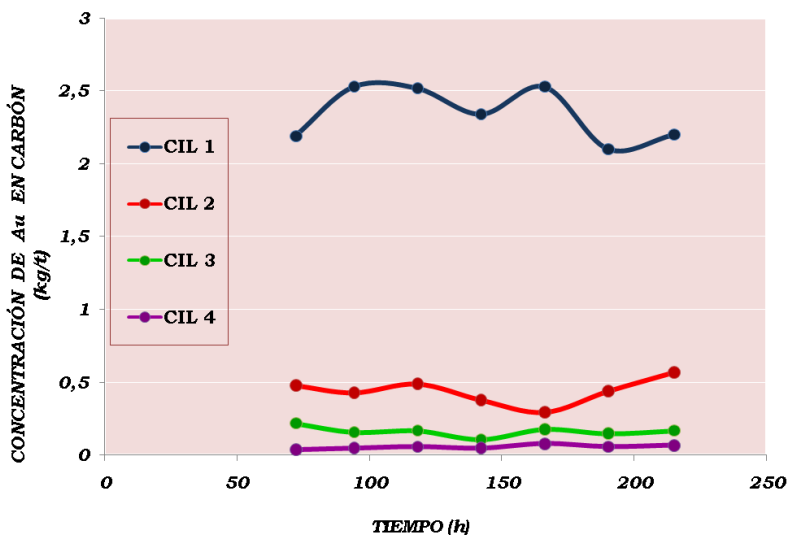


Figura 1. Perfil de Au en carbón.

En la figura 2 se muestra la carga de Au alcanzada en los carbones extraídos del sistema (carbones del trasiego). Como se observa la carga de Au en los carbones oscila entre 2 y 2,5 kg/t.

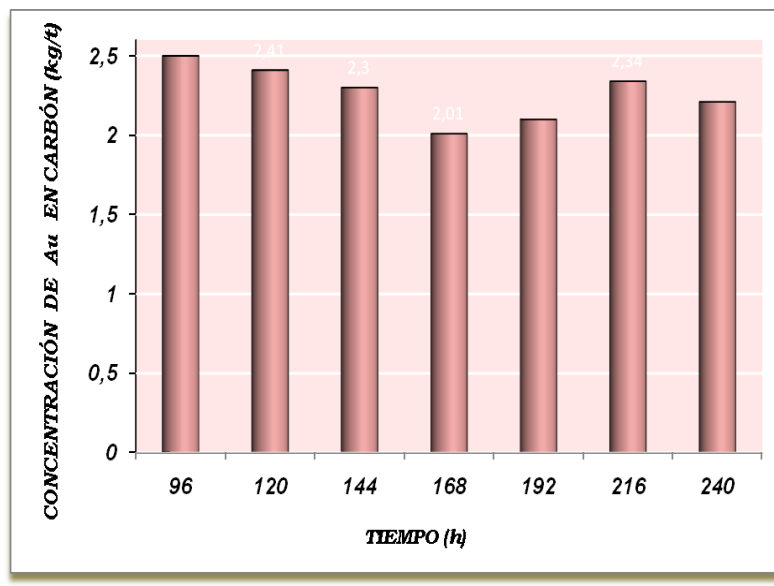


Figura 2. Carga de Au en el carbón extraído

La Tabla 3 muestra el volumen de pulpa que hubiera sido necesario procesar (62,36 L) en las condiciones reales en que se desarrolló la prueba para alcanzar la carga preestablecida de oro en los carbones de salían del sistema (4

kg/t), lo cual incidiría en un consumo mayor de tiempo para la fase de carga de los carbones. También se expone el flujo de carbón que se debía haber trasegado (35,65 g/d) para mantener dicha carga.

Tabla 3. Planificación de la prueba en las condiciones reales.

| | | |
|---|--------------|------------|
| Ley de oro: | 26,57 | g/t |
| Tiempo de residencia: | 7,24 | h |
| Volumen efectivo de los reactores | 3,5 | L |
| % S de la pulpa: | 38,43 | % |
| Dp: | 1318,9 | g/L |
| Relación L/S | 1,6 | |
| Flujo volumétrico de Pulpa | 0,48 | L/h |
| Flujo másico de la pulpa: | 632,94 | g/h |
| Flujo de mineral: | 243,24 | g/h |
| Flujo másico de licor | 389,70 | g/h |
| Flujo de Au que entra al sistema: | 6,46 | mg/h |
| Total de Au en inventario | 840,00 | mg |
| Vol. De pulpa a procesar para lograr el Inv. | 62,36 | L |
| Rec.Total en Lixiviación: | 93,8 | % |
| Eficiencia de adsorción Total (%) | 98 | % |
| Ley de Au en carbón de salida | 4 | g/kg |
| Carbón a trasegar: | 35,65 | g/d |

En la figura 3 se muestra como se comportó el perfil de oro en el licor durante la prueba. Se observa que en los reactores CIL-3 y CIL-4 la concentración de Au en el licor mantiene un comportamiento muy similar con valores prácticamente menores de 0,1 mg/L todo el

tiempo, lo cual muestra la alta eficiencia de adsorción del sistema. Este resultado es totalmente lógico pues para la ley de oro presente en el mineral, existe disponibilidad de carbón suficiente para adsorber todo el oro que se lixivie en el circuito.

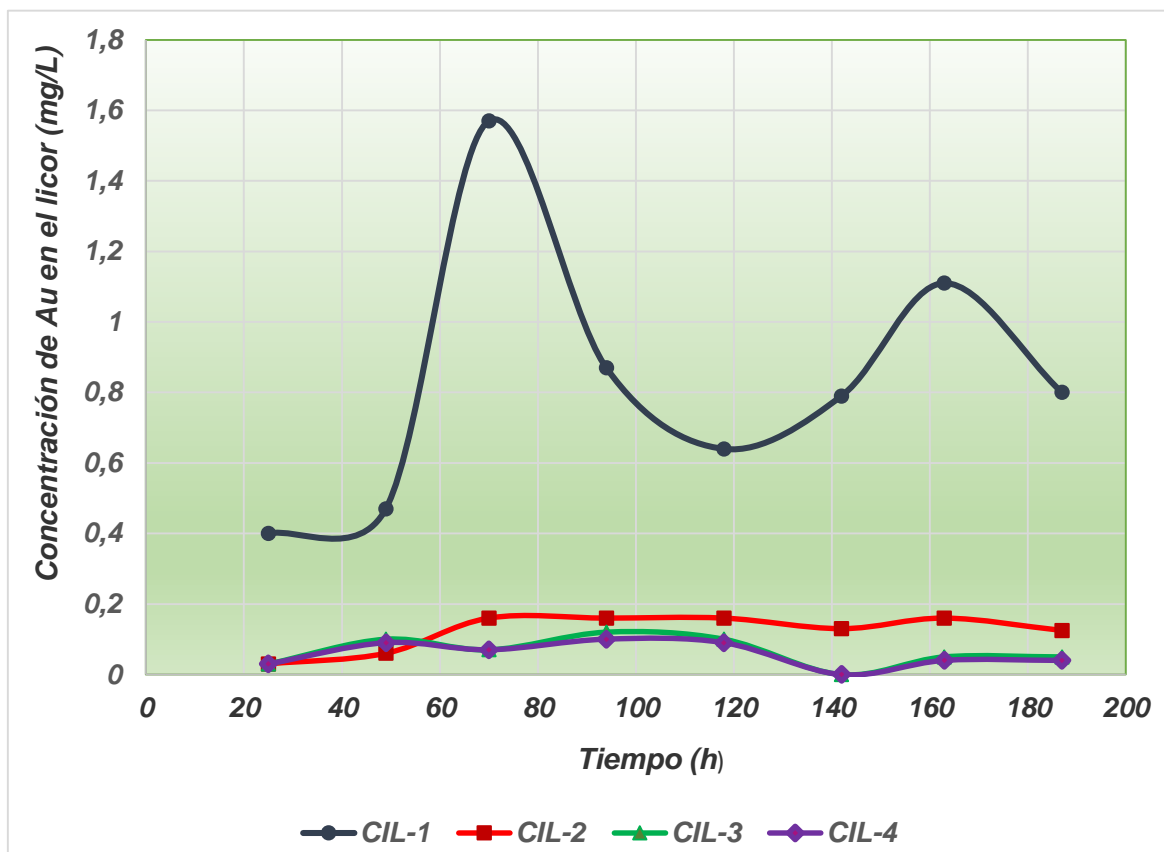


Figura 3. Perfil de oro en licor.

En la Tabla 4 se expone la eficiencia de lixiviación alcanzada en el sistema, la cual alcanzó un valor de 93,64 %. este resultado

unido a la alta eficiencia de adsorción lograda nos indica la compatibilidad del mineral con el proceso de carbón en lixiviación.

Tabla 4. Eficiencia de lixiviación

| Oro promedio en cabeza(g/t) | Oro promedio en cola (g/t) | Eficiencia del proceso (%) |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 26,58 | 1,69 | 93,64 |

CONCLUSIONES

1. Se comprobó que el mineral estudiado es compatible con el proceso de carbón en lixiviación.
2. Se alcanzó una eficiencia de lixiviación de 93,6 %, con una alta eficiencia de adsorción.
3. La carga de Au en el carbón osciló entre 2 y 2,5 g/t.

BIBLIOGRAFÍA

- Domic M. Esteban. 2001. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones.
- Marsden, J., House, L.1992.The chemistry of gold extraction. Great Britain. Ellis Horword Limited
- Rees K. and Van Deventer J. 2000. The mechanism of enhanced gold extraction from ores in the presence of activated carbon, Hydrometallurgy, Vol. 58.
- Suárez M., Abache H., Patines F. and Iacocca D. 1991.Tecnología del oro. Instituto de Ingeniería, Caracas, Venezuela.
- Yannopoulos, J.C.1991. The extractive metallurgy of gold (New York: Van Nostrand Reinhold.