

ESTUDIO DE LIXIVIACION DE MINERALES DE COBRE OXIDADOS PARA UNA PLANTA DE 1200 Tpd

(*) J. SIMPSON A., (*) P. NAVARRO D., (*) J. MANRIQUEZ F., (**) F.J. ALGUACIL

(*) **Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Avda. L. B. O'Higgins N° 3363, Estación Central, Santiago, Chile, FAX (56) (2) 6811545.**

(**) **Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CSIC, Avda. Gregorio del Amo 8 Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España, FAX 15347425.**

RESUMEN

En este trabajo se analizan los resultados obtenidos en un estudio de lixiviación de minerales de cobre oxidados, cuya ley de cobre total es de 2,04% y de cobre soluble es de 1,78%.

En la primera parte de este estudio se efectuó un análisis cualitativo de los distintos métodos de lixiviación y su potencial aplicación a la situación presentada, es decir; reservas, mineralogía, ley media de cobre total y cobre soluble. El resultado de este análisis determinó que la situación en estudio debe enfocarse al método de lixiviación de películas delgadas.

El procedimiento experimental se dividió en 2 etapas: etapa I, aglomeración y curado; etapa II, lixiviación en películas delgadas. Los resultados de la etapa I corresponden a las condiciones iniciales de la etapa II. En la etapa I se estudió la granulometría, la dosificación de ácido sulfúrico y la humedad de aglomeración, por otro lado en la etapa II se estudió la incidencia de la concentración de ácido sulfúrico y el flujo específico del fluido alimentado.

Los mejores resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio fueron bajo las siguientes condiciones, **aglomeración y curado**: granulometría 100% - 1/4", dosificación ácida 2.3 Kg ac/Kg Cu, humedad de aglomeración 12.68%; **lixiviación en películas delgadas**: conc. de H₂SO₄ alim. 10 gpl, flujo específico alim. 10 l/h m². Con estas condiciones el porcentaje de extracción a las 510 horas de operación, fue de 86.92% y el consumo de ácido alcanzó el valor de 5.2 Kg ac/Kg Cu.

MARCO DE REFERENCIA

Antes de comenzar un estudio de factibilidad técnica es necesario conocer las características geológicas del yacimiento, es decir, magnitud de reservas, caracterización de la mena, hidrología del área y ley media del yacimiento. En este caso se ha supuesto que las

reservas demostradas son de $1,2 \times 10^6$ ton, con una ley media de 2.04 % de Cu_1 (1.78% Cu_1). La caracterización mineralógica de la mena en estudio, determinó que la especie más abundante es Malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$), con presencia de Azurita e hidróxidos de cobre, entre los óxidos y, Bornita y Calcopirita en bajas cantidades entre los sulfuros. En la ganga se observó una gran cantidad de Calcita y carbonatos que debieran afectar negativamente a un proceso de lixiviación ácida.

ELECCION DEL METODO DE LIXIVIACION [1],[2],[3],[5] y [8]

Para la elección del método de lixiviación se deben considerar los siguientes aspectos: ley de cobre del yacimiento, características de la mena, hidrología del área, magnitud de reservas, capacidad de procesamiento, respuesta metalúrgica, costos de operación y capital, y rentabilidad económica.

Dentro de los métodos factibles de aplicar, destacan tres altamente competitivos entre sí, estos métodos son: lixiviación en pilas, lixiviación en bateas, lixiviación en películas delgadas (T.L.).

La lixiviación en pilas presenta la ventaja de requerir los costos de inversión y de operación más bajos de los tres en análisis, se obtienen extracciones del orden de 70 a 80% en tiempos relativamente cortos (3 a 6 meses) con operaciones de fácil control. Puede ser aplicado a minerales de cobre oxidados con leyes entre 1 a 3% de Cu_1 . Entre sus desventajas más relevantes resaltan: segregación de finos y compactación que provocan canalizaciones e impermeabilización del lecho poroso. Este método tiende a consumir cantidades importantes de ácido y esto se ve incrementado con la presencia de carbonatos y calcitas, como ocurre con la mena en estudio.

En la lixiviación en bateas se pueden obtener extracciones del orden de 80 - 85% en ciclos de 2 a 10 días. Se requieren inversiones altas en comparación a la lixiviación en pilas y en películas delgadas, generalmente los costos operacionales son también más altos. Se aplica a minerales de cobre oxidados con leyes no inferiores a 2% y no superiores a 4% de Cu_1 . No se aplica en menas con alta producción de finos ya sea por molienda mecánica o

química, pues estos finos impermeabilizan el lecho provocando graves problemas operacionales. En el caso en estudio, la mena presenta alrededor de un 8%-200#ty, lo que resulta ser bastante fino como para aplicar este método directamente. Una solución es efectuar una clasificación previa, enviando los finos a una lixiviación por agitación y los gruesos a las bateas, pero esto significa que se debe instalar una planta de lixiviación por agitación con su respectiva planta de separación sólido-líquido y tranque de relaves, con aumento significativo de costos de inversión y de operación.

La lixiviación en películas delgadas tiene varias ventajas comparativas con respecto a sus competidores, posee costos de inversión y operación levemente superior a los de lixiviación en pilas, pero significativamente inferiores a los de lixiviación en bateas. Se obtienen extracciones similares a las de las bateas, pero a tiempos menores que la lixiviación en pilas (15 a 30 días). Se puede aplicar a un amplio rango de leyes que van desde 1% hasta 4% de Cu. Dado que se optimiza el comportamiento hidrodinámico al interior del lecho poroso, el consumo de agua y ácido sulfúrico es mínimo, permitiendo además un fácil control de operación.

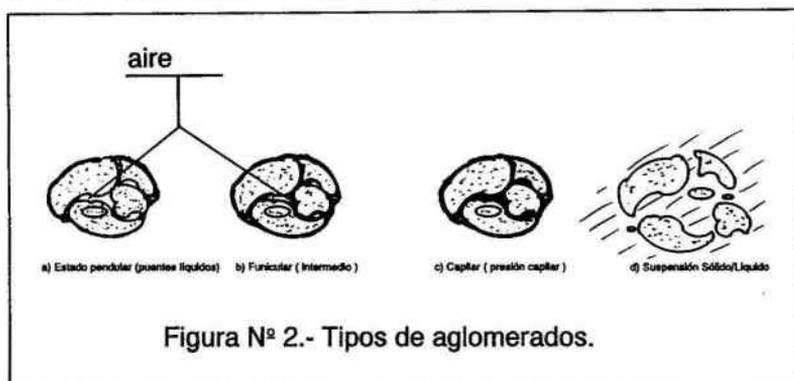
En base a lo expuesto anteriormente, la lixiviación en películas delgadas resulta ser el método más conveniente de aplicar al sistema en estudio. En la figura 1 se puede observar un diagrama de flujos del proceso de lixiviación en películas delgadas.

LIXIVIACION EN PELICULAS DELGADAS [2],[6],[7] y [8].

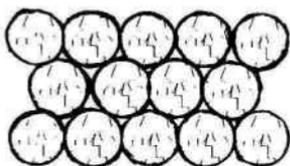
La lixiviación en películas delgadas consiste en someter la mena a un proceso de chancado fino (100%-1/4"), luego el producto se mezcla con ácido sulfúrico y agua en un tambor rotatorio, enviándose posteriormente a canchas de curado, donde se deja reposar durante un tiempo no superior a 48 horas. Esta operación se realiza con el propósito de lograr 2 objetivos:

- Unir las partículas finas a las más gruesas, de manera de lograr un aspecto granular en el lecho mejorando el escurrimiento de soluciones a través de él, al minimizar la segregación de finos y minimizando posibles canalizaciones.
- Efectuar un ataque químico, de tal forma que se produzcan todas las transformaciones químicas de las menas de cobre oxidados a sulfatos cúpricos durante el periodo de

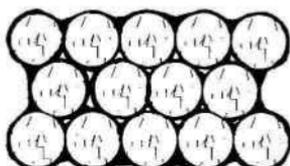
del lecho, a la existencia de zonas muertas, compactaciones y segregación de finos que provocan impermeabilizaciones y además a la molienda física y química que se produce durante el proceso. En el caso particular de la lixiviación en películas delgadas, este comportamiento se optimiza gracias a la aglomeración, pues las partículas finas se adhieren a las gruesas, confiriéndole un aspecto granular al lecho. La calidad hidrodinámica del lecho poroso es función de la cohesión de los aglomerados, que se puede producir por fuerzas interfaciales y a presiones capilares. Estos mecanismos de enlace incluyen dos casos extremos: la formación de puentes líquidos puros y la unión de un aglomerado a través de la presión capilar de la superficie, cuando está lleno de líquido. En la figura 2 se muestra diferentes tipos de aglomerados, dependiendo de la cantidad de agua en la mezcla.



La cantidad de agua adicionada en la aglomeración es un parámetro crítico para las cualidades físicas del lecho poroso y deberá ser determinada experimentalmente para cada mena en particular en conjunto con el efecto químico. En la figura 3 se muestra el aspecto del lecho granular antes y durante la lixiviación. Cuando se comienza a regar el lecho, el líquido descende a través del lecho a una cierta velocidad, de manera que este líquido envuelve a los aglomerados, formando una película delgada de líquido en la superficie de los aglomerados sin destruirlos. Como los aglomerados están humedecidos, se logra un íntimo contacto entre el líquido que desliza y el que está en los aglomerados, produciéndose los fenómenos de transferencia iónica; esta situación se puede observar en la figura 4. Para estudiar experimentalmente el comportamiento hidrodinámico, es necesario estudiar la curva de distribución de tiempos de residencia (D.T.R.) en un lecho de este tipo y en lo posible de la misma altura del reactor industrial.



a) Estado previo a la lixiviación.



b) Estado durante la lixiviación.

Figura N° 3.- Lecho granular antes y durante la lixiviación.

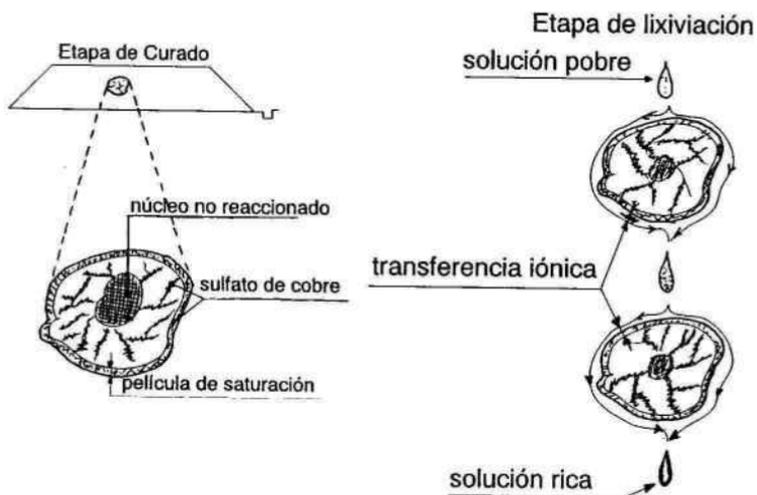


Figura N° 4.- Esquema de disolución.

ESCALAMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL [3],[4] y [8]

Se han propuesto varios criterios para determinar los parámetros de operación a nivel industrial a partir de datos experimentales, alguno de estos criterios son:

a) **Razón de flujos/alturas** : esto se basa en el supuesto que dos lechos porosos del mismo mineral, pero de diferentes tamaños, tienen la misma respuesta, si el líquido lixivante tiene el mismo tiempo de residencia en ambos casos, esto es:

$$\tau = \frac{V_h}{Q} = \frac{\epsilon AL}{fA} \quad (1)$$

donde: V_h es el volumen de huecos activos en el reactor (L^3), Q es el caudal de solución lixivante (L^3/t), ϵ es el factor de huecos (%), L es la altura del lecho (L), f es el flujo específico (L^3/tL^2) y A es el área de riego (L^2).

Para que dos pilas del mismo material tengan la misma respuesta se debe cumplir:

$$\frac{L_1}{f_1} = \frac{L_2}{f_2} \quad (2)$$

Este método supone además, que el comportamiento hidrodinámico de los dos lechos es el mismo, lo que en la práctica no se cumple, produciendo desviaciones no despreciables en la respuesta metalúrgica esperada. Otro inconveniente de este método radica en el hecho de no considerar un flujo específico crítico, siendo necesario estudiar esta variable y la respuesta metalúrgica a diferentes tamaños.

b) **Razón de Lixiviación** : esto se basa en el supuesto que dos lechos porosos del mismo mineral, pero de diferentes tamaños, tienen la misma respuesta si la razón entre el líquido lixivante y la masa mineral se mantiene constante, esto es:

$$RL_1 = RL_2 \quad (3)$$

donde RL es la razón de lixiviación. Expresando la razón de lixiviación en función de flujos,

tiempo de lixiviación y alturas; se obtiene:

$$\frac{f_1 t_1}{L_1} = \frac{f_2 t_2}{L_2} \quad (4)$$

donde f es el flujo específico (L^3/tL^2), t es el tiempo de lixiviación (t), L es la altura del lecho (L). Si se despeja t_2 , resulta:

$$t_2 = \frac{f_1 t_1 L_2}{L_1 f_2} \quad (5)$$

Es decir, para obtener la misma extracción en el reactor dos, se debe regar durante el tiempo t_2 .

Este criterio en la práctica entrega resultados bastante mejores que el criterio anterior, sin embargo, también supone que el comportamiento hidrodinámico es el mismo en ambos casos, obteniéndose con esto desviaciones de los resultados esperados.

c) Modelos Matemáticos : este criterio se basa en la integración de un modelo fenomenológico con la curva de distribución de tiempos de residencia, que permite predecir el comportamiento metalúrgico a nivel industrial del lecho mineral. Por ejemplo, si se considera un modelo cinético, desarrollado para una partícula, bajo el supuesto que en la etapa de lixiviación no hay reacción química, se obtiene la siguiente función:

$$X(r,t) = 100 \left(1 - \left(\operatorname{erf} \left[\frac{3}{4} \frac{r}{Dt} \right] \right)^{3/4} \right) \quad (6)$$

donde: $x(r,t)$ es la extracción de una partícula (%), r corresponde al radio de la partícula sin reaccionar (L), D es el coeficiente de difusión (L^2/t).

Si se considera un escurrimiento de flujo Pistón perfecto en el lecho, cuya representación matemática es:

$$E(t) = \frac{n^n (t/\tau)^{n-1} e^{-n t/\tau}}{\tau \Gamma(n)} \quad (7)$$

Luego la extracción industrial se puede calcular de la siguiente forma:

$$x_{ind}(r,t) = \int_0^m E(t)x(r,t)dt \quad (8)$$

Este criterio permite predecir con gran precisión la extracción industrial, si se conoce la DTR correspondiente al lecho en estudio. La dificultad de aplicar este criterio radica en el hecho de encontrar una función matemática adecuada para predecir el comportamiento hidrodinámico del lecho, que en la práctica se aproxima mejor a un modelo de flujo pistón con difusión axial, que resulta ser mucho más compleja que la analizada como ejemplo.

En este trabajo se utilizó el criterio correspondiente a la razón flujo/altura.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental se dividió en dos etapas: etapa I: estudio de aglomeración y curado, y etapa II: estudio de lixiviación en películas delgadas.

6.1.- Etapa I: Estudio de Aglomeración y Curado

El objetivo de esta etapa fue determinar las mejores condiciones de aglomeración y curado para la etapa de lixiviación, determinando parámetros tales como % de humedad, dosificación de curado y granulometría. Para lograr este objetivo se estudiaron estas variables en los niveles que se indican en la Tabla I, realizando todas las combinaciones posibles con estos niveles (27 pruebas). Para determinar el rango experimental de las granulometrías, se recurrió a antecedentes de tipo operacionales de diferentes plantas que actualmente operan con este sistema, las granulometrías ensayadas fueron: 100%-3/4" -100%-1/2" y 100%-1/4". Para la determinación de los niveles de dosificación ácida, se tomó como referencia la razón estequiométrica entre el ácido sulfúrico y el cobre de la reacción química de la disolución de la Malaquita y se estudió un 25%, 50% y 75% sobre el valor estequiométrico. Para la selección del rango de experimentación de la humedad de curado, se tomó como referencia la humedad de saturación y se estudió un 80%, 90% y 100% de este valor.

Como se mencionó anteriormente, la aglomeración y curado debe satisfacer 2 aspectos: uno físico y uno químico; en base a esto se midió, en forma cualitativa, la consistencia física de los aglomerados y, en forma cuantitativa, el grado de sulfatación de cobre en función del tiempo de curado, respectivamente.

Tabla I.- Niveles de las variables a estudiar.

VARIABLES	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
GRANULOMETRIA	100%-3/4"	100%-1/2"	100%-1/4"
HUMEDAD DE AGLOMERACION	$H_s^{(1)}$	0.9 H_s	0.8 H_s
DOSIFICACION ACIDA	1.75 $D_E^{(2)}$	1.5 D_E	1.75 D_E

⁽¹⁾ H_s : Humedad de saturación. ⁽²⁾ D_E : Dosificación ácida

Las sulfataciones máximas en cada experimento se logran alrededor de las 10 horas de curado, sin embargo, a este tiempo no se logra aún consistencia física de los aglomerados, debido a que el sistema tiene exceso de agua. Las sulfataciones logradas en este experimento fluctuaron entre 27.79% y 45.42% para una granulometría de 100%-3/4", entre 30.70% y 48.83% para 100%-1/2" y entre 44.12 y 58.20% de sulfatación para 100%-1/4", para distintas humedades y dosificaciones ácidas y a un tiempo de curado de 48 horas. Al analizar la información obtenida, quedó en evidencia la fuerte influencia en el aspecto químico que ejerce la granulometría, sin embargo, no se observó diferencias notorias desde el punto de vista físico. Esto hace pensar que la influencia de la granulometría en la aglomeración y curado es netamente química.

En base al análisis de resultados se pudo también constatar que las variables humedad y dosificación, ejercen un efecto conjunto sobre las condiciones físicas de los aglomerados y sobre el grado de sulfatación alcanzado. Se observó que la humedad de aglomeración influye en forma más notoria en el aspecto químico que la dosificación ácida, esto está relacionado con la cantidad de agua en el sistema, pues es el medio conductor para el transporte del agente lixivante hacia el centro de reacción. El efecto químico de la dosificación ácida disminuye cuando aumenta la humedad de curado. En cuanto al aspecto físico, se puede decir que cuando se utilizan humedades más altas se requieren tiempos de curado más prolongados, para que los aglomerados alcancen la consistencia óptima, pero utilizando dosificaciones ácidas más elevadas este tiempo se puede acortar, esto se debe a que las reacciones de tipo exotérmicas evaporan cantidades importantes de agua. Cabe señalar que cuando se utilizan bajas humedades

y altas dosificaciones, a tiempos de curado de 36 horas, además de obtener bajas sulfataciones, la consistencia de los aglomerados simplemente desaparece, esto se debe a que no hay agua en el sistema, desapareciendo los puentes líquidos que permite la unión de las partículas finas a las gruesas y desaparece también el medio de transporte de los iones reactantes y productos deteniéndose la reacción. Los mejores resultados se obtuvieron bajo las siguientes condiciones: dosificación ácido sulfúrico 2.30 kg ac/kg Cu (50 % exceso), humedad de aglomeración 12.68 % (humedad de saturación), granulometría 100%-1/4 ". Como ejemplo en la figura 5 se muestra la cinética de sulfatación para la mejor condición encontrada.

6.2.- Estudio de Lixiviación en Películas Delgadas

El objetivo en esta etapa fue estudiar la influencia del flujo específico y de la concentración inicial de ácido sulfúrico en la lixiviación en películas delgadas. Cabe señalar que en la etapa anterior se determinó la granulometría, la dosificación ácida y la humedad de aglomeración que entregaron mejores resultados en el curado. Se estimó que para el sistema en estudio no es necesaria la presencia de agentes oxidantes, debido que la mineralogía predominante es Malaquita, que en forma natural entrega potenciales sobre los 400 mv, además no se estudió la altura del lecho como variable, pues se pretende escalar los mejores resultados obtenidos en el experimento a una altura de lecho superior. En este caso las experiencias se realizaron a una altura fija de 1 m.

Los niveles utilizados para el estudio de lixiviación pelicular se muestran en la Tabla II. Como respuesta se midieron la extracción, el pH, el potencial, la concentración de ión cúprico, el consumo de ácido, todos en función del tiempo. Además con las condiciones que entregaron las mejores respuestas, se llevaron a cabo pruebas a distintas leyes de cabeza y se midió la distribución de tiempos de residencia.

En la Tabla III se muestran resultados obtenidos tras 39 días de operación. Inicialmente la lixiviación está controlada por fenómenos de transferencia iónica, desde la solución retenida en los aglomerados hacia la solución que desliza a una cierta velocidad por el lecho; posteriormente el control se debe a fenómenos de transferencia iónica y reacción química, para finalizar con un control netamente químico de disolución.

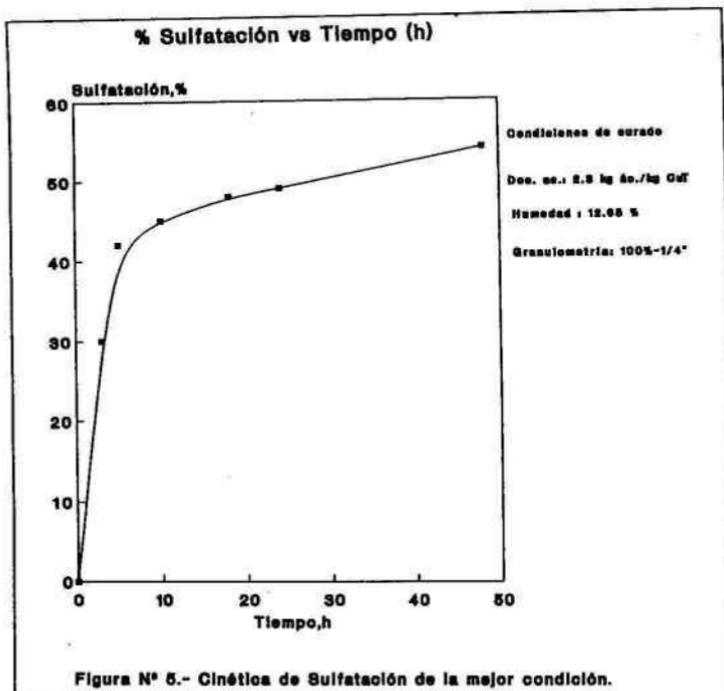


Tabla II.- Niveles de las variables a estudiar.

VARIABLES	NIVEL 1	NIVEL 2
FLUJO ESPECIFICO	5 l/(hm ²)	10 l/(hm ²)
CONCENTRACION DE ACIDO	5 g/l	10 g/l

Tabla III.- Resumen de Resultados

Prueba	[Cu ⁺⁺] _s	ext.	consumo	pH	Eh
	gpl	%	kg ac/kg Cu		mv
1	7.09	60.63	4.53	2.9	460
2	4.26	73.35	4.43	2.8	470
3	8.25	72.23	4.51	2.8	460
4	5.03	85.18	4.79	2.7	475

La prueba que entregó los mejores resultados corresponde a las siguientes condiciones: concentración ácida 10 g/l, flujo específico 10 l/(hm²). Se efectuó una medición de la distribución de tiempos de residencia, que entregó los siguientes resultados: tiempo de residencia 21 hrs, número de Peclet 3.76, D_{axial} 0.0026 m²/h.

En base al valor del número de Peclet y el coeficiente de difusión axial (D_{axial}), se puede concluir que el sistema responde a un modelo de escurrimiento pistón con difusión axial.

De acuerdo a estos resultados, las condiciones experimentales que entregan los mejores resultados son: ley de cabeza 2.02 % Cu, dosificación ácido sulfúrico 2.30 kg ac/kg Cu, humedad de aglomeración 12.68 %, granulometría 100%-1/4", % de extracción 86.92% de cobre, tiempo de lixiviación 22 días, consumo de ácido 5 kg ac/kg Cu_{dis}, altura 1 m, concentración ácida 10 g/l, flujo específico 10 l/(hm²).

Utilizando como criterio la razón flujos/altura, para obtener la misma respuesta para un lecho de 2 m de altura se debe trabajar a un flujo específico de 20 l/(hm²), manteniendo constante todo el resto de las condiciones.

PRE-EVALUACION ECONOMICA

Con los resultados escalados a reactores 2 metros de altura, se proyectaron 3 plantas, basados en el esquema de operación Lixiviación-Cementación y a diferentes tiempos de lixiviación. A cada planta proyectada se le estimó la inversión requerida, los costos operacionales, se calculó el VAN(15%). La vida útil del proyecto se calculó sobre la base de contar con reservas demostradas de 1.200.000 ton de mineral y considerando una planta que procesa 1200 tpd, con esto la vida útil resulta ser de 5 años. En la tabla IV se puede ver el resumen de estos resultados:

Tabla IV.- Resultados de Evaluación Económica

Cap.	Vida Útil	Tiempo de lix.	Inversión	VAN(15%)
tpd	años	Días	US\$ (1990)	US\$
1200	5	8	3.156.355	1.868.615
1200	5	15	3.530.324	3.237.614
1200	5	21	3.908.231	4.258.598

Precio del cobre: 0.90 US\$/lb. Precio del Acido sulfúrico: 100 US\$/TM_{ácido}

CONCLUSIONES

1. Los minerales de cobre oxidados estudiados no presentan problemas técnicos para ser lixiviados.
2. Se verificó que en la aglomeración y curado, el agua es un parámetro crítico, ya que influye fuertemente en el aspecto químico y en el aspecto físico.
3. La humedad de aglomeración y la dosificación ácida definen la cantidad de agua en el sistema, por lo tanto son variables de doble influencia.
4. La granulometría ejerce influencia netamente química.
5. El tiempo de curado se determina por aspectos físicos, pues el máximo grado de sulfatación que se puede alcanzar en tiempos cortos.
6. Los mejores resultados obtenidos a nivel laboratorio, se lograron bajo las siguientes condiciones: ley de cabeza 2.02 % Cu_s, dosificación ácido sulfúrico 2.30 kg ac/kg Cu, humedad de aglomeración 12.68 %, granulometría 100%-1/4", % de extracción 86.92% de cobre, tiempo de lixiviación 22 días, consumo de ácido 5 kg ac/kg Cu_{dis}, altura 1 m, concentración ácida 10 g/l, flujo específico 10 l/(hm²).
7. El comportamiento del reactor corresponde a un modelo de escurrimiento pistón con difusión axial, donde se obtuvieron los siguientes resultados: tiempo de residencia 21 hrs, número de Peclet 3.76, D_{axial} 0.0026 m²/h.

8. La pre-evaluación económica, indica que es rentable la instalación de una planta de lixiviación- cementación para procesar estos minerales.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Dr. Guillermo Ugarte. "Metalurgia Extractiva del cobre", módulo 4, Hidrometalurgia, CIMM, 1984.
- 2.- Esteban Domic. "Proceso de Lixiviación T.L.". Revista Minerales, vol. 38, N° 162.
- 3.- Dr. Marco Solar. "Cinética Metalúrgica, I Parte", Universidad de Santiago de Chile, 1980.
- 4.- Juan C. Villarroel. "Lixiviación de Minerales de cobre oxidados del yacimiento satelítico Quebrada M, El Salvador", Tesis de Titulación, Universidad de Santiago de Chile, 1984.
- 5.- Alonso Arenas. "Hidrometalurgia del cobre", Universidad del Norte, 1985.
- 6.- Jaime Rauld, Raúl Montealegre, Pablo Schmidt y Esteban Domic. "Lixiviación T.L.: hidrodinámica del flujo de soluciones a través de lechos porosos no saturados". Revista Minerales N° 174, vol. 41, pág. 31.
- 7.- Jaime Rauld, Raúl Montealegre, Pablo Schmidt y Esteban Domic. "Lixiviación T.L.: relaciones de escalamiento obtenidos a través de un modelo". Revista Minerales N° 174, vol. 41, pág. 41.
- 8.- Jaime Simpson. "Estudio de lixiviación de minerales oxidados de cobre del yacimiento Pirquitas de la Cia. Minera Cerro Negro S.A.", Tesis de Titulación para optar al Título de Ingeniero civil metalurgista, Universidad de Santiago de Chile, 1992.