

Aglomeración y lixiviación en lecho fijo de colas de proceso de flotación de cobre a escala de laboratorio: efecto del contenido de humedad en la aglomeración^(*)

C.A. Herrera*, J.F. Muñoz* y J.M. Casas**

- Resumen** Se evalúa el efecto que tiene el contenido de humedad de las colas (relaves), generadas en el proceso de flotación de minerales de cobre, en la fabricación de un material aglomerado apropiado para el proceso de lixiviación en pilas. Se cuantifica cómo varía la eficiencia de la lixiviación respecto de la humedad con que se fabrican los aglomerados, mediante la realización de pruebas de lixiviación en lecho fijo a escala de laboratorio, para distintas condiciones de humedad. Se determinaron las principales variables hidrometalúrgicas y las propiedades hidrodinámicas e hidrodispersivas de los aglomerados, y se observó que las muestras aglomeradas con un contenido de humedad cercano al 10 % presentaron la mayor recuperación de cobre, en el menor tiempo y con las mejores propiedades hidrodinámicas para el flujo de la solución ácida. Se concluye que las condiciones de humedad tienen un importante efecto en la eficacia de la lixiviación por lo que se recomienda un mayor control de ella en los relaves durante el proceso de aglomeración.
- Palabras clave** Lixiviación ácida. Lamas. Colas del proceso de flotación del cobre. Relave de cobre. Aglomeración. Hidrometalurgia.

Agglomeration and leaching of copper tailings in a fixed bed for laboratory scale: effect of the moisture in the agglomeration

- Abstract** In this work the effect of moisture on the agglomeration of copper tailing material which could be processed by leaching in heaps in order to recover valuable metals, is evaluated. The efficiency of leaching performed in columns at laboratory scale was quantified as a function of moisture content in prepared agglomerates. Main hydrometallurgical variables, hydrodynamics, and hydrodispersive properties of agglomerates were obtained. Results indicate that samples agglomerated with a moisture close to 10 % exhibited the best copper recovery in the shortest time and presented the highest ore bed hydrodynamic properties for the flux of acid solution. The main conclusion is that moisture content is the key process variable, which shows an important effect on the efficiency of both the agglomeration and the leaching stages. Therefore, a careful control of this variable must be taking into account during the hydrometallurgical processing of copper tailings.
- Keywords** Acid leaching. Copper tailing. Agglomeration. Hydrometallurgy.

1. INTRODUCCIÓN

Los minerales de cobre sulfurado se procesan, mayoritariamente, a través de la ruta pirometalúrgica de concentración-fusión-conversión-electrorefinado. El proceso de concentración considera 3 a 4 etapas de trituración de un material, que tiene una ley media entre 0,7 y 1,2 %, conocido como ROM (*run of*

the mine) y su tamaño se reduce, con trituración o molienda, hasta, aproximadamente, 1/4" (6,35 mm). Posteriormente, el material se muele hasta tamaños inferiores a 75 mm para lograr la liberación de las especies sulfuradas y facilitar, así, el proceso de separación y concentración del cobre por flotación. Las partículas que no flotan son descartadas del proceso, transportadas como pulpa a través de

(*) Trabajo recibido el día 23 de agosto 2002 y aceptado en su forma final el día 13 de mayo de 2003.

(*) Dpto. de Ingeniería Hidráulica de y Ambiental. Pontificia Universidad Católica de Chile. Avda. Vicuña Mackenna 4860, 6904411, Santiago, Chile. E-mail: chc@puc.cl; jfmunoz@ing.puc.cl

(**) Dpto. de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas. Universidad de Chile. Avda. Beauchef 861. Chile. SGS- Lakefield Research. E-mail: jcasas@lakefield.com

tuberías, o canales y acopiadas en una escombrera. El concentrado de cobre generado contiene entre 28 y 35 % de cobre^[1], secándose y, posteriormente, procesándose vía fundición y electrorefinación, para obtener el cobre, en forma de cátodos metálicos con una pureza del 99,999 %^[2].

En la industria del cobre, sólo una pequeña fracción del material extraído de mina (aproximadamente entre 2 y 5 %, como fase mineral) se utiliza para recuperar en forma metalúrgica el contenido de metales con valor económico. El resto del material debe descartarse del proceso y acopiarse en las cercanías de la explotación minera. Generalmente, por cada tonelada de mineral fresco procesado en una planta de concentración se generan alrededor de 0,98 toneladas de material residual, conocido como colas del proceso de flotación o relave^[3].

Las escombreras de relave constituyen una importante fuente de metales, potencialmente, extraíbles. La lixiviación, como técnica de extracción de metales se ha desarrollado, principalmente, en pilas de minerales de oro y cobre, estudiando básicamente los parámetros hidrodispersivos del material^[4] y los fenómenos que determinan la cinética de la extracción del mineral^[5 y 6]. Sin embargo, existe escasa información sobre los procesos químicos y físicos involucrados en la lixiviación ácida y lixiviación natural de relave de minerales de cobre^[7-9].

El relave de cobre es un material proveniente de procesos de flotación y molienda, de características granulométricas muy finas y con una conductividad hidráulica natural muy baja, lo que dificulta la circulación del ácido y de las soluciones lixiviadas^[3 y 10]. Entre las principales propiedades de los lechos y materiales de relave de cobre no aglomerados están: densidad, entre 1.500 y 2.000 kg/m³; densidad de las partículas, entre 2.600 y 2.900 kg/m³; porosidad, entre 43 y 53 % v/v; permeabilidad, entre 0,1 y 3×10^{-13} m²; y humedad, entre 15 y 25 % p/p. Estos materiales, tienen leyes de cobre que fluctúan entre 0,05 y 0,3 % p/p, del cual se logra extraer, mediante lixiviación ácida, entre un 30 % y un 80 %, con un consumo de ácido que fluctúa entre 15 y 50 kg/t de material^[3 y 7].

La lixiviación, mediante pozos de inyección de solución ácida y pozos de bombeo de solución enriquecida en cobre, denominada lixiviación *in-situ*, se ha estudiado experimental y numéricamente^[11], pero su implementación resulta muy poco atractiva debido a los altos costes de construcción involucrados. Una alternativa de explotación de relaves

es la utilización de pilas de lixiviación. Las pilas de lixiviación de relave presentan problemas asociados a su baja permeabilidad, que se producen, principalmente, por una segregación de las partículas finas durante la construcción de la pila, y se incrementan, durante la lixiviación, por una migración vertical de partículas finas a través del flujo de solución dentro de la pila. Para mejorar las condiciones de flujo en las pilas, se ha propuesto modificar las características del material mediante su aglomeración y posterior lixiviación.

El proceso de aglomeración consiste en la unión de dos o más partículas, en un sistema agitado (tambor, disco, etc.), mediante la adición de un líquido, usualmente llamado agente aglomerante (*Binder*), que permite la unión entre ellas para formar partículas de mayor tamaño llamadas aglomerados^[12 y 13]. Simultáneamente, el mineral es atacado químicamente con ácido sulfúrico concentrado, produciendo la disolución de una gran parte del cobre superficial contenido en las partículas, proceso que se denomina curado del material. El efecto químico producido por la aglomeración da lugar a un material particulado homogéneo, cohesionado y con una alta permeabilidad que permite un flujo parejo a través de él. La lixiviación es la etapa del proceso de extracción que permite separar el cobre de los minerales que lo contienen, utilizando la propiedad que tienen los minerales oxidados de ser fácilmente atacables por los ácidos. En la lixiviación de minerales de cobre se utiliza una solución diluida de ácido sulfúrico (H₂SO₄) en agua, para lograr la solubilización del cobre desde la matriz de mineral. De esta manera, algunos minerales de baja ley y relaves, históricamente considerados no rentables, pueden producir beneficios mediante un pretratamiento de aglomeración y una posterior lixiviación en pilas^[13].

Recientemente, se han realizado estudios sobre aplicación de este método en relaves de cobre, como una alternativa promisoriosa, para explotar numerosas escombreras^[14].

Debido a la heterogeneidad de las condiciones *in-situ* del relave en las escombreras, el aglomerado de relave tendrá diferentes propiedades, dependiendo de la ubicación en la escombrera del material base para su fabricación. El contenido de humedad de relave varía en los diferentes sectores de la escombrera, debido a que el proceso de secado natural no es homogéneo, lo que repercute en la obtención de un material óptimo para el proceso de lixiviación y en la eficiencia del proceso de extracción de cobre.

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto que tienen las diferentes condiciones iniciales de humedad del aglomerado de relave, en sus variables hidrometalúrgicas e hidrodispersivas, frente a la lixiviación en un reactor de lecho fijo del aglomerado de relave de cobre. Para ello, se diseñó un tambor aglomerador que permite fabricar aglomerados de relave de cobre bajo diferentes condiciones de humedad. Una vez aglomerados, se realizaron experiencias de lixiviación en reactores de lecho fijo en (columnas) a escala de laboratorio, en condiciones de flujo no saturado, y se determinaron la curva de retención, la conductividad hidráulica saturada y algunos parámetros hidrodispersivos para las diferentes muestras, mediante el ajuste de modelos de flujo y transporte de solutos.

2. MODELO DE FLUJO Y TRANSPORTE DE SOLUTOS

2.1. Ecuación de Richards

La ecuación que describe el movimiento unidimensional de una solución que escurre a través de un medio poroso no saturado, puede expresarse según la ecuación de Richards (1931)^[15], como:

$$Ca(\theta) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

donde, θ es el contenido de humedad volumétrico [m^3/m^3]. El contenido de humedad representa el porcentaje de agua contenido en un suelo y puede expresarse como % en peso o % en volumen. Como porcentaje en peso, se designa por ω [kg/kg] y se define como la relación entre el peso del agua contenida en el suelo (kg) y el peso del suelo seco (kg). Como porcentaje en volumen, se designa por θ (m^3/m^3) y se define como la relación entre el volumen de agua contenido en el suelo (m^3) y el volumen total de la muestra de suelo (m^3); h , es la carga de altura de agua (m) y depende del contenido de humedad del medio. El término $Ca = (\partial\theta/\partial h)$ (1/m), corresponde a la capacidad capilar definida como la variación que experimenta la humedad con respecto a cambios en la succión; $k(\theta)$, es la conductividad hidráulica no saturada (m/s); z , es la distancia vertical medida desde un nivel de referencia hacia abajo (m). Los términos $h(\theta)$ y $k(\theta)$ se conocen como características hidrodinámicas del suelo y son representativas de cada tipo de suelo^[16 y 17]. La función $h(\theta)$ se conoce como curva

de retención y representa la succión con que una cierta cantidad de agua es retenida en los poros del suelo. La conductividad hidráulica es la propiedad que refleja la resistencia al flujo de un líquido, a través del suelo.

Existen muchas expresiones empíricas que describen estas características, cuyos parámetros son ajustados a datos experimentales. La expresión utilizada para ajustar los valores de la curva de retención fue la desarrollada por van Genuchten (1980)^[18], que se escribe como:

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_R}{\left[1 + (\alpha h)^n \right]^m} + \theta_R \quad (2)$$

donde, θ_s (m^3/m^3) es el contenido de humedad de saturación, θ_R (m^3/m^3) es el contenido de humedad residual, α es el inverso de la presión de burbujeo, n y m son parámetros de ajuste. Se consideró la restricción $m=1-1/n$, que es válida para una gran cantidad de suelos^[19].

La curva de conductividad hidráulica no saturada del aglomerado se estimó mediante el modelo analítico de Mualem (1976)^[20], según la expresión propuesta por Brooks y Corey (1964)^[21]:

$$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_R}{\theta_s - \theta_R} \right)^{l+2+\frac{2}{\lambda}} \quad (3)$$

donde, k_s (m/s) es la conductividad hidráulica saturada, λ es el índice de distribución de tamaño de poro, definido como la pendiente negativa de la curva del grado de saturación frente a la carga de presión. El parámetro l , se sugiere igual a 0,5 para el modelo de Mualem^[22].

Las características hidrodinámicas se estimaron mediante la minimización del cuadrado de los residuos entre los valores observados y estimados, utilizando para ello el programa RETC^[23].

2.2. Ecuación de transporte de soluto

El fenómeno de transporte de un trazador inerte, en un medio poroso en condiciones de flujo no saturado, se puede modelar utilizando el concepto de porosidad dual. Este concepto es apropiado para modelar el transporte en medios agregados o fracturados y considera que, el agua presente en el suelo se encuentra dividida en una fracción móvil (flujo) y en una fracción inmóvil (estancada). En esta aproximación se supone que, la distribución

de velocidad intersticial es bimodal, es decir, el transporte convectivo-dispersivo está confinado solo a la región de flujo rápido, que ocurre en los espacios vacíos presentes entre aglomerados mientras que el transporte difusivo ocurre en la región de flujo lento, presente al interior de cada aglomerado. Para este tipo de modelo se considera que el intercambio de soluto entre las dos fases líquidas es un proceso de primer orden^[23 y 24].

Las ecuaciones de transporte para un soluto, se pueden escribir como^[25]:

$$(\theta_m + f\rho K_d) \frac{\partial c_m}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} - J_w \frac{\partial c_m}{\partial z} - \beta(c_m - c_{im}) - (\theta_m \mu_{l,m} + f\rho K_d \mu_{s,m}) c_m + \theta_m \gamma_{l,m}(z) + f\rho \gamma_{s,m}(z) \quad (4)$$

$$(\theta_{im} + (1-f)\rho K_d) \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \beta(c_m - c_{im}) - (\theta_{im} \mu_{l,im} + (1-f)\rho K_d \mu_{s,im}) c_{im} + \theta_{im} \gamma_{l,im}(z) + (1+f)\rho \gamma_{s,im}(z) \quad (5)$$

considerando:

$$\theta = \theta_m + \theta_{im} \quad (6)$$

Los subíndices m y im representan las regiones de líquido móvil e inmóvil respectivamente; $J_w = v_m \theta_m$, es la densidad de flujo volumétrico (m/s); K_d (m³/kg), es el coeficiente de equilibrio o constante de distribución; f , representa los sitios de adsorción que están en equilibrio con la fase líquida móvil; ρ , es la densidad aparente del medio (kg/m³); μ_l y μ_s , son los coeficientes de decaimiento de primer orden para la degradación de soluto en la fase líquida y adsorbida (1/s); y γ_l (kg/m³/s), γ_s (kg/kg/s), son los términos de producción de orden cero de la fase líquida y adsorbida respectivamente; β es el coeficiente de transferencia de masa de primer orden (1/s), que determina la tasa de intercambio de soluto entre las regiones de líquido móvil e inmóvil.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objeto de evaluar el efecto de diferentes condiciones de humedad del relave en el proceso de aglomeración y en la eficiencia del proceso de lixiviación, se diseñó una experiencia que incluye la variación de la cantidad de agua en la fabricación de aglomerados de relave de cobre, considerando constantes la cantidad de ácido en la aglomeración, el tiempo de curado, la tasa de riego y la concentración de ácido en la solución lixivante.

La secuencia experimental utilizada fue la siguiente:

- secado del relave sin aglomerar,
- aglomeración de relave con adición de ácido sulfúrico para el curado (17 kg/t de relave seco) y agua, según el contenido de humedad final deseado,
- curado del material por medio de un reposo de 5 d,
- determinación de la curva $h(\theta)$ y de la conductividad hidráulica saturada, para cada material,
- experiencias de lixiviación ácida,
- experiencias de trazador a 3 materiales fabricados bajo las mismas condiciones que los utilizados en las experiencias de lixiviación en columnas.

Para estudiar el efecto del contenido de humedad en la aglomeración se diseñó una serie de 8 experimentos, en los cuales se varió la cantidad de agua agregada en el tambor aglomerador, de manera que se lograra un material con diferentes humedades finales, las cuales se encuentran especificadas en la tabla I.

3.1. Diseño del tambor aglomerador

Para controlar las condiciones de humedad del relave aglomerado, se diseñó un tambor aglomerador a escala de laboratorio. Para su diseño, se consideraron algunos criterios de escalamiento^[26] respecto a un tambor aglomerador de escala industrial y un volumen de producto final de 4.000 cm³, correspondiente al volumen aproximado de las columnas (20 cm de largo × 15 cm de diámetro) que se utilizaron en los ensayos de lixiviación ácida.

Los criterios de paso de escala utilizados son los siguientes^[26]:

- tiempo de giro constante, que es equivalente a mantener el número de Froude (DN^2/g)

Tabla I. Contenidos de humedad en la aglomeración de muestras de aglomerados de relave de cobre (ω , contenido de humedad en peso)

Table I. Moisture in the agglomeration of samples of agglomerates of copper tailing (ω , moisture in weight)

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
ω (%)	5	8	10	13	15	18	21	23

constante (semejanza dinámica). De esta manera, la relación de similitud queda:

$$N_2 = N_1 \frac{D_1^{0,5}}{D_2^{0,5}} \quad (7)$$

donde, N corresponde a la velocidad angular en min^{-1} y, D_i ($i=1,2$), es el diámetro del tambor aglomerador correspondiente.

- distancia de rodamiento constante, que corresponde al desplazamiento angular total del mineral dentro del tambor aglomerador durante el tiempo de residencia^[27]. Luego se debe cumplir que:

$$t_1 N_1 D_1 = t_2 N_2 D_2 \quad (8)$$

donde t_i ($i=1,2$) es el tiempo de residencia del relave en el tambor aglomerador.

Las dimensiones y variables de operación del tambor aglomerador son: 0,45 m de diámetro, 0,25 m de largo, 15 min^{-1} de velocidad angular y 1,8 min de tiempo de residencia.

El tambor cuenta con un orificio lateral que permite la entrada de agua y ácido, los cuales son introducidos mediante una bomba manual.

3.2. Caracterización del relave

El material utilizado en la aglomeración corresponde a un relave de cobre, proveniente de la escombrera Barahona, de la División el Teniente de CODELCO, Chile. Su análisis químico presentó una ley de 0,13 % de cobre total y alrededor de un 0,08 % de cobre soluble, lo que indica que la mayor parte del cobre puede extraerse por lixiviación. Además, presentó 3,25 % en hierro total y 0,21 % de azufre. La composición mineralógica se determinó mediante microscopía óptica y difracción de rayos X. El análisis químico se realizó con la muestra de relave pulverizada a 100 % - 150#Ty (104 μ), mediante digestión utilizando un ataque de cuatro ácidos y lectura de Fe y Cu total por absorción atómica. El Cu soluble se determinó mediante lixiviación en ácido sulfúrico 1N por una hora y lectura del Cu disuelto por absorción atómica. El contenido de S se determinó por pirólisis en horno LECO a 550 °C y análisis del gas generado por espectroscopia infrarroja. En el análisis microscópico para cuantificar los minerales no metálicos y óxidos se utilizaron secciones delgadas,

que se observaron directamente bajo un microscopio óptico previa inmersión en líquido de índice de refracción 1,54. En el análisis de minerales opacos se utilizaron briquetas. Se empleó el método estadístico de conteo de puntos, utilizando un método de integración con una red métrica de 400 puntos adosada a un ocular de 12,5 x del microscopio óptico, contabilizados usando el peso específico de cada uno de ellos, y luego se extrapoló utilizando la masa de la ganga hasta alcanzar los valores determinados por el análisis químico. En las tablas II y III se presenta la composición química de los minerales opacos y de la ganga, respectivamente.

Tabla II. Composición mineralógica de los minerales opacos del relave

Table II. Mineralogical composition of the opaque minerals of tailings

Mineral	% en peso
Calcopirita	0,14
Calcosina	0,01
Covelina	0,01
Bornita	0,01
Óxidos de cobre	0,18
Pirita	0,28
Molibdenita	0,01
Magnetita	0,17
Hematita	0,02
Limonita	0,07
Rutilo	0,03
Ganga	> 99

Tabla III. Principales componentes de la ganga encontrados en el relave de cobre de la Escombrera Barahona (Codelco división el Teniente)

Table III. Principal gangue components found in the Barahona tailings pond

Mineral	Peso (% del total del mineral)	Mineral	Peso (% del total del mineral)
Cuarzo	40,9	Turmalina	4,74
Biotita	17,0	Arcilla	3,47
Feldespatos	10,1	Cloruro	2,83
Plagioclasa	6,83	Jarosita	0,26
Alunita	6,43	Calcita	0,24
Sericita	5,19	Anhidrita	0,10

La granulometría del relave sin aglomerar se muestra en la figura 2, donde se observa un valor de d_{50} igual a 0,06 mm. El peso específico relativo de los sólidos, definido como el cociente entre el peso específico de las partículas sólidas ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-2}$) y el peso específico del agua ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-2}$), se determinó experimentalmente mediante el método del picnómetro de gas^[28], obteniendo un valor de $G = 2,82$ ^[29].

3.3. Experiencias de lixiviación

La figura 1 muestra un esquema de la instalación experimental de las columnas de lixiviación. En el extremo inferior de las columnas se instalaron una placa porosa de teflón y un filtro de membrana, para evitar pérdidas de material. La solución de ácido sulfúrico diluido se introdujo por el extremo superior de las columnas mediante una bomba peristáltica, la cual proporcionó un caudal constante de 1,5 ml/min (equivalente a una tasa de riego de 5 l/h/m²). Para evitar la acumulación de líquido en las columnas, se conectó a la salida de éstas, una cámara de vacío, marca Soil Measurement Systems, con una bomba modelo E79200-40 (marca Cole Parmer), para generar una succión constante a la salida, lo suficientemente baja como para no alterar el sistema, asegurando, así, condiciones de flujo no saturado en toda la columna.

La experiencia de lixiviación se realizó inyectando una solución ácida en la parte superior de cada columna, a una concentración de 25 g/l hasta que la concentración de cobre a la salida de la columna fue menor que 30 ppm. La experiencia se prolongó por un tiempo aproximado de 100 h. Se tomaron muestras de la solución enriquecida con cobre, cada determinados intervalos de tiempo. Las primeras 5 muestras se tomaron cada hora, considerando que la mayor cantidad de cobre se recupera en este período; luego, se tomaron muestras cada 2 h. A partir del tercer día, se comenzó a tomar muestras cada 6 h y, finalmente, el cuarto día de tomaron cada 8 h. A cada muestra de solución se le determinó la concentración de cobre, el consumo de ácido y el pH.

3.4. Experiencias de trazador

Para determinar los parámetros de las ecuaciones (4) y (5) se realizó una prueba de trazador. Esta prueba consiste en hacer pasar un soluto llamado trazador a través del lecho poroso cuya concentración fue medida a la salida del sistema. De esta

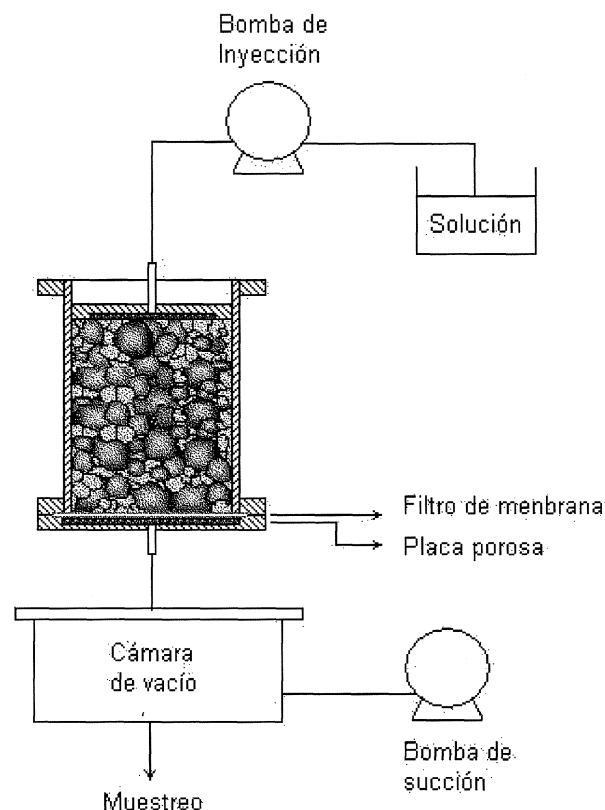


Figura 1. Esquema de la instalación experimental de las columnas para pruebas de lixiviación de aglomerado de relave de cobre.

Figure 1. Scheme of the experimental installation of the columns for leaching of agglomerate of copper tailings tests.

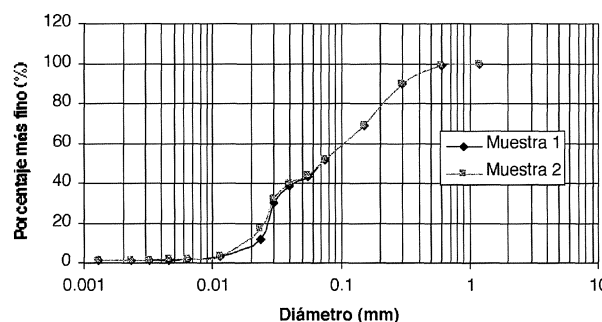


Figura 2. Ensayo de granulometría por tamizado y sedimentación para relave sin aglomerar.

Figure 2. Granulometry test by sieved and sedimentation of tailing without agglomerate.

manera, se puede determinar la curva de distribución de tiempos de residencia del soluto que corresponde a la curva de concentraciones de soluto observada a la salida del lecho poroso. En este trabajo, la prueba de trazador se realizó sólo a las muestras M1, M5 y M8, para obtener un rango de los parámetros hidrodispersivos. El trazador utilizado fue el Bromo-82, cuyas concentraciones fueron

medidas a la salida de las columnas mediante detectores de centelleo de NaI (TI) durante un tiempo aproximado de un día en condiciones de régimen estacionario, flujo no saturado y unidimensional. El Bromo-82 es un radioisótopo que emite radiación gamma y que posee una vida media de 36 h. Se puede suponer que se comporta como trazador ideal, es decir, no reacciona física ni químicamente con el medio y no está sujeto a adsorción. Luego se puede considerar que los parámetros K_d , μ_l , μ_s , γ_l y γ_s , de las ecuaciones (4) y (5), son iguales a cero.

Antes de inyectar el trazador, se estableció el régimen estacionario en las columnas y, posteriormente, se inyectó una solución inactiva de bromo con el objeto de eliminar cualquier interacción que pudiera tener el Br-82 con el medio poroso aglomerado. Considerando las dimensiones de la columna y las condiciones de flujo (1,5 ml/min de solución ácida de 25 g/l) se inyectó un pulso aproximado de 1 mCurie de Br-82 por columna. La duración de la prueba fue del orden de un día, donde finalmente se obtuvieron las curvas de distribución de tiempos de residencia. Los parámetros hidrodispersivos se obtuvieron mediante un ajuste de mínimos cuadrados a los datos observados, utilizando el programa CXTFIT [25] con el modelo de dos regiones, sin producción ni consumo de trazador.

Finalmente, se tomaron muestras de cada uno de los aglomerados de relave de cobre, que se utili-

zaron para determinar la curva de retención y la conductividad hidráulica saturada. La curva de retención se determinó utilizando una celda pesable de presión y la conductividad hidráulica saturada se obtuvo mediante un permeámetro de carga constante con tubo de Marriot^[30]. La información obtenida desde ambas pruebas experimentales se incorporó al programa de código inverso RETC^[19], para obtener los parámetros de las funciones hidráulicas antes mencionadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3, se presentan las muestras de relave aglomerado, fabricadas para este estudio. Se observa que, mientras mayor es el contenido de humedad en la aglomeración, mayor es el tamaño del material aglomerado, considerando constantes la velocidad y el tiempo de rotación del tambor aglomerador de laboratorio. De esta manera, se puede estudiar, en forma independiente, el efecto del contenido de humedad en las propiedades del aglomerado de relave de cobre. Esta relación directa, entre el tamaño del aglomerado de relave de cobre y el contenido de humedad en la aglomeración, es similar a la observada para arena fina por Newitt y Conway-Jones (1958). Por otra parte, se observa que la coloración se hace más oscura, a medida que se aumenta el contenido de humedad en la aglomeración.

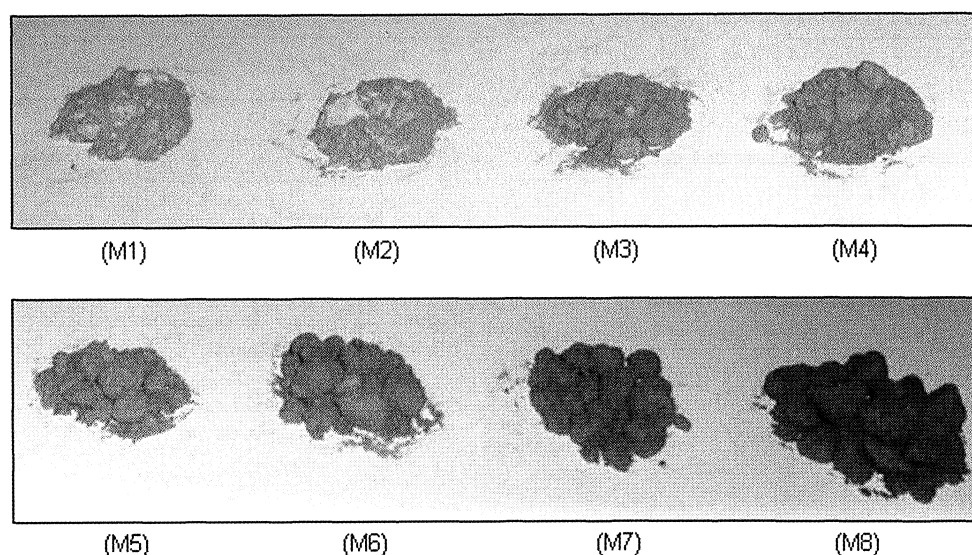


Figura 3. Relave aglomerado con diferentes cantidades de agua: (M1) aglomerado con un 5 % de contenido de humedad en peso; (M2) con 8 %; (M3) con 10 %; (M4) con 13 %; (M5) con 15 %; (M6) con 18 %; (M7) con 21 % y (M8) con 23 %.

Figure 3. Agglomerated tailing with different water content: (M1) agglomerate with a 5 % of moisture on weight; (M2) with 8 %; (M3) with 10 %; (M4) with 13 %; (M5) with 15 %; (M6) with 18 %; (M7) with 21 % and (M8) with 23 %.

Se presentaron algunos cambios físicos durante el desarrollo de las pruebas de lixiviación. El primer cambio observado en las muestras, después de la lixiviación, es el asentamiento del relave aglomerado en las columnas. Éste, se debe al aumento de peso y al escurrimiento al que se ven sometidas las muestras producto de la solución inyectada, la cual provoca una compactación del medio y un reacomodo de los aglomerados. La figura 4 muestra el porcentaje de asentamiento de las distintas muestras tras haber sido sometidas a la lixiviación en columnas. Se observa que la muestra M3 y la muestra M4 presentan el menor porcentaje de asentamiento.

4.1. Variables hidrometalúrgicas

Un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de lixiviación se realiza comparando las curvas de recuperación, las curvas de consumo de ácido y las curvas de pH, para distintos tiempos. Se utilizó un tiempo espacial adimensional, también conocido como número de volúmenes de poro, T , que relaciona el volumen total escurrido a un tiempo, t , con un volumen de poro.

$$T = \frac{\text{Volumen Total escurrido a un tiempo, } t}{\text{Un Volumen de poro}} = \frac{v\phi At}{AL\phi} = \frac{vt}{L} \quad (9)$$

donde, t es el tiempo real (s), v (m/s) es la velocidad intersticial, ϕ es la porosidad (m^3/m^3), A es la sección transversal del medio (m^2) y L es el largo de la columna (m). De esta manera, el número de volúmenes de poro que ha escurrido a través del medio para un tiempo determinado queda definido

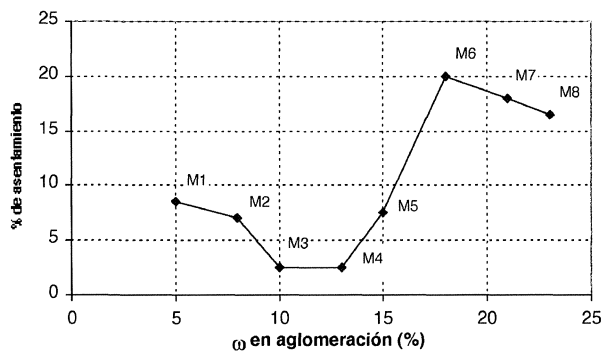


Figura 4. Porcentaje de asentamiento en la columna para muestras fabricadas con diferentes contenidos de humedad (ω corresponde al contenido de humedad en peso).

Figure 4. Percentage of settlement in the column for samples made with different moisture (ω , moisture in weight).

como el producto de la velocidad intersticial por el tiempo real, dividido por la longitud del lecho, es decir, el largo de la columna.

En la figura 5, se presentan las curvas de recuperación de cobre para las diferentes muestras de relave aglomerado. Se puede observar que estas curvas presentan cambios de pendiente para distintos valores de T , los cuales están relacionados con cambios en la cinética de la lixiviación. En la figura 6, se presentan las curvas de recuperación y de consumo específico de ácido, para las muestras M1, M3, M5 y M8, donde el consumo de ácido representa la cantidad de ácido consumido respecto al cobre recuperado, para diferentes tiempos. En estas curvas se pueden observar, de forma más clara, los cambios de pendiente ya mencionados. Además, se puede observar la presencia de un tiempo óptimo de lixiviación y cómo se consume el ácido durante el proceso de lixiviación. A partir de cierto valor de T , que se denominó T^* , la recuperación de cobre comienza a ser muy lenta, es decir, se requiere de un tiempo mayor para recuperar un pequeño porcentaje adicional de cobre. Esto, se observa en el último tramo de las curvas de recuperación, donde la pendiente es lineal y prácticamente horizontal. Mientras menor sea el valor de T^* , se requiere de una menor cantidad de fluido, de ácido y de tiempo para alcanzar la máxima recuperación posible. En la tabla IV, se presentan los valores de T^* para las diferentes muestras, con sus respectivas recuperaciones de cobre y consumo de ácido. El menor valor de T^* , lo tiene la muestra M3 y coincide con la máxima recuperación respectiva de 60 % de cobre. Las muestras aglomeradas con un contenido de humedad entre 8 y 13 % (muestras M2, M3 y M4) son las que presentan

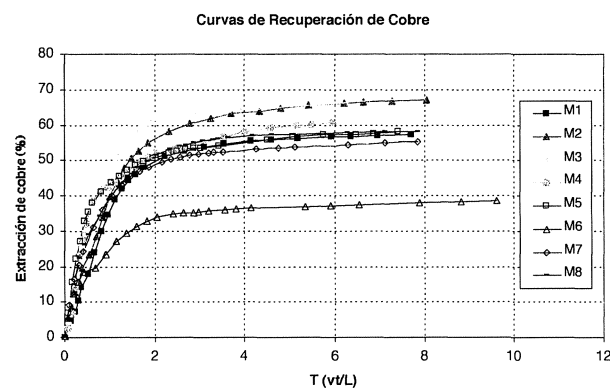


Figura 5. Curvas de recuperación de cobre para diferentes contenidos de humedad en la aglomeración.

Figure 5. Curves of copper recovery for different moisture in the agglomeration.

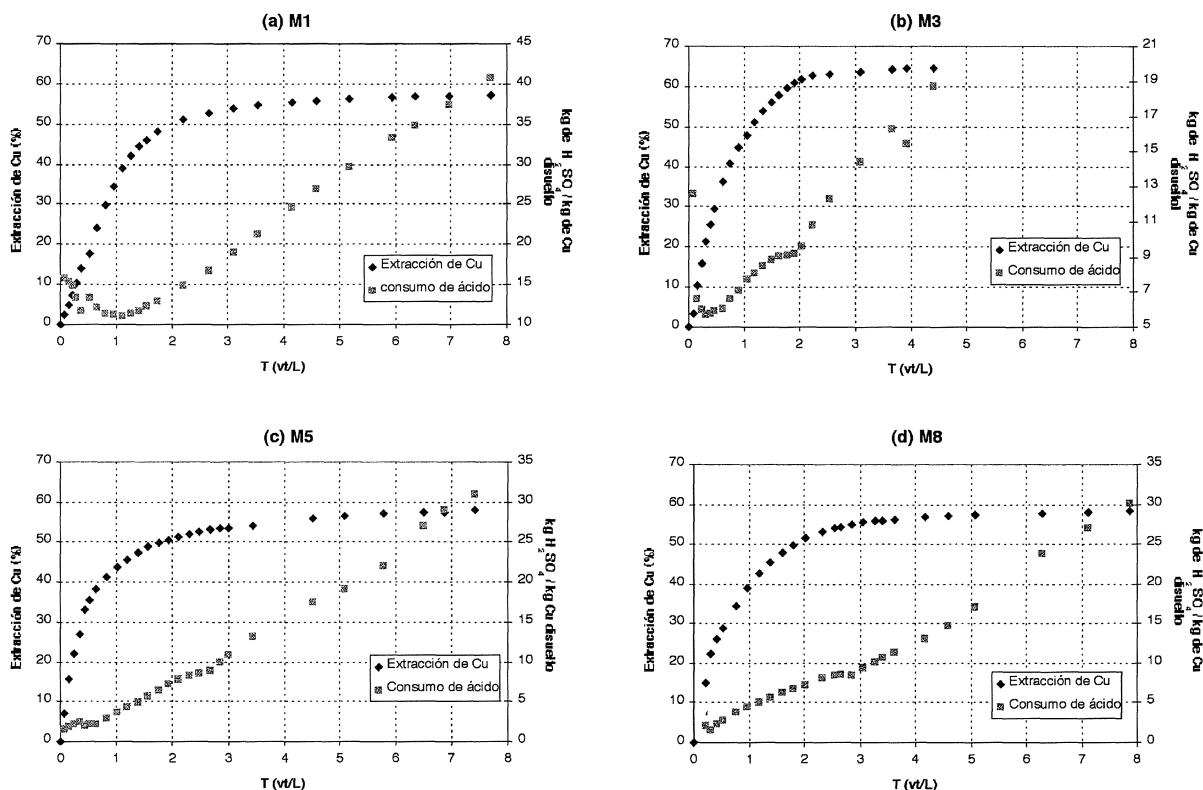


Figura 6. Curvas de recuperación de cobre y curvas de consumo de ácido para las muestras M1, M3, M5 y M8.

Figure 6. Curves of copper recovery and curves of acid consumption for the M1, M3, M5 and M8 samples.

Tabla IV. Tiempos de cambio de cinética de lixiviación con sus respectivas recuperaciones de cobre y consumo de ácido. ($T = vt/L$ es tiempo espacial adimensional o volumen de poro)

Table IV. Time of change of leaching kinetic with its respective copper recovery and acid consumption ($T = vt/L$ is called pore volume or spatial dimensionless time)

Muestra	T^* (tiempo adimensional óptimo)	Consumo de ácido para $T=T^*$ kg ácido/kg Cu	Recuperación de Cu (%) para $T=T^*$
M1	2,0	14	52
M2	2,8	16	60
M3	2,0	9,5	60
M4	2,0	9,5	52
M5	3,0	11	54
M6	2,0	13	35
M7	2,0	9,5	50
M8	2,3	8	54
Promedio	2,24	11,3	52

una mayor recuperación de cobre, de alrededor de un 8 % superior que la del resto de las muestras.

Esto, puede deberse a la mayor estabilidad que presenta este material al momento de someterse al ensayo de lixiviación.

En la figura 5, se observa que la muestra M6 presenta un bajo nivel de recuperación. Esto, se debe a que presenta el mayor porcentaje de asentamiento (Fig. 4) y el menor tamaño de poro (Tabla V), lo que indica que los aglomerados, prácticamente, se desarmaron, formando zonas impermeables que impiden el flujo homogéneo de la solución ácida.

Se observa que la muestra aglomerada con un 10 % de contenido de humedad (M3) presenta el menor consumo de ácido por kg de cobre producido, del orden de 20 kg de ácido por kg de cobre extraído. El resto de las muestras presentan un consumo de ácido sulfúrico, entre un 50 y, hasta, un 100 % superior, que la muestra M3.

En la figura 7, se presenta la recuperación de cobre para diferentes tiempos durante el proceso de lixiviación. Se puede observar que para tiempos bajos ($T=0,5$) la mayor recuperación de cobre se obtiene para el material aglomerado con un 15 % de contenido de humedad. A medida que aumenta el tiempo, la mayor recuperación se desplaza hacia la muestra aglomerada con un 10 % de contenido de humedad. Esta tendencia se mantiene estable hasta que T

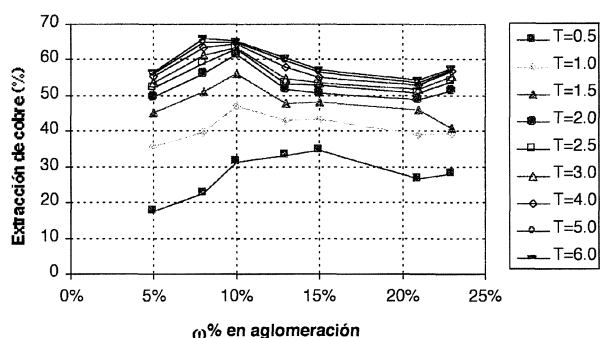


Figura 7. Curvas de recuperación de cobre v/s contenido de humedad en la aglomeración para diferentes tiempos de recuperación.

Figure 7. Curves of copper recovery v/s moisture in the agglomeration for different recovery time.

alcanza el valor de 6 volúmenes de poro, donde la máxima recuperación se obtiene para un material aglomerado con un contenido de humedad entre 8 y 10 % en peso. Por otra parte, se puede observar que el rango de recuperación (18 - 35 %) entre las diferentes muestras es mucho mayor para tiempos pequeños que para tiempos grandes (55 % - 65 %).

4.2. Propiedades hidrodinámicas

En la figura 8, se representan las curvas de retención de las diferentes muestras de aglomerado de relave. En la tabla V, se presentan los parámetros de las curvas de retención ajustados a los valores experimentales de las diferentes muestras de relave aglomerado de cobre.

Se observa que el valor de entrada de aire o presión de burbujeo, definido como el inverso del parámetro α [22 y 31], es mínimo para las muestras M3 y M5 y, además, la muestra M3 posee el mayor

contenido de humedad saturado, θ_s , y un bajo valor de λ . Las muestras aglomeradas con un alto contenido de humedad, como son las muestras M7 y M8, poseen los menores valores de λ y de θ_s , mientras que las muestras aglomeradas con poco contenido de humedad poseen los mayores valores del parámetro λ . El bajo valor de la presión de burbujeo presentado por la muestra M3 indica que posee un tamaño de poro relativamente mayor que el resto de las muestras. Además, el bajo valor de λ tiene relación con un mayor rango en el tamaño de los poros, es decir, el material aglomerado con un 10 % de contenido de humedad posee diferentes tamaños de poros, lo que indica la presencia de porosidad inter e intra aglomerados.

Para las muestras aglomeradas con bajos contenidos de humedad (muestras M1 y M2), se presentan los mayores valores para λ , lo que significa que el tamaño de sus poros es, más bien, homogéneo. Considerando que estas muestras presentan bajos valores de α , es decir, una mayor presión de burbujeo, se puede decir que las muestras aglomeradas con bajo contenido de humedad presentan los menores tamaños de poros. Esto, indica un bajo nivel de aglomeración, y tiene relación con los resultados obtenidos por Newitt y Conwat-Jones (1958) [32] donde, para contenidos de humedad bajos, el material a aglomerar tenía una tendencia a adherirse a las paredes del aglomerador y al soltarse tendía a resbalar más que a rodar impidiendo la formación del material aglomerado.

Para la estimación de la curva de conductividad hidráulica, $k(\theta)$, se utilizó la ecuación (3), con los parámetros ajustados de la curva de retención y los datos observados de la conductividad saturada de cada muestra. En la tabla VI, se presentan los valores obtenidos experimentalmente para

Tabla V. Parámetros obtenidos a través del programa RETC para las diferentes muestras de aglomerado de relave de cobre

Table V. Parameters given by the RETC program for the different samples of agglomerate of copper tailing

Muestras	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	m	λ	r^2
M1	0,50 ± 0,02	0,05 ± 0,02	1,33 ± 0,04	0,25 ± 0,02	0,33 ± 0,04	0,994
M2	0,44 ± 0,02	0,05 ± 0,01	1,34 ± 0,03	0,25 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,996
M3	0,56 ± 0,01	0,20 ± 0,03	1,26 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,999
M4	0,52 ± 0,01	0,13 ± 0,02	1,29 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,999
M5	0,47 ± 0,02	0,07 ± 0,03	1,30 ± 0,04	0,23 ± 0,02	0,30 ± 0,04	0,992
M6	0,48 ± 0,01	0,01 ± 0,01	1,29 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,999
M7	0,43 ± 0,01	0,13 ± 0,02	1,24 ± 0,01	0,20 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,999
M8	0,40 ± 0,02	0,09 ± 0,06	1,21 ± 0,04	0,17 ± 0,02	0,21 ± 0,04	0,982

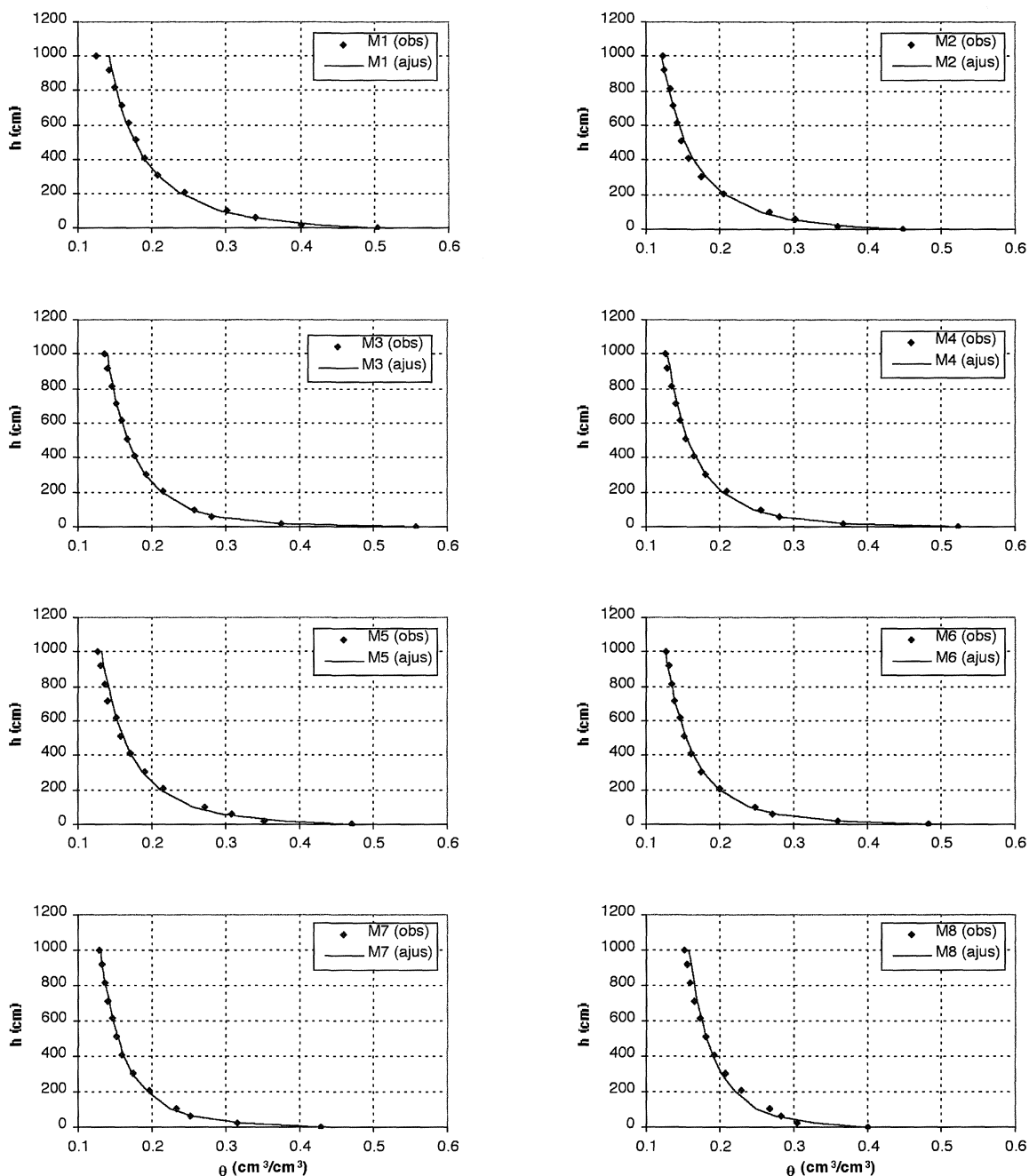


Figura 8. Curvas de retención observadas (puntos) y ajustadas (líneas continuas) con el programa RETC para las muestras: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; e) M5; f) M6; g) M7 y h) M8.

Figure 8. Retention curves observed (point) and adjusted (continuous line) with the RETC program for the samples: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; e) M5; f) M6; g) M7 and h) M8.

la conductividad hidráulica saturada, mediante un medidor de permeabilidad de carga constante con tubo de Marriot. Se observa que la muestra M5 presenta la mayor conductividad hidráulica saturada en comparación con las muestras aglomeradas con bajo contenido de humedad, como la M1 y M2, que presentan una conductividad hidráulica saturada de menos de la mitad. Para las muestras aglomeradas con un alto contenido de humedad,

la conductividad hidráulica saturada disminuye nuevamente aunque en menor grado. Esto último, se puede atribuir a la inestabilidad que presentan las muestras aglomeradas con alto contenido de humedad, la cual se ve reflejada en su mayor porcentaje de asentamiento (Fig. 4). Estas muestras tienden a desarmarse, presentando un comportamiento similar a la de las muestras aglomeradas con bajo contenido de humedad.

Tabla VI. Valores de conductividad hidráulica saturada para las distintas muestras de aglomerado de relave de cobre

Table VI. Values of saturated hydraulic conductivity for the different samples of agglomerate of copper tailing

Muestra	k_s (cm/h)
M1	1,97 ± 0,7
M2	2,60 ± 0,01
M3	3,20 ± 0,01
M4	3,02 ± 0,08
M5	5,40 ± 0,1
M6	3,60 ± 0,3
M7	4,30 ± 0,01
M8	3,70 ± 0,04

En la figura 9, se presentan las curvas de conductividad hidráulica ajustadas y los valores de la conductividad hidráulica saturada para cada muestra de aglomerado de relave de cobre. Para los valores de contenido de humedad observados en las columnas durante las pruebas de lixiviación, se estimaron los valores de la conductividad hidráulica no saturada, que se presentan en la tabla VII. Se observa que las muestras aglomeradas con un contenido de humedad entre 10 y 18 % son las que presentan la menor conductividad hidráulica no saturada.

En la figura 10, se presentan las curvas de conductividad hidráulica relativa para las diferentes muestras de aglomerado de relave de cobre, definidas como el cociente entre la conductividad hidráulica no saturada y la conductividad hidráulica saturada. Se observa que, para el contenido de humedad al que funcionan las columnas, la muestra M3 posee el menor valor de la conductividad hidráulica no saturada. Esto, permite la interacción entre el ácido y el mineral, favoreciendo los procesos difusivos y las reacciones químicas.

En la tabla VIII, se presentan los valores promedio de los parámetros hidráulicos de una mezcla de relave sin aglomerar, de minerales de cobre, zinc y plomo, con una granulometría similar al relave sin aglomerar utilizado en este estudio^[33 y 34]. Además, se presentan los valores de estos parámetros para las muestras aglomeradas con 5, 10 15 y 23 % de contenido de humedad.

El mayor valor de la presión de burbujeo observado en el relave sin aglomerar indica la presencia

de poros de tamaño muy pequeño, ya que se necesita una mayor presión para poder extraer el líquido contenido en el interior de un poro. Por otra parte, el mayor valor de los parámetros m y n , que se encuentran directamente relacionados con el parámetro λ , indica un tamaño de poro más homogéneo. Además, el valor de la conductividad hidráulica saturada es mucho menor que cualquiera de las muestras de relave aglomerado, lo que justifica el proceso de aglomeración de relave.

4.3. Propiedades hidrodispersivas

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas de trazador muestran variaciones en los parámetros hidrodispersivos para las diferentes muestras de aglomerados de relave de cobre.

El modelo de porosidad dual representa mejor el transporte de solutos en el relave aglomerado, ya que existen, claramente dos tipos de flujo: una zona dominada por el flujo convectivo, de transporte rápido y que ocurre en los espacios interaglomerados, y una zona donde predomina el flujo difusivo que, debido a su baja velocidad, se puede considerar inmóvil y que ocurre dentro de los aglomerados. En la figura 11, se presentan los datos obtenidos a partir de las pruebas de trazador para las muestras M1, M5 y M8 y las curvas ajustadas por el programa CXTFIT con el modelo de porosidad dual (Ecs. (4) y (5)). En la tabla IX, se presentan los valores de los parámetros introducidos y ajustados.

Se observa que el coeficiente de dispersión, D , es semejante para las tres muestras mientras que el valor del parámetro β es muy similar para las muestras M5 y M8 y mucho menor para la muestra M1. El mayor valor de β observado en las muestras M5 y M8 puede deberse a que existe una mayor cantidad de líquido inmóvil que favorece el transporte difusivo. Además, existe una mayor área de contacto entre la región móvil e inmóvil ya que la aglomeración aumenta los espacios entre aglomerados.

En la figura 12, se presentan las diferentes componentes del transporte de Br-82, es decir, por dispersión hidrodinámica, por convección y por traspaso entre la fase móvil e inmóvil, para diferentes tiempos. Se observa que el traspaso entre la fase móvil e inmóvil explica un 80 % del transporte de soluto, aproximadamente, la convección, un 18 % y la dispersión, un 2 %. Para un tiempo de 800 min, la muestra M1 presenta el mayor transporte de trazador por dispersión hidrodinámica. Para

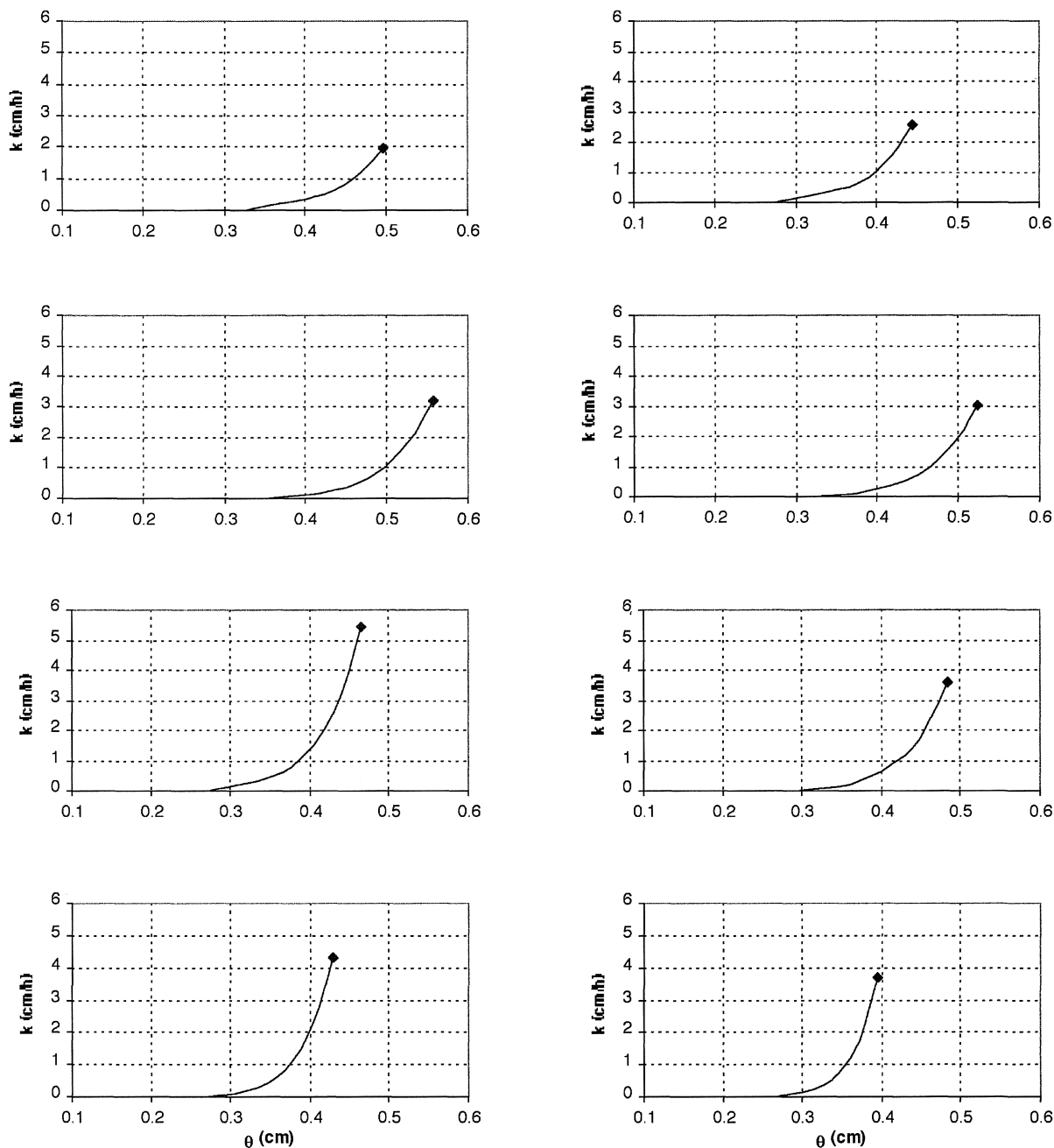


Figura 9. Curvas de conductividad hidráulica no saturada obtenidas con el programa RETC para las muestras: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; e) M5; f) M6; g) M7 y h) M8.

Figure 9. Unsaturated conductivity curves obtained with the RETC program for the samples: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; e) M5; f) M6; g) M7 and h) M8.

tiempos mayores ($t = 1.000 \text{ min}$, 1.200 min) la muestra M5 sufre un aumento notorio del transporte de Br-82 por dispersión hidrodinámica respecto a las muestras M1 y M8. El transporte convectivo predomina en la muestra M5 sobre las muestras M1 y M8. En relación al transporte del trazador entre las fases móvil e inmóvil, se observa que la muestra M8 posee el mayor valor para los diferentes tiempos.

5. CONCLUSIONES

- La lixiviación de la muestra de relave aglomerado en columnas a escala de laboratorio (de 20 cm de largo \times 15 cm de diámetro) permitió obtener una extracción de cobre entre 55 y 65 %, en 30 h de operación, utilizando una tasa de riego de 5 l/h/m^2 . El consumo específico de ácido fue de 8-15 kg/kg de cobre, lo que

Tabla VII. Valores de conductividad no saturada para contenidos de humedad observados en las columnas de lixiviación de las diferentes muestras de aglomerado de relave de cobre

Table VII. Values of unsaturated hydraulic conductivity for moisture observed in the leaching columns of the different samples of agglomerate of copper tailing

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
θ (cm ³ /cm ³)	0,38	0,36	0,36	0,34	0,30	0,29	0,31	0,30
$k(\theta)$ (cm/h)	0,19	0,40	0,04	0,05	0,09	0,02	0,12	0,09
θ_s (cm ³ /cm ³)	0,50	0,44	0,56	0,52	0,47	0,48	0,43	0,40

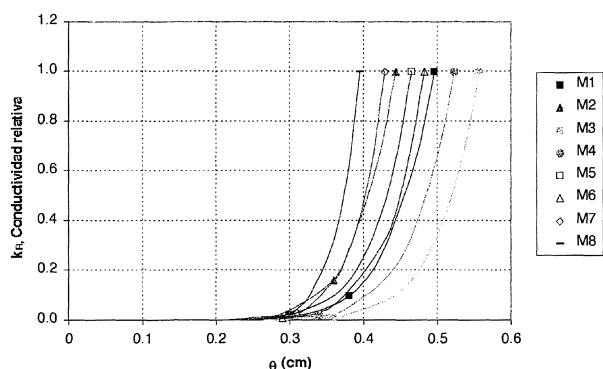


Figura 10. Curvas de conductividad hidráulica relativa para las diferentes muestras de aglomerado de relave de cobre.

Figure 10. Relative conductivity curves for the different samples of agglomerate of copper tailing.

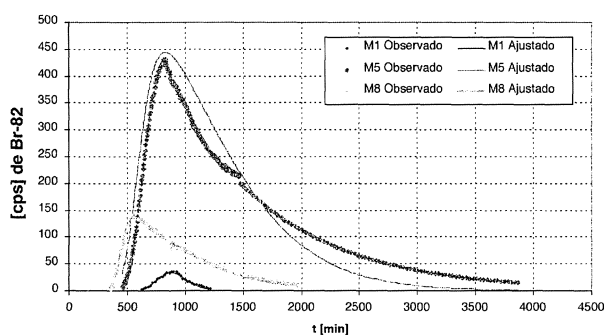


Figura 11. Curvas de concentración de Br-82 observados en el efuente y curvas de ajustada por el programa CXTFIT utilizando el modelo de porosidad dual.

Figure 11. Concentration curves of Br-82 observed in the exit fluid and adjusted curves by the CXTFIT program, using the dual porosity model.

corresponde a 5-10 kg de ácido/t de relave. El contenido de humedad en el proceso de aglomeración, previo al proceso de lixiviación ácida, tiene importantes efectos en las variables hidrometalúrgicas e hidrodispersivas de los re-

Tabla VIII. Valores de parámetros hidrodinámicos de relaves sin aglomerar (Austertin *et al.*, 1996; 1998), y para las muestras aglomeradas de relave de cobre con 5, 10, 15 y 23 % de contenido de humedad

Table VIII. Values of hydrodynamics parameters of tailings without agglomerate (Austertin *et al.*, 1996; 1998), and for samples of agglomerate of copper tailings with 5, 10, 15 and 23 % of moisture

Parámetros	Relave sin aglomerar	M1	M3	M5	M8
θ_s (cm ³ /cm ³)	0,430	0,50	0,56	0,47	0,40
α (1/cm)	0,030	0,05	0,20	0,07	0,09
n	1,603	1,33	1,30	1,30	1,21
m	0,376	0,25	0,20	0,23	0,17
k_s (cm/h)	0,0036-0,36	1,97	3,20	5,40	3,70

Tabla IX. Parámetros introducidos (a) y ajustados (b) por el programa CXTFIT, para las muestras M1, M5 y M8 utilizando el modelo de porosidad dual

Table IX. Input parameters (table a) and adjusted parameters (table b) for the CXTFIT program, for the M1, M5 and M8 samples, using the dual porosity model

Parámetros		M1	M5	M8
(a) introducidos	v (cm/min)	0,022	0,016	0,021
	D (cm ² /min)	0,004	0,007	0,005
(b) ajustados	θ (cm ³ /cm ³)	0,380	0,330	0,233
	β (1/min)	0,005	0,060	0,066
	r^2	0,980	0,860	0,990

laves de cobre, debido al cambio en la porosidad y en la estabilidad que tiene el material al ser sometido a pruebas de lixiviación.

- El primer efecto que se puede observar es que el tamaño del material aglomerado depende, directamente, de la cantidad de agua agregada

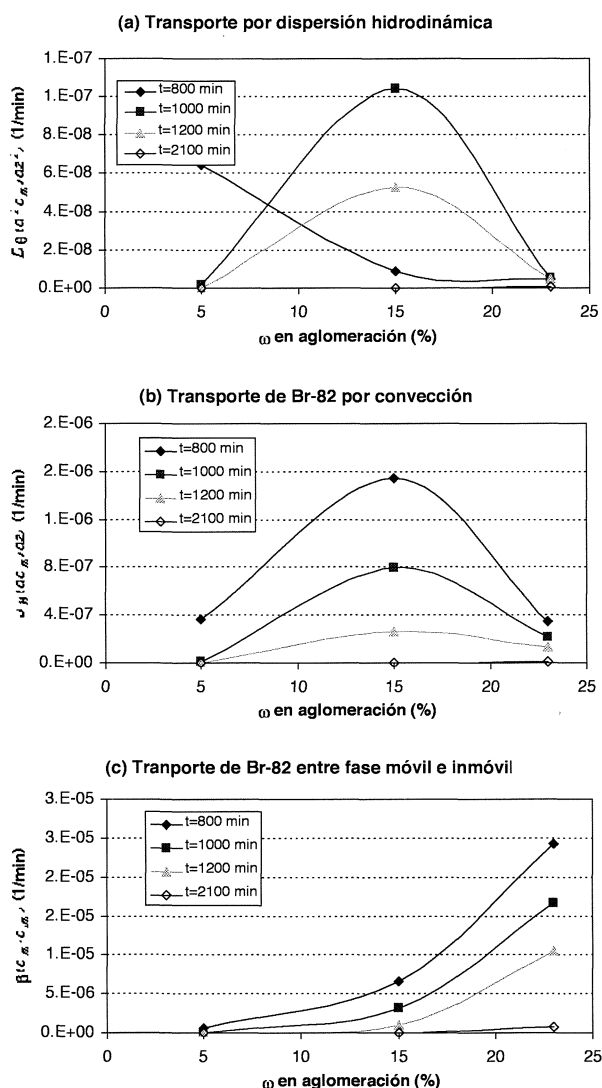


Figura 12. Transporte de Br-82: a) por dispersión hidrodinámica; b) por convección; c) entre fase móvil e inmóvil, para diferentes tiempos.

Figure 12. Transport of Br-82: a) for hydrodynamic dispersion; b) for convection; c) between mobile and immobile phases.

durante el proceso de aglomeración.

- El asentamiento que se produce en las columnas de relave cuando se somete a experiencias de lixiviación es mínimo para el material aglomerado con un 10 % de contenido de humedad. Esto, coincide con los resultados obtenidos por Newitt y Conway-Jones (1958) para experiencias de aglomeración con diferentes contenidos de humedad para una arena fina.
- Se observa que la recuperación de cobre en las muestras aglomeradas con un contenido de humedad entre 8 y 10 % presentan valores cercanos al 65 % mientras que el resto de las muestras bordean el 55 %. Si se considera el tiempo

adimensional, T , para el cual, la extracción de cobre comienza a ser despreciable, se puede observar que la muestra aglomerada con un 10 % de contenido de humedad presenta el mínimo valor, lo que implica que con una menor cantidad de fluido y, por ende, de ácido, se obtiene una mayor recuperación de cobre.

- Se observa que la muestra aglomerada con un 10 % de contenido de humedad presenta el menor valor de la presión de burbujeo ($1/\alpha$) y un bajo valor del parámetro λ . Esto, indica la presencia de un tamaño de poro relativamente mayor y más heterogéneo que para el resto de las muestras. Es decir, el material aglomerado con un 10 % de contenido de humedad posee diferentes tamaños de poros, lo que indica la presencia de porosidad inter e intra aglomerados. Por el contrario, las muestras aglomeradas con bajos contenidos de humedad (entre 5 y 8 %), presentan mayores valores de la presión de burbujeo respecto a la muestra de relave aglomerada con un 10 % de contenido de humedad y presentan, además, los mayores valores del parámetro λ . Esto se traduce en menores tamaños de poro y más homogéneos. De esta manera se puede decir que estas muestras poseen un bajo nivel de aglomeración.
- Se observa que el valor de la conductividad hidráulica no saturada (0,04 cm/h) es mínima para la muestra aglomerada con un 10 % de contenido de humedad, lo que significa que el fluido se desplaza a bajas velocidades a través del medio y se favorecen los procesos difusivos y las reacciones químicas.
- A partir de la prueba de trazador se observa que la transferencia de soluto entre la fase móvil e inmóvil es el proceso de transporte de soluto predominante.
- Por estos motivos se considera que, aglomerando con contenidos de humedad cercanos al 10 % en peso (pero no inferiores) se obtienen las mejores condiciones para la recuperación de cobre en el proceso de lixiviación de aglomerados de relave para las condiciones experimentales de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S.M. BULATOVIC, D.M. WYSLOUZIL y C. KANT, *Min. Eng.* 4 (1989) 313-331.
- [2] J. JENKINS, W.G. DAVENPORT, B. KENNEDY y T. ROBINSON, *Fourth International Conference, Copper'99*, S. Young, D.B. Dreisinger, R.P. Hackl and D.G. Dixon (eds.), Vol. IV, The

- Minerals Metals and Materials Soc., Warrendale Pennsylvania, 1999, p. 493.
- [3] G.M. RITCEY, *Tailings Management: Problems and Solutions in the Mining Industry*, Elsevier, 1989, pp. 1-195.
- [4] D. DECEKER y S. TYLER, *J. Environ. Qual.* 28 (1999) 543-555.
- [5] G.T. LAPIDUS, *Chem. Eng. Sci.* 47 (1992) 1.933-1.941.
- [6] R.W. BARTLETT, *Solution Mining: Leaching and Fluid Recovery of Materials*, Second Edition, Gordon and Breach Science Publishers, Reading, U.K., 1998, pp. 16-23.
- [7] J. CARVALLO y R. MONTOYA, *Electrorefining and Hydrometallurgy of Copper*, W.C. Cooper et al. (eds), CIM, Canada, 1995, pp. 795-806.
- [8] B. DOLD y L. FONTBOTÉ, *J. Geochem. Explor.* 1-3 (2001) 3-55.
- [9] J. LJUNGBERG y B. ÖHLANDER, *J. Geochem. Explor.* 1-3 (2001) 57-72.
- [10] F.A.L. DULLIEN, *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*, Second edition, Academic Press Inc, New York, 1992, pp. 75-156.
- [11] J.F. MUÑOZ, P. RENGIFO y M. VAUCLIN, *J. Contaminant Hydrol.* 27 (1997) 1-24.
- [12] J. RAULD, R. MONTEALEGRE, P. SCHMIDT y E. DOMIC, *Rev. Minerale* 41 (1988) 21-29.
- [13] E. PHARISS y A. PERNICHELE, *Eng. Bull.* 59 (1982) 33-38.
- [14] H.M. BRICEÑO, M.C. ROSSI y R. MONTOYA, A.E. Torna, J.E. Wey y V.I. Lakshmanan (Eds.), *Proc. Int. Biohydrometallurgy Symposium*, Jackson Hole, Wyoming, 1993, pp. 89-98.
- [15] L.A. RICHARDS, *Physics* 1 (1931) 318-333.
- [16] J. BEAR, *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publications Inc., New York, 1972, pp. 119-186; 474-515.
- [17] J. BEAR y A. VERRUJIT, *Modeling Groundwater flow and pollution*, D. Riedel Publications, Dordrecht, 1987, pp. 123-152.
- [18] M.TH. VAN GENUCHTEN, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41 (1980) 278-285.
- [19] M. VAN GENUCHTEN, F.J. LEIJ y S.R. YATES, USEPA Rep. 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA, 1991, pp. 3-27.
- [20] Y. MUALEM, *Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils: Prediction and Formulas. Methods of Soil Analysis*, 2nd Ed., A. Klute (Ed.), Am. Soc. of Agronomy, Madison, Wis., 1986, pp. 687-734.
- [21] R.H. BROOKS y A.T. COREY, *Hydraulic Properties of Porous Media*, Colorado State Univ., Fort Collins, Co. Hydrologic Paper, N° 3, 1964, p. 27.
- [22] F.J. LEIJ, W.B. RUSSELL y S.M. LESCH, *Ground Water* 35 (1997) 5.
- [23] S.R. YATES, M.TH. VAN GENUCHTEN, A.W. WARRICK y F.L. LEIJ, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 134 (1992) 157-163.
- [24] M.TH. VAN GENUCHTEN y R.J. WAGENET, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53 (1989) 1.303-1.310.
- [25] N. TORIDE, F. LEIJ y M. VAN GENUCHTEN, Research Report No. 137. U.S. Salinity laboratory, Riverside, CA, 1995, pp. 15-31.
- [26] J.D. LISTER y A.G. WATERS, *Powder Technol.* 62 (1990) 125-134.
- [27] W. PIETSCH, *Size Enlargement by Agglomeration*, John Willey & Sons Ltd, 1991, pp. 123-155.
- [28] ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, (D 5550), Vol. 04.08. Sección 4, Construcción, 1994, pp. 1.315-1.318.
- [29] T.W. LAMBE y R.V. WHITMAN, *Mecánica de Suelos*, Editorial Limusa S.A, México, 1981, pp. 42-44.
- [30] D.G. FREDLUND y H. RAHARDJO, *Soil mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley Interscience Publication, New York, 1993, pp. 124-149.
- [31] J.B. KOOL, J.C. PARKER y M. VAN GENUCHTEN, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 (1985) 1.348-1.354.
- [32] D.M. NEWITT y J.M. CONWAY-JONES, *Trans. Inst. Chem. Eng.* 36 (1958) 422-443.
- [33] M. AUBERTIN, B. BRUSSIÈRE y P. CHAPUIS, *Can. Geotech. J.* 33 (1996) 470-482.
- [34] M. AUBERTIN, J. RICARD y P. CHAPUIS, *Can. Geotech. J.* 35 (1998) 55-69.
- [35] C. HERRERA, Tesis de magister, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2002.