

Jesús-Mosco, Jorge Luis de; González-Sandoval, María del Refugio; López-Alfaro, Lucía Sarahí; Barrera-Godínez, José Antonio; Durán-Domínguez-de-Bazúa, María del Carmen

Estudio del efecto de una cubierta de calcita en la solubilización selectiva de metales en jales mineros a escala de laboratorio

Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 26, núm. 2, julio-diciembre, 2011, pp. 92-102

Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos

Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=48221175006>



*Tecnología, Ciencia, Educación*

ISSN (Versión impresa): 0186-6036

[imiqac@sercom.com.mx](mailto:imiqac@sercom.com.mx)

Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos

México

# Estudio del efecto de una cubierta de calcita en la solubilización selectiva de metales en jales mineros a escala de laboratorio

## Study of the effect of a quick lime coverage in the selective solubilization of metals present in mine tailings at laboratory scale

Jorge Luis de Jesús-Mosco<sup>1\*</sup>, María del Refugio González-Sandoval<sup>1</sup>, Lucía Sarahí López-Alfaro<sup>1</sup>, José Antonio Barrera-Godínez<sup>2</sup>, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302, 303, Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, del Conjunto E.

<sup>2</sup> UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica, Paseo de la Investigación Científica s/n, 04510 México D. F. México. Tels. +52-55 5622 5300 al 02. Fax: 5622 5303. \*Correo-e (e-mail): jorgedejesusmosco@yahoo.com.mx

### RESUMEN

La industria minera, con el aumento de su producción también incrementa la generación de residuos y éstos han ocasionado durante siglos problemas de contaminación a lo largo de todo el país. Entre estos residuos peligrosos destacan los jales (de *xalli*, partículas finas en náhuatl), que son residuos sólidos fluidificados con agua y que se depositan en las llamadas presas de jales. Algunos de ellos están compuestos en mayor proporción por pirita y, debido a la oxidación natural que sufren cuando entran en contacto con el agua y oxígeno atmosféricos, tienen un gran potencial de generación de ácido sulfúrico, el cual disuelve selectivamente a los metales presentes. Se está empezando a considerar a estos residuos como una mina potencial de metales valiosos ya que estos se encuentran relativamente disponibles. En esta investigación se realizó el estudio del efecto de una cobertura seca de carbonato de calcio combinada y sin combinar con bisulfito de sodio, como controladores del drenaje ácido generado en jales previamente meteorizados usando celdas de humedad a escala de laboratorio. Los resultados muestran que el drenaje ácido de mina generado puede disolver selectivamente a ciertos metales que pueden tener un valor comercial importante. Una siguiente etapa será de considerar los costos del proceso versus las ganancias de la recuperación de estos metales disueltos.

**Palabras clave:** Bisulfito de sodio, carbonato de calcio, celda de humedad, cubierta seca, drenaje ácido, recuperación de metales

**Key words:** Sodium bisulfite, quick lime, humidity cells, dry coverage, acid leachate, metals recovery

\*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia  
(Recibido: Junio 15, 2011,  
Aceptado: Octubre 12, 2011)

### ABSTRACT

The mining industry, considering its increasing production, also increases its wastes generation, creating pollution problems throughout the country. Among these so called residues some important ones due to its huge amounts are the mine tailings normally disposed as water slurry in special places known as tailings ponds. When tailings content is high in pyrite they have a great potential to produce acid due to natural oxidation processes occurring with its contact with atmospheric water and oxygen. This acid drainage dissolves some minerals. Nowadays there is a tendency to consider these residues as a potential mine for worthy metals since they are relatively available. This research studied the effect of a dry material neutralizing coverage combined or not with bisulfite salts as controllers of acid mine drainage in tailings previously weathered using humidity cells. Results showed that acid mine drainage selectively dissolve some metals that may have an important commercial value. The next stage is to consider the costs of the process versus the sale price of these dissolved metals.

### INTRODUCCIÓN

La industria minera mexicana es mayoritariamente metálica y se dedica principalmente a la extracción de cobre, zinc, plata y plomo (INE, 2005), aporta 1.4% del producto interno bruto (Reforma, 2009). La industria, como todos los sectores manufactureros, a través de sus procesos de extracción y transformación, genera problemas de contaminación (INE, 2005). En el proceso de flotación se producen residuos sólidos conteniendo metales, conocidos como jales (del náhuatl "*xalli*", arenas o partículas finas) (González-Sandoval, 2006).

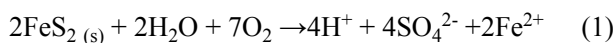
El proceso de oxidación natural de los jales, ocurre lentamente, en presencia de oxígeno y agua, produciendo

ácido sulfúrico y sulfato férrico. La presencia de algunas bacterias, cataliza estas reacciones. El ácido generado en las reacciones provoca la solubilización de cationes metálicos y metaloides contenidos en el mineral, éstos pueden lixiviarse y llegar a los cuerpos de agua (Audry y col., 2005). También la reducción en el valor de pH causa deterioros en la flora y fauna acuáticas. A este tipo de contaminación se le conoce como drenaje ácido de mina, DAM. El DAM alcanza típicamente un pH dentro del intervalo de 2.5 a 5.0, con altas concentraciones de metales pesados tales como el Fe, Zn, Cu, Pb y Al usualmente asociados con el ion sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  (Aubé y Payant, 1997; Lee y Lee, 2004).

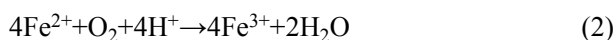
Para controlar la generación del drenaje ácido de mina se utilizan diversos métodos, los cuales van desde la inundación de las presas de jales (Khozina y Sheriff, 2008), hasta colocar diversas cubiertas de materiales de bajo costo como neutralizantes o como barreras que evitan el transporte del oxígeno atmosférico (Belzile y col., 1997; Harris y Megharaj, 2001; Zhang y col., 2003).

La oxidación de los minerales de sulfuro de hierro consta de varias reacciones. Éstas se indican en las ecuaciones 1 a 5 (Bullock y Bell, 1994; EPA, 1994).

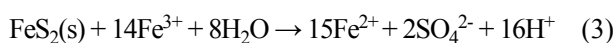
En la primera etapa (ecuación 1), el azufre se oxida produciendo iones  $\text{H}^+$  y sulfato, que son los productos de disociación del ácido sulfúrico en agua y también se forma el ión  $\text{Fe}^{2+}$  en solución. Esta característica le permite que siga reaccionando (Younger y col., 2002):



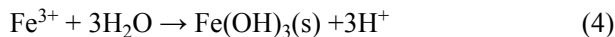
Como segunda etapa (ecuación 2), la oxidación del ión ferroso a ión férrico ocurre lentamente a los valores bajos de pH que se obtienen en la primera:



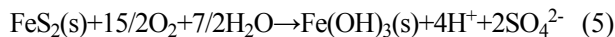
En la tercera etapa (ecuación 3), el ión férrico producido entra en contacto con la pirita y puede ocurrir una mayor disolución de pirita. Esta reacción genera más ácido. La cantidad de sulfato producido es muy similar, tanto bajo condiciones oxigenadas como en ausencia de oxígeno, lo que sugiere un papel predominante del ión  $\text{Fe}^{3+}$  en comparación con el oxígeno disuelto (Mazumdar y col., 2008):



En la cuarta y última etapa (ecuación 4), el ión férrico precipita como hidróxido de hierro:



Las reacciones anteriores se pueden resumir en la ecuación 5 a valores de pH menores de 6.4 (Mendoza-Amézquita y col., 2006):



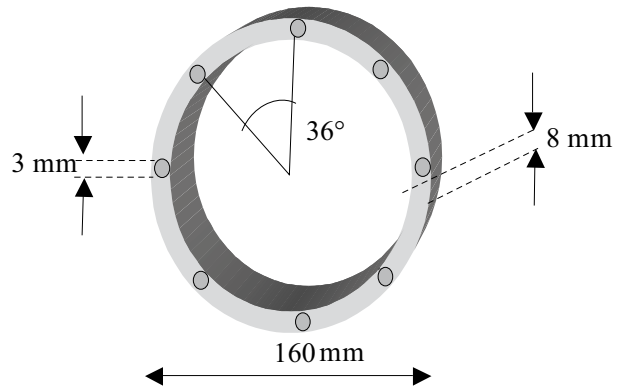
Para inhibir las reacciones de oxidación de los jales, debe entonces reducirse la disposición de los reactivos químicos que los generan: Oxígeno, agua o ambos, que intervienen en la primera fase de la reacción. Por tanto, en esta investigación se estudió el efecto de un recubrimiento de calca que sirviera como barrera selectiva para las reacciones de oxidación de jales intemperizados y sus efectos en la disolución de algunos metales.

#### MATERIALES Y METODOLOGÍA

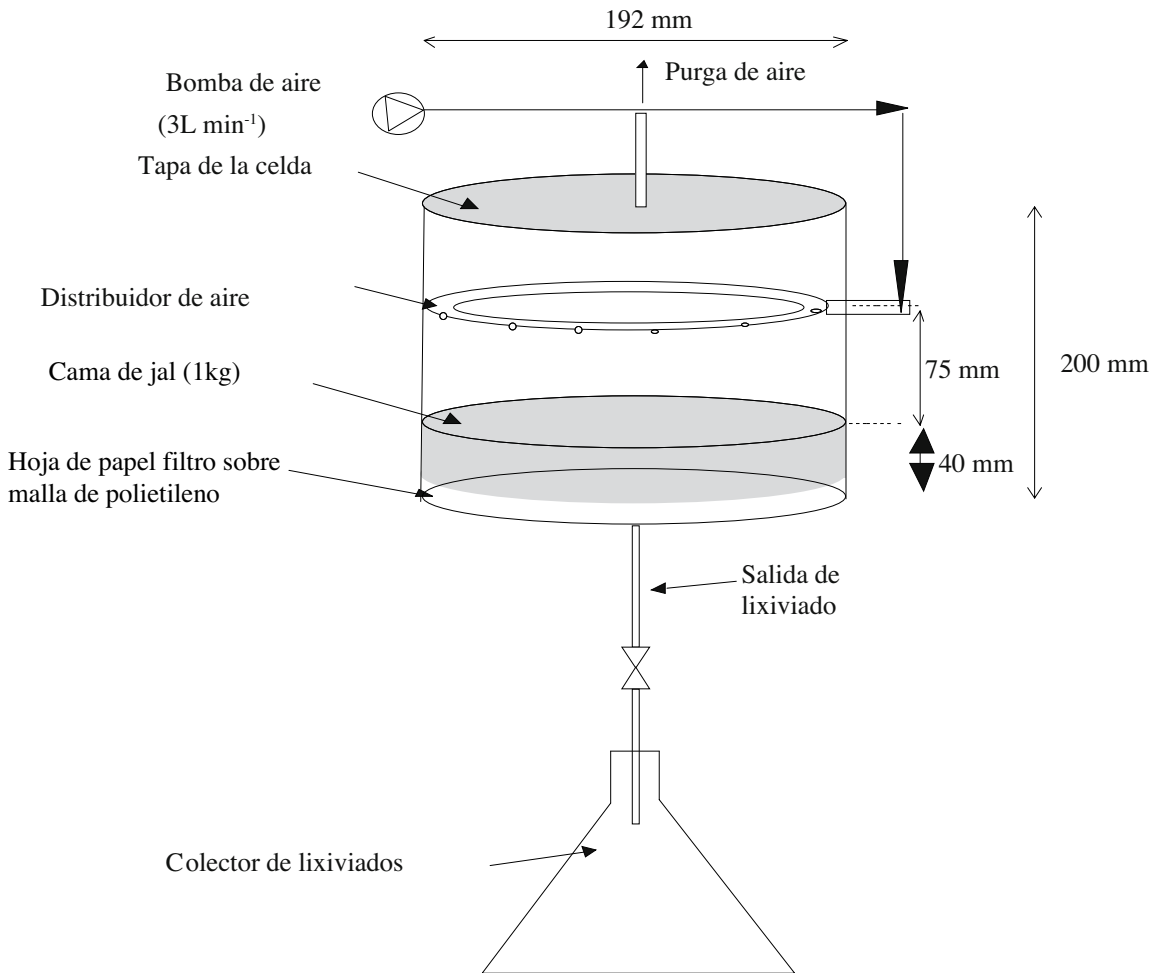
Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron las muestras de jales mineros meteorizadas en las investigaciones de González-Sandoval (2010), debido a que se realiza el estudio del efecto de una cubierta de carbonato de calcio y carbonato de calcio combinada con bisulfito de sodio en la generación de drenajes ácidos de mina para la presa de jales fuera de operación de una empresa cooperante, la cual tiene en su superficie jales que ya han sido expuestos a la acción de los elementos atmosféricos. Las muestras en las celdas de humedad, tuvieron un tratamiento previo consistente en: Extracción de los recipientes en donde se encontraban almacenadas. Secado a temperatura ambiente. Homogenización por traspaleo. Formación de muestras compuestas de un kilogramo. Depósito en las celdas de humedad (de Jesús-Mosco, 2011).

Las muestras se protegieron con una tapa de plástico para después colocar la cubierta de material neutralizante y de acuerdo a las especificaciones de operación de la celda, combinarlas o no con bisulfito de sodio. La Figura 1 muestra un esquema simplificado de las celdas de humedad utilizadas. En ellas se observan diferencias con respecto de las celdas descritas en el método ASTM-D5744-07 (ASTM, 2007). La alimentación del aire se hace por la parte superior de las celdas de humedad y, en vez de controlar la humedad del aire, se llevan a cabo periodos húmedos que consisten en regar las celdas por la parte superior simulando lluvia. Las características de las celdas de humedad se determinaron con base en el trabajo desarrollado por González-Sandoval (2010), las cuales son:

- Dimensiones del espacio interior: 192mm de diámetro por 200mm de altura.
- Medio de soporte del jal, papel filtro con retención de  $42\mu\text{m}$  para uso general. De filtración rápida. Soportado en una malla de polietileno.
- Sistema de difusión de aire, tubo de polietileno con perforaciones distribuidas alrededor como se indica en la Figura 2, colocado en el perímetro interior de los reactores.
- Sistema de impulsión de aire el cual consistió de una bomba de acuario capaz de proporcionar al menos  $3\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  de aire en el sistema.
- El riego, durante los periodos húmedos se realizó de forma manual, así como la incorporación del agua para generar los lixiviados. Durante estas dos operaciones se cubrió toda la superficie expuesta de los jales en los reactores.



**Figura 2.** Sistema difusor de aire en las celdas de aire en las celdas de humedad (González-Sandoval, 2010)



**Figura 1.** Esquema de las celdas de humedad (González-Sandoval y col., 2009)

Las proporciones de carbonato de calcio y bisulfito de sodio en las celdas utilizadas en el desarrollo de esta investigación, se indican en la Tabla 1. Las letras A y B indican a un par formado por una celda y su réplica. La proporción en por ciento masa se refiere a la masa de carbonato de calcio con respecto a la masa de jales. Las partes por millón de bisulfito de sodio se refieren a miligramos de bisulfito de sodio con respecto a un kilogramo de jales.

**Tabla 1**

*Proporción de materiales colocados en las celdas de humedad*

Celda	1A,B	2A,B	3A,B	4A,B	5	6	7A,B	8A,B	9A,B
CaCO <sub>3</sub> , (%)	10	10	5	5	3.5	3.5	1.0	1.0	0
NaHSO <sub>3</sub> , ppm	0	20	0	20	0	20	0	20	0

Para colocar las cubiertas en las celdas de humedad, se aplicó el siguiente procedimiento, el cual se propuso con el objetivo de obtener las mismas condiciones iniciales en todas las celdas.

Se prepararon, en vasos de precipitados de 500 mL, suspensiones con carbonato de calcio, a las proporciones de 1, 3.5, 5 y 10% en masa de la cobertura y 100mL de agua desionizada. Las suspensiones se vertieron inmediatamente sobre la superficie de los jales cubriendo toda la superficie de éstos. La porción de material sólido que permaneció en el vaso de precipitados, se extrajo con agua desionizada hasta retirarla totalmente del vaso. Este procedimiento se realizó primero con la proporción de 10 por ciento de carbonato de calcio, puesto que ésta fue la proporción de carbonato de calcio con mayor demanda de agua para remover todos los sólidos del vaso. El volumen total de agua utilizado (250mL), se añadió a cada una de las celdas, aún cuando se utilizaron menores cantidades de agua para remover totalmente los sedimentos de los vasos que tenían las proporciones de material neutralizante más bajas, De esta forma, los jales ya con la correspondiente cubierta de carbonato de calcio, contenían la misma humedad al inicio de la experimentación.

Para las celdas que tenían carbonato de calcio combinadas con sales de bisulfito, se realizó el mismo procedimiento solamente que, previo a la adición del material neutralizante, se preparó una solución de 120mg de bisulfito de sodio en 300 mL de agua desionizada y después se tomaron alícuotas de 50mL de esta solución, los cuales se colocaron inmediatamente en la superficie de los jales antes de colocar la cobertura seca. Por lo tanto, cada celda con un kilogramo de jales recibió 20 mg de sales de bisulfito de sodio (20 ppm).

La solución de bisulfito de sodio fue absorbida totalmente por los jales. Inmediatamente y para evitar contacto prolongado entre el oxígeno atmosférico y el bisulfito de sodio; se colocó la cubierta de carbonato de calcio en los jales, con la metodología descrita previamente. Al final, las celdas que no se combinaron con bisulfito de sodio también recibieron 50mL de agua extra. Durante toda la experimentación se utilizó agua desionizada debido a que este tipo de agua se recomienda en el Método ASTM-D5744-07 (ASTM, 2007).

En la Figura 3 se muestra el sistema de 16 celdas con el cual se realizó la experimentación. Las condiciones de operación fueron las mismas para todas las celdas y se definieron con base en la determinación previa como las más favorables para generar drenajes ácidos en el menor tiempo (González-Sandoval, 2010; González-Sandoval y col., 2009). La Tabla 2 muestra estas condiciones.



**Figura 3. Sistema de 16 celdas de humedad utilizadas en la investigación**

Solamente se colocó una vez bisulfito de sodio al sistema, considerando que la presa actualmente se encuentra fuera de operación y utilizar este reactivo como parte de un proceso continuo tiene un efecto económico, a menos que la experimentación indicara su bondad y la pertinencia de seguirlo adicionando. Las celdas de humedad se operaron por veinticuatro semanas que es el tiempo mínimo que recomienda el método ASTM-D5744-07 (ASTM, 2007). En total se realizaron doce extracciones de lixiviados en cada una de las celdas. En los lixiviados obtenidos de las celdas de humedad

**Tabla 2**  
*Condiciones de operación de las celdas de humedad*

Parámetro	Tratamiento	Calcita, % CaCO <sub>3</sub>	Calcita + bisulfito de sodio	Control
Bajo		1	1% CaCO <sub>3</sub> , 20ppm bisulfito de sodio	No aplica
Estequiométrico		3.5	3.5% CaCO <sub>3</sub> , 20ppm bisulfito de sodio	No aplica
Medio		5	5% CaCO <sub>3</sub> , 20ppm bisulfito de sodio	No aplica
Alto		10	10% CaCO <sub>3</sub> , 20ppm bisulfito de sodio	No aplica
Días de riego		3	3	3
Volumen de riego, mL		50	50	50
Periodo, días		14	14	14
Periodo húmedo, días		3	3	3
Volumen para humedecer, mL		50	50	50
Volumen de lavado, L		1.0	1.0	1.0
Flujo de aire, L/min		3.0	3.0	3.0
Duplicado		Sí	Sí	Sí
Temperatura		Ambiente	Ambiente	Ambiente
Presión		Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica
Tiempo de lavado, h		1.0	1.0	1.0

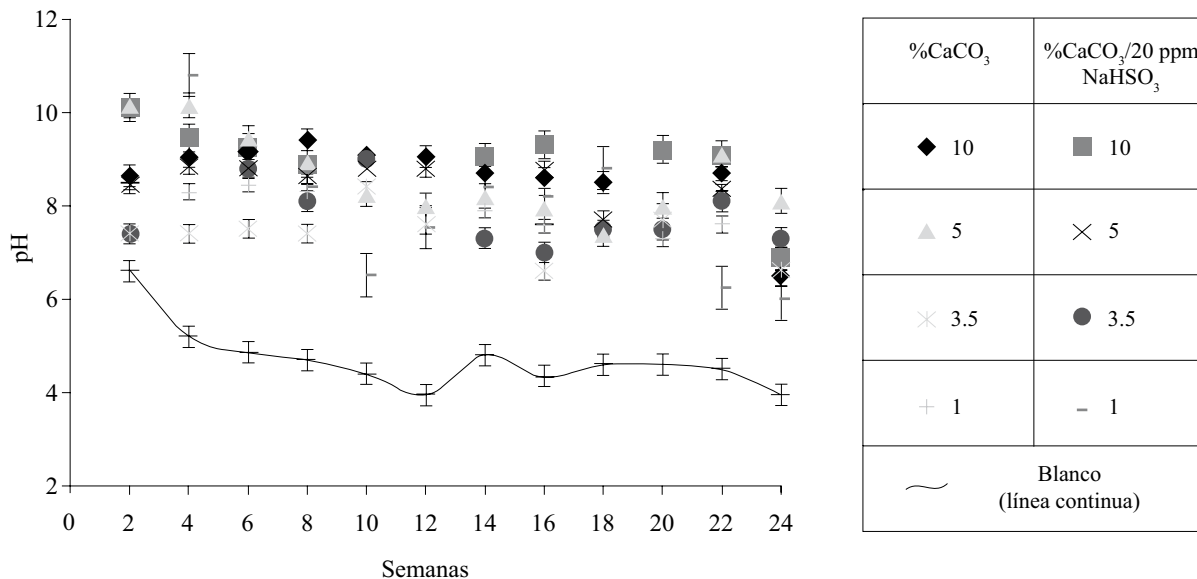
se midieron como variables de control los siguientes parámetros: Valor de pH y concentraciones de hierro, calcio, cobre, plomo, zinc y plata, como los metales de interés. Los resultados obtenidos en la experimentación se analizaron con el paquete computacional Statgraphics (2005), mediante un análisis de la varianza (ANOVA por sus siglas en inglés).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

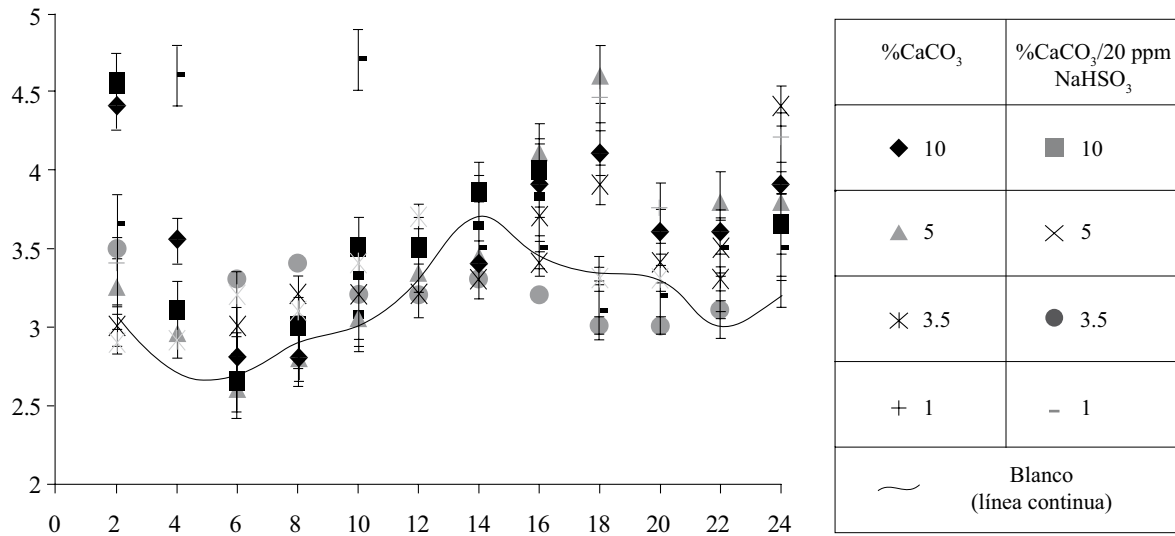
De acuerdo con los resultados obtenidos de las celdas y sus correspondientes réplicas no se encontraron diferencias significativas entre los datos, por lo que se continuó el trabajo con los promedios obtenidos de ellos. La Figura 4, muestra los valores de pH en el sobrenadante de las celdas. Para este caso sí se observa que las celdas con tratamiento son significativamente diferentes a la celda de referencia.

Los sistemas que alcanzan mayor valor de pH son aquellos que tienen 10 y 5% de carbonato de calcio con y sin bisulfito de sodio (en el intervalo de 8 a 9, aproximadamente). Entre estas dos proporciones no hay diferencia significativa. Las celdas con 3.5 y 1% de carbonato de calcio y bisulfito de sodio alcanzan valores en el intervalo de 7 a 8 y tienen diferencia significativa con respecto a las celdas con mayor proporción de carbonato de calcio. Esto indica que las cubiertas retienen el agua del sobrenadante y le confieren un valor de pH consecuente con su concentración.

La Figura 5 presenta los valores de pH en el lixiviado. Para las celdas con cubiertas de calcita se observa que las curvas que representan los valores de pH obtenidos en las celdas con 1, 5 y 10% se alcanzan valores más altos con respecto a los datos de la celda de control, a partir de la semana 16. Los valores de pH en las celdas con 5% de calcita alcanzan un máximo de 3.5 a 4.5. La celda con proporción estequiométrica presenta un comportamiento



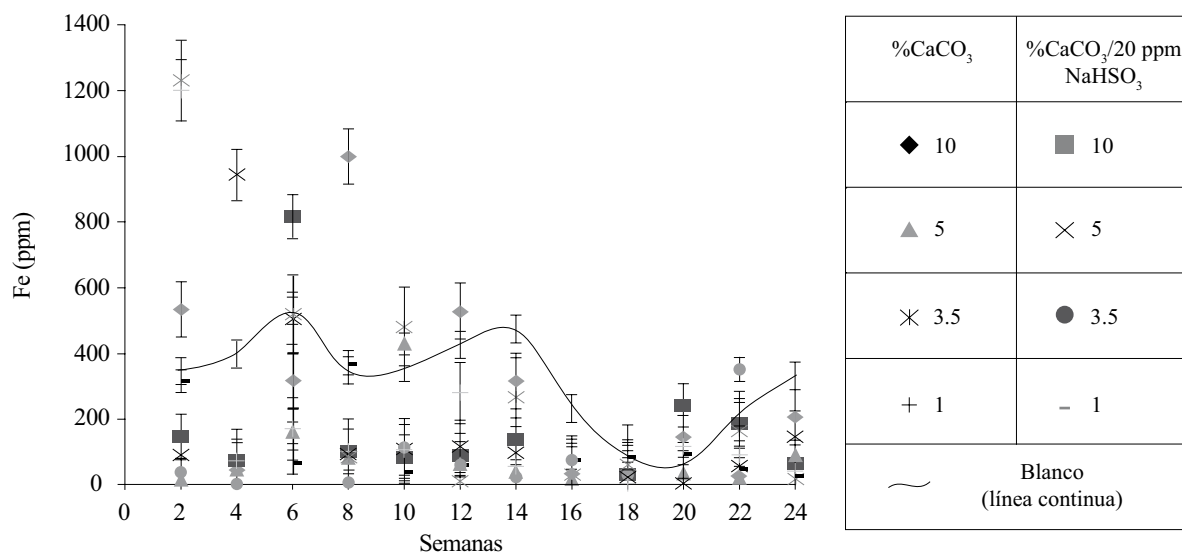
**Figura 4. Valores de pH en el sobrenadante de los reactores**



**Figura 5. Valores de pH en el lixiviado de las celdas**

similar a la celda de control. Para las celdas cubiertas con carbonato de calcio y con bisulfito de sodio con proporciones de 10, 5 y 3.5% de carbonato de calcio se tiene un comportamiento similar a la celda de control. En general, para todos los sistemas, puede observarse que los valores de pH aunque tienden a aumentar con el tiempo, se mantienen con valores ácidos (máximo 5). El análisis estadístico de los estos datos indica que hay diferencias significativas entre las celdas con proporciones de carbonato de calcio de 1% solas y combinadas con bisulfito de sodio y entre estos dos sistemas, el que tiene aditivo de bisulfito de sodio muestra un valor medio mayor al otro aún cuando esta diferencia no es significativa.

En la Figura 6 se presenta la concentración de hierro en los lixiviados Para las celdas sin bisulfito se observa que las concentraciones son menores con respecto al sistema de control. La menor concentración de hierro en los lixiviados puede deberse a que se forman carbonatos de hierro insolubles (Catalan y Yin, 2003; Dold, 1999). En los sistemas combinados con bisulfito de sodio la concentración de hierro en el lixiviado es menor a la celda de control, permaneciendo prácticamente constantes y no mayores de 110ppm, con tendencia a descender con el trascurso del tiempo. El análisis estadístico indica que, en la mayoría de los sistemas, no hay diferencia significativa respecto al sistema de control.



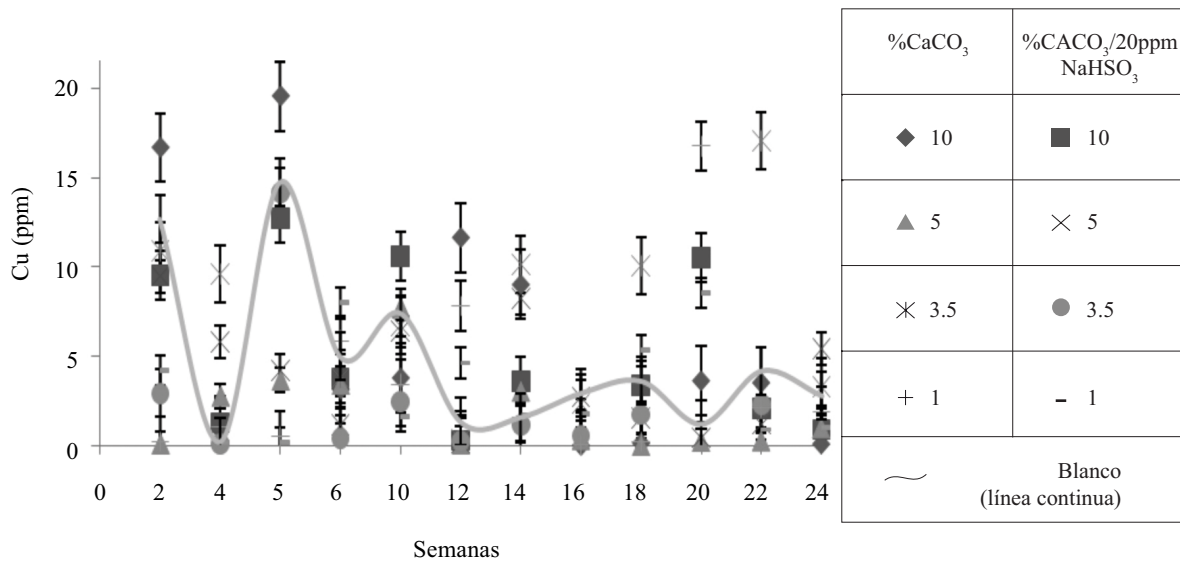
**Figura 6. Concentración de hierro en el lixiviado de los reactores**

En la Tabla 3 se presentan las diferencias entre medias de la concentración de hierro en los lixiviados para cada uno de los tratamientos, con respecto al sistema de control. El signo (\*) indica que entre ese tratamiento y la celda de control hay diferencias estadísticamente significativas y el signo (-) indica que los valores medios de los tratamientos están por debajo del valor de la media del sistema de control. Específicamente para el hierro, todos los tratamientos tienen el efecto de inmovilizar al hierro en los jales y los tratamientos que tienen 5% de carbonato de calcio y 3.5% de material neutralizante combinado con bisulfito de sodio tienen diferencias significativas con respecto del sistema de control.

**Tabla 3**  
*Diferencia entre medias de la concentración de hierro entre los tratamientos*

Hierro							
CaCO <sub>3</sub>				CaCO <sub>3</sub> /20ppm NaHSO <sub>3</sub>			
1%	3.5%	5%	10%	1%	3.5%	5%	10%
-120	-24	-224*	-34	-200	-232*	-123	-131

El signo (\*) indica que entre ese tratamiento y la celda de control hay diferencias estadísticamente significativas y el signo (-) indica que los valores medios de los tratamientos están por debajo del valor de la media del sistema de control



**Figura 7. Concentración de cobre en el lixiviado**

La Figura 7 muestra los datos de concentración de cobre en los lixiviados para las celdas con carbonato de calcio y carbonato de calcio combinado con bisulfito de sodio. Para los sistemas únicamente con carbonato de calcio se observa que la celda con 10% de carbonato de calcio presenta valores mayores con respecto a la celda de control hasta el ciclo 7, a partir del cual tiene un comportamiento semejante al sistema control, muy probablemente por la formación de una capa pasivadora en el carbonato de calcio (Catalan y col., 2002). La celda con 3.5% de carbonato de calcio presenta valores mayores con respecto a la celda de control a partir del ciclo 7. En general, para todas las celdas, los valores tienen tendencia a disminuir, pero en las celdas con tratamiento, se alcanzan picos que superan

a los resultados obtenidos en los sistemas de control. Las concentraciones de cobre en los lixiviados de las celdas cubiertas con carbonato de calcio y con bisulfito de sodio con una proporción de 10 y 1% de carbonato de calcio presentan valores ligeramente mayores con respecto a la celda de control.

La Tabla 4 indica las diferencias entre medias de la concentración de cobre en los lixiviados para cada uno de los tratamientos, con respecto al sistema de control. En ella se puede observar que todos los tratamientos, excepto aquellos con proporción de 10% de material neutralizante, tienen el efecto de inmovilizar al cobre en los jales mientras que aquél que tiene 5% de carbonato de calcio presenta diferencia significativa con respecto al sistema de control.



**Tabla 4**  
*Diferencia entre medias de la concentración de cobre entre los tratamientos*

Cobre							
CaCO <sub>3</sub>				CaCO <sub>3</sub> /20ppm NaHSO <sub>3</sub>			
1%	3.5%	5%	10%	1%	3.5%	5%	10%
-1.36	-2.61	-2.92*	1.2	-1.65	-2.21	-0.92	0.51

El signo (\*) indica que entre ese tratamiento y la celda de control hay diferencias estadísticamente significativas y el signo (-) indica que los valores medios de los tratamientos están por debajo del valor de la media del sistema de control

En la Figura 8 se presentan los resultados de concentración de plomo. Las celdas con 1, 5 y 10% con carbonato de calcio únicamente, muestran concentraciones de plomo mayores con respecto al sistema de control a partir de la semana 16. Para las celdas que tienen cubiertas de carbonato de calcio combinadas con bisulfito de sodio, puede observarse que la celda con 10% de cobertura presenta valores mayores con respecto al control a partir de la semana 8. La celda con 5% de carbonato de calcio y bisulfito de sodio muestra valores mayores con respecto a la celda de control hasta el ciclo 4. Los análisis estadísticos de la concentración de plomo en el lixiviado indican que no hay diferencia significativa entre las celdas con tratamiento con respecto a la celda de control. La Tabla 5 muestra la diferencia entre medias de la concentración de plomo y puede observarse que todas las celdas presentan valores medios mayores con respecto a la media del sistema de control y sólo el sistema con 5% de

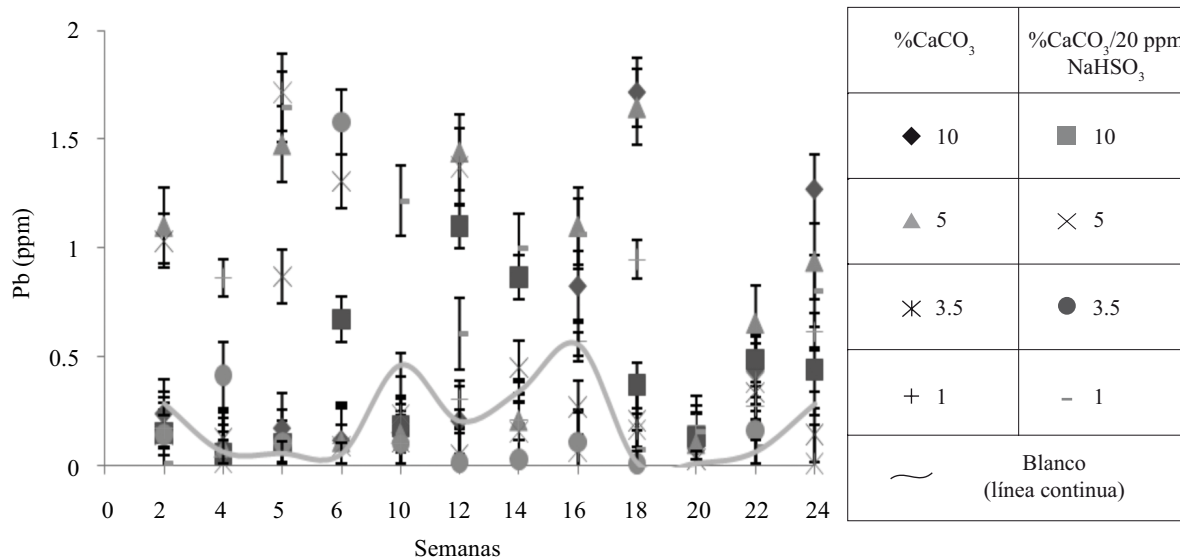
carbonato de calcio es significativamente diferente. Las celdas con 5% de carbonato de calcio y 1% de carbonato de calcio con bisulfito de sodio presentan diferencias significativas con respecto a la celda de control. Este comportamiento indica que el tratamiento con calcita favorece la liberación de plomo en los lixiviados.

**Tabla 5**  
*Diferencia entre medias de la concentración de plomo entre los tratamientos*

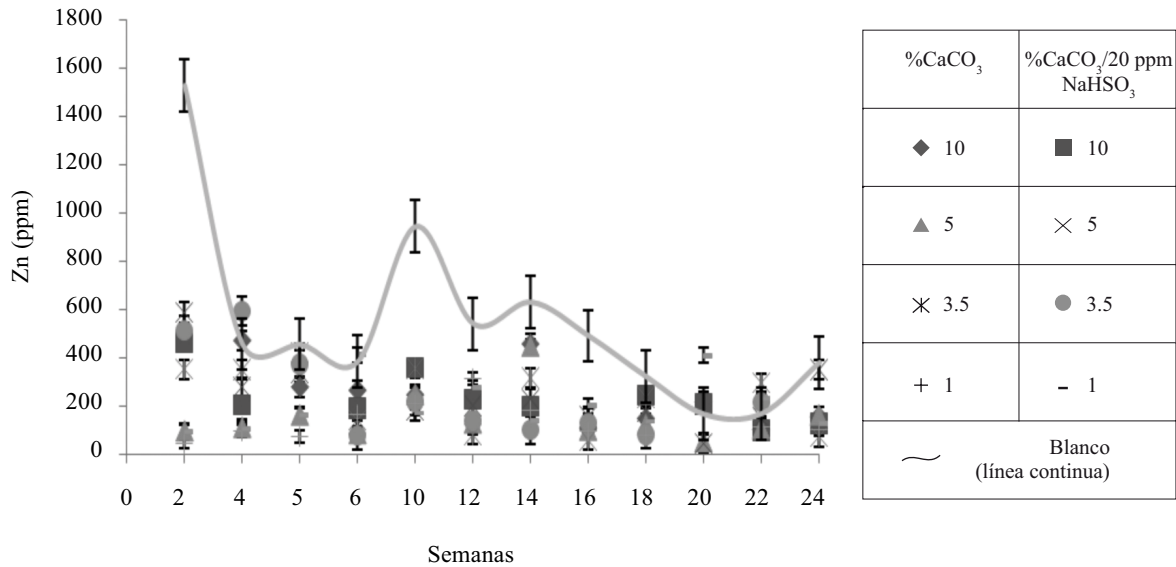
Plomo							
CaCO <sub>3</sub>				CaCO <sub>3</sub> /20ppm NaHSO <sub>3</sub>			
1%	3.5%	5%	10%	1%	3.5%	5%	10%
0.170	0.196	0.552*	0.248	0.369*	0.067	0.211	0.215

El signo (\*) indica que entre ese tratamiento y la celda de control hay diferencias estadísticamente significativas y el signo (-) indica que los valores medios de los tratamientos están por debajo del valor de la media del sistema de control

Los datos de concentración de zinc en los lixiviados de las celdas con carbonato de calcio con y sin bisulfito están en la Figura 9, donde tanto las celdas con cubierta de calcita como las que tienen cubierta de calcita combinada con bisulfito de sodio tienen valores menores con respecto a la celda de control. El análisis estadístico de la concentración de zinc en el lixiviado señala que hay diferencia significativa entre las celdas con tratamiento con respecto a la celda de control. Esto indica que el tratamiento con carbonato de calcio deprime la liberación de zinc en el lixiviado y, probablemente, se debe a que los iones carbonato reaccionan con mayor



**Figura 8.** Concentración de plomo en el lixiviado de los reactores



**Figura 9. Concentración de zinc en el lixiviado**

preferencia con el zinc con respecto a los otros iones metálicos analizados. En la Tabla 6 se observa que, para el zinc, todas las celdas con tratamiento presentan valores mayores y estadísticamente significativos con respecto a la media del sistema de control. Se deduce que los tratamientos con calcita y calcita combinada con bisulfito de sodio favorecen la movilidad del zinc de los minerales en los jales hacia los lixiviados.

**Tabla 6**  
*Diferencia entre medias de la concentración de zinc entre los tratamientos*

Zinc (ppm)							
CaCO <sub>3</sub>				CaCO <sub>3</sub> /20ppm NaHSO <sub>3</sub>			
1%	3.5%	5%	10%	1%	3.5%	5%	10%
-405*	-295*	-385*	-293*	-334*	-294*	-304*	-306*

El signo (\*) indica que entre ese tratamiento y la celda de control hay diferencias estadísticamente significativas y el signo (-) indica que los valores medios de los tratamientos están por debajo del valor de la media del sistema de control

En la Figura 10, se grafica la concentración de plata en el lixiviado de los reactores. Se observa tendencia a aumentar la concentración de este metal a medida que se desarrollan las reacciones de oxidación en los jales y este aumento es aproximadamente tres veces con respecto a la concentración al inicio de la experimentación. Las celdas con 10 y 3.5% de calcita sin bisulfito de sodio presentan valores mayores con respecto a la celda de control. Las celdas con 10 y 5% de carbonato de calcio presentan tendencia a aumentar su concentración mientras que las demás tienden a permanecer estables. Las celdas

cubiertas con carbonato de calcio combinadas con bisulfito de sodio tienen un comportamiento semejante a la celda de control. El análisis estadístico indica que hay diferencia significativa entre las celdas con tratamiento con respecto a la celda de control. Esto indica que el tratamiento con carbonato de calcio, específicamente con 10 y 3.5% favorece la liberación de plata en los lixiviados. La Tabla 7 indica que todas las celdas con tratamiento alcanzan valores mayores de concentración del ión con respecto a la celda de control, lo que indica que este tipo de tratamientos favorece la liberación de los iones de plata hacia la solución, de la cual pueden extraerse con relativa facilidad.

**Tabla 7**  
*Diferencia entre medias de la concentración de plata entre los tratamientos*

Plata (ppm)							
CaCO <sub>3</sub>				CaCO <sub>3</sub> /20ppm NaHSO <sub>3</sub>			
1%	3.5%	5%	10%	1%	3.5%	5%	10%
0.0017	0.016*	0.0063	0.015*	0.0019	0.0057	-0.004	0.0028

El signo (\*) indica que entre ese tratamiento y la celda de control hay diferencias estadísticamente significativas y el signo (-) indica que los valores medios de los tratamientos están por debajo del valor de la media del sistema de control

**CONCLUSIONES**

El transporte de oxígeno a través de los jales y la disolución de la calcita juegan un papel muy importante en el desarrollo de las reacciones de oxidación, pero al trabajar con jales que ya han pasado por un proceso

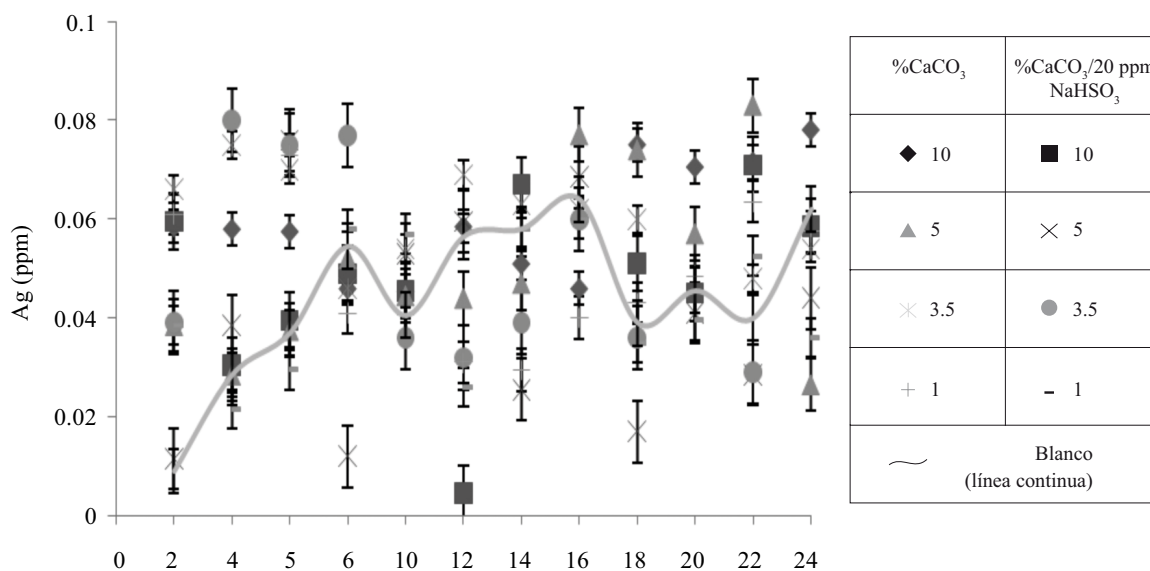


Figura 10. Concentración de plata en el lixiviado

de intemperización se encuentran en ellos productos de este proceso como el hierro II y oxihidroxisulfatos que, al contacto con el agua, se hidrolizan y participan en la liberación de acidez. Esta acidez puede promover la disolución selectiva de algunos iones, como ocurrió con el zinc y la plata. Esto podría representar un posible método de recuperación de estos metales a partir de los jales permitiendo su valorización.

#### RECOMENDACIONES

La siguiente fase de la investigación se orientará hacia obtener soluciones de los metales más concentradas que las obtenidas hasta ahora ya que, por ejemplo, para ser económicamente viable la recuperación de plata por electrodeposición se requiere de una solución 0.5M de nitrato de plata, con el fin de obtener una relación carga-masa económicamente aplicable.

#### RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de la mina cooperante su valioso apoyo en la realización de este proyecto, especialmente al Ing. Alfredo Santana y al Ing. Daniel Torres-Guerrero. El primer autor agradece la beca de maestría del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (233325). Asimismo, reconocen el apoyo colegiado del personal académico y administrativo del Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica y de los Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM.

#### REFERENCIAS

- ASTM. 2007. Standard test method for accelerated weathering of solid material using a modified humidity cell. Designation: D 5744-07. *Annual Book of ASTM Standards. Vol. 11.04*. Environmental assessment; hazardous substances and oil spill responses; waste management. Sección 11. Water and Environmental Technology. Washington, DC, EEUU.
- Aubé, B., Payant, S. 1997. The Geco Process: A new high density sludge treatment for acid mine drainage. En Fourth International Conference on Acid Rock Drainage. Mayo 31-Junio 6. Vol. 1, pp. 165-179. Vancouver, British Columbia, Canadá.
- Audry, S., Blanc, G., Schäfer, J. 2005. The impact of sulphide oxidation on dissolved metals (Cd, Zn, Cu, Cr, Co, Ni, U) inputs into the Lot-Garonne fluvial system (France). *Applied Geochemistry*. 20:919-931.
- Belzile, N., Maki, S., Chen, Y., Goldsack, D. 1997. Inhibition of pyrite oxidation by surface treatment. *The Science of the Total Environment*. 196:177-186.
- Bullock, S. E. T., Bell, F. G. 1994. Ground and surface water pollution at a tin mine in Transvaal, South Africa. En *Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics*. Edmonton, Alberta, Canadá.
- Catalan, L., Buset, K., Yin, G. 2002. Reactivity of oxidized sulfidic mine tailings during lime treatment. *Environ. Sci. Technol.* 36:2766-2777.
- Catalan, L., Yin, G. 2003. Comparison of calcite to quick lime for amending partially oxidized sulfidic mine tailings before flooding. *Environ. Sci. Technol.* 37:1408-1413.
- de Jesús-Mosco, J.L. 2011. Estudio del efecto de una cubierta de calcita en la generación de drenajes ácidos a escala de laboratorio. *Tesis de Maestría en Ingeniería* (Ingeniería Ambiental, Sustancias y residuos peligrosos). PMyDI. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México.
- Dold, B. 1999. Mineralogical and geochemical changes of copper flotation tailings in relation to their original composition and climatic setting implications for acid mine drainage and element mobility.

- Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias.* Ciencias de la Tierra. Universidad de Ginebra. Ginebra, Suiza.
- EPA. 1994. *Acid mine drainage prediction.* Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste. Special Waste Branch. Washington, DC, EEUU.
- González-Sandoval, M. R. 2006. Generación de lixiviados ácidos de jales ricos en pirita. *Tesis de Maestría en Ingeniería* (Ingeniería Ambiental, Sustancias y residuos peligrosos). PMyDI. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México.
- González-Sandoval, M. R., Lizárraga-Mendiola, L., Sánchez-Tovar, S. A., Durán-Domínguez, M. C. 2009. Humidity cell tests: Effect of air flow and cycle duration in the quality of leachates. En *International Conference on Acid Rock Drainage.* Junio 22-26. Skellefteå, Suecia.
- González-Sandoval, M.R. 2010. Procesos de oxidación de sulfuros en una presa de jales. *Tesis de Doctorado en Ingeniería* (Ingeniería Química, Procesos). PM y DI. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México.
- Harris, M., Megharaj, M. 2001. The effects of sludge and green manure on hydraulic conductivity and aggregation in pyritic mine tailing materials. *Environmental Geology.* 41: 285-296.
- INE. 2005. *Fuentes de contaminación en México.* Instituto Nacional de Ecología. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicacioneslibros/372/fuentes.html>
- Khozina, E. I., Sheriff, B. L. 2008. The accumulation of Cu, Zn, Cd, and Pb, in the aquatic biomass of sulphide tailing ponds. *Geochemistry International.* 46(9):897-911.
- Lee, Ch. H., Lee, H. K. 2004. Environmental impact and geochemistry of old tailing pile from the Sanggok mine creek, Republic of Korea. *Environmental Geology.* 47:727-740.
- Mazumdar, A., Goldberg, T., Strauss, H. 2008. Abiotic oxidation of pyrite by Fe(III) in acidic media and its implications for sulfur isotope measurements of lattice-bound sulfate in sediments. *Chemical Geology.* 253:30-37.
- Mendoza-Amézquita, E., Armienta-Hernández, M. A., Ayora, C., Soler, A., Ramos-Ramírez, E. 2006. Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres en el Distrito Minero de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.* 23(1):75-183.
- Reforma. 2009. Suplemento comercial independiente bajo la responsabilidad de CAMIMEX México Minero. Cámara Minera de México. Disponible en: <http://mineroreforma.com>
- Younger, P. L., Banwart, S. A., Hedin, R.S. 2002. *Mine water. Hydrology, pollution, remediation.* Kluwer Academic Publishers. P. 70. Bodmin, Cornwall, Reino Unido.
- Zhang, X., Borda, M., Martin, A., Schoonen, A., Strongin, D. 2003. Pyrite oxidation inhibition by a cross-linked lipid coating. *Geochemical Transactions.* 4(2):8-11.