

## RESUMEN

Se realizó un estudio geoquímico y mineralógico de jales en dos presas y muestras del interior de mina. El yacimiento polimetálico de sulfuros masivos vulcanogénico, se ubica en Zacazonapan, Estado de México.

El objetivo del estudio es valorar su peligrosidad, identificar los principales procesos geoquímicos, y relacionar la mineralogía con la peligrosidad de los mismos.

Se colectaron un total de 18 muestras distribuidas de la siguiente forma:

1. Presa de jales activa, 6 muestras de color gris que no presentan rasgos visibles de oxidación.
2. Presa de jales inactiva, 7 muestras de color café con diferentes grados de oxidación.
3. En interior mina, 5 muestras de sedimentos.

Los minerales residuales sulfurosos de los jales y de las muestras de la mina constituyen una fuente de contaminación de elementos potencialmente tóxicos. Estos materiales se caracterizan por las concentraciones relativamente altas de elementos de naturaleza tóxica: As (315 – 8291 mg/kg), Cd (BLD – 181 mg/kg), Pb (446 – 3043 mg/kg), Zn (1070 – 32644 mg/kg), Cu (83 – 1268 mg/kg) y Fe (14.08 – 45.09 %).

Los jales y las muestras de mina de la zona de estudio son peligrosos por su capacidad para la generación de drenaje ácido. En el caso de los jales de la presa inactiva y muestra de mina, los valores de pH indican que actualmente son generadores de drenaje ácido con valores promedio de pH de 3.37 y 2.98, para la presa inactiva y mina respectivamente.

En el caso de los jales de la presa activa, el promedio de los valores de pH es igual a 4.91 que indica condiciones moderadas de acidez. Los resultados de la prueba de balance ácido-base en estas muestras, indican que en el futuro las condiciones de acidez serán extremas, debido a que el potencial de acidez (PA) es hasta 20-48 veces superior al potencial de neutralización (PN).

Los jales no son actualmente peligrosos desde el punto de vista de toxicidad ya que las concentraciones geodisponibles (solubles) de los EPT, regulados en la normatividad ambiental mexicana NOM – 141 – SEMARNAT – 2003, de los lixiviados son inferiores a los límites permisibles en dicha norma, debido a que están en forma de sulfuros estables o probablemente están retenidos en la fase sólida por precipitación o sorción, lo que podría interpretarse como procesos de atenuación natural que disminuyen la peligrosidad de los jales y obras mineras de la zona de estudio.

## I. INTRODUCCIÓN

En México, el sector minero ha sido importante para el desarrollo económico del país y ha tenido un repunte importante en los últimos años al grado de aportar en la actualidad 4.5 millones de empleos entre directos e indirectos y el 1.6 por ciento del Producto Interno Bruto (García de Quevedo, 2011). La importancia de la minería, en México, data de la época prehispánica y colonial. Prueba de ello son los objetos metálicos encontrados en los sitios arqueológicos, las obras subterráneas antiguas de minas en Zacatecas, los tributos que recibían los aztecas en plata y estaño de parte de las tribus bajo su dominio. Durante el periodo de la Colonia, las actividades mineras en México fueron dibujando su geografía política con la fundación de ciudades importantes como Taxco, Pachuca, Zacatecas, Guanajuato, etc. (Muhech, 2001).

Sin embargo, junto al beneficio económico que se ha obtenido con la realización de actividades mineras, a través del tiempo, existe un proceso asociado con esta actividad que puede ocasionar problemas ambientales severos: la generación de drenaje ácido en los residuos mineros denominados jales y obras mineras abandonadas. Se han reportado problemas de drenaje ácido en diferentes regiones mineras de México (Sommer et. al., 2000; Méndez y Armienta, 2003; Ramos et. al., 2004; Santos, 2006; Romero et al., 2007. Lizárraga, 2008).

Los jales se generan durante el proceso de beneficio (concentración) cuyo objetivo es separar los minerales con valor comercial (concentrado) de aquellos que no lo tienen (ganga), residuo (colas), que se manda a la presa de jales. Los jales que provienen de la explotación de yacimientos de sulfuros metálicos, contienen cantidades residuales de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ) galena ( $\text{PbS}$ ) esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). Esos mismos sulfuros metálicos se pueden encontrar en las paredes de las obras mineras subterráneas o superficiales que se construyen para el minado de yacimientos de sulfuros metálicos. En presencia de agua y aire, la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) se oxida con la subsecuente generación potencial de Drenaje Ácido de Mina (DAM), que tiene como característica un pH bajo y, generalmente, altas concentraciones de sulfatos y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) disueltos como el As, Pb, Cd, Fe, Cu, Zn, etc. Además el DAM puede

contener altas concentraciones disueltas de los llamados elementos de tierras raras (Romero et al., 2010).

Es importante resaltar, que la oxidación de los sulfuros metálicos no siempre genera DAM. La capacidad de los residuos mineros para generar DAM depende del potencial de acidez, que está dado por la presencia de minerales generadores de acidez (pirita, principalmente) y del potencial de neutralización, que está dado por la presencia de minerales alcalinos que consumen acidez (calcita, principalmente). Cuando el potencial de acidez es menor que el potencial de neutralización, la acidez producida durante la oxidación de los sulfuros metálicos es eficientemente consumida por la disolución de los minerales alcalinos, mediante el denominado proceso de neutralización.

Durante los procesos de oxidación-neutralización se favorece la precipitación de minerales secundarios como los Fe-oxihidróxidos, jarosita, yeso y arcillas, los cuales pueden retener, vía sorción, a los elementos potencialmente tóxicos (Levy et al., 1997; Holmstrom y Ohlander, 2001). La sorción de EPT en los minerales secundarios, principalmente Fe-oxihidróxidos, es el principal fenómeno geoquímico que posibilita el proceso conocido como atenuación natural de EPT, que contribuye a la disminución del peligro que representan los EPT para el medio ambiente.

La generación de DAM y su peligro asociado varía en función de los factores geológicos de la zona estudiada. Por ejemplo, en México el drenaje ácido reportado en zonas mineras donde se explotan yacimientos polimetálicos, asociados a vetas hidrotermales, el drenaje ácido se caracteriza por las altas concentraciones de arsénico y metales pesados de naturaleza tóxica (Romero et al., 2008). Sin embargo, en las zonas mineras donde se explotan yacimientos de Fe, del tipo IOCG<sup>1</sup>, el drenaje ácido no contiene arsénico ni metales pesados tóxicos (Luna, 2011). También han reportado que en yacimientos polimetálicos asociados a depósitos tipo skarn o a vetas hidrotermales encajonadas en roca caliza, no propician la generación de drenaje ácido debido a la abundancia de minerales con potencial de neutralización como la calcita y wollastonita (Romero et al., 2008, 2010).

---

<sup>1</sup> Iron–Oxide–Copper–Gold Deposits

Lo anteriormente expuesto, indica que la generación de drenaje ácido y el grado de peligro que representan para el medio ambiente está en función del tipo de yacimiento de la zona estudiada; así como de la mineralogía del yacimiento y de la roca que los aloja.

De acuerdo a la revisión bibliográfica de acceso público, en México, ha sido poco estudiado el fenómeno del drenaje ácido en zonas mineras donde se explotan yacimientos polimetálicos de sulfuros masivos vulcanogénicos, que se caracterizan por un contenido anómalo alto de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que es el principal sulfuro metálico que al oxidarse genera drenaje ácido de mina.

Considerando lo anterior y el hecho de que en México los yacimientos del tipo sulfuros masivos vulcanogénicos han generado cantidades significativas de Zn, Pb, Cu, Ag, Au y Ba (Miranda-Gasca, 1995) y que los recientes descubrimientos de este tipo de yacimientos, en nuestro país, de tonelaje significativamente mayor que los previamente explorados, han renovado el interés por este tipo de yacimientos, se seleccionó una zona minera ubicada en Zacazonapan, Estado de México; donde actualmente se explota un yacimiento polimetálico de sulfuros masivos vulcanogénicos para realizar el presente trabajo de tesis con los siguientes objetivos:

- 1) Evaluar la peligrosidad de los jales y de los sedimentos o lodos de las obras mineras, en función de: i) La concentración total de elementos potencialmente tóxicos (EPT). ii) Capacidad de generación de drenaje ácido y iii) Concentración geodisponible de EPT.
- 2) Identificar los principales procesos geoquímicos, asociados a la generación del drenaje ácido, que ocurren en el sitio de estudio.

Los resultados de este trabajo podrían ser útiles para ser considerados en el análisis de costo – beneficio para el desarrollo de la minería de yacimientos de sulfuros masivos, que actualmente están en la fase de exploración y evaluación de factibilidad.