

Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, Mexico

Yann René Ramos-Arroyo^{1,*} y Christina Desireé Siebe-Grabach²

¹ Facultad de Ingeniería en Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato,
Av. Juárez 77, 36000 Guanajuato Gto., México.

² Laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Circuito Exterior, Delegación Coyoacán, 04510 México D.F., México.

* yannramos2004@yahoo.com.mx

RESUMEN

Se desarrolló una estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en el Distrito Minero de Guanajuato. Se ubicaron los depósitos de jales de cianuración y flotación que existen en la zona y para cada depósito se compiló información respecto a los yacimientos de origen, el método de beneficio y construcción del cual resultaron, y el tiempo que llevan expuestos a la atmósfera. También se describió su situación actual respecto a la erosión. Se escogieron cinco depósitos de jales representativos del origen geológico, para los cuales se describieron y colectaron muestras compuestas superficiales y de perfiles de hasta máximo 1 metro de profundidad. Se determinaron evidencias morfológicas de acidificación en campo (color, textura al tacto, contenido de carbonatos y estructura) y en las muestras se cuantificó el contenido total de cobre, plomo y zinc.

Se encontraron 31 depósitos de jales, los cuales ocupan un área de 81.9 hectáreas y representan 40.3 millones de toneladas. Hay once depósitos de jales de cianuración construidos entre 1905 y 1946, de los cuales cuatro están fuertemente erosionados. Hay veinte presas de jales de flotación 'bulk', cuyos depósitos presentan una clasificación textural: las áreas proximales a la cortina de retención son de textura arenosa, tienen baja capacidad de retención de humedad y están bien aireadas, mientras que las zonas distales a la cortina tienen textura arcillosa, baja permeabilidad y baja capacidad de aireación, lo que permite la acumulación de agua en tiempo de lluvias y favorece condiciones reductoras.

Todos los jales tienen pH alcalino, excepto los horizontes arenosos de un sitio con 75 años de abandono (Pozuelos) con pH de 5, que indica que en condiciones bien aireadas y drenadas se presenta acidificación local.

Las concentraciones de metales en los jales son de medias a altas según normas de diferentes países: 37 a 429 mg/kg de Cu, 13 a 178 mg/kg de Pb y 36 a 448 mg/kg de Zn. El origen geológico de los jales determina las concentraciones de metales, ya que residuos provenientes de menas tipo 'stockwork' tienen menores concentraciones de metales que los extraídos de vetas o brechas. Los jales de flotación presentan una gran variabilidad espacial en sus contenidos de metales relacionada con la clasificación textural dentro del depósito, de tal manera que las zonas proximales tienen concentraciones de metales más bajas que las distales.

La estrategia propuesta fue útil para identificar los factores que determinan la distribución de elementos con potencial tóxico en los jales de la región así como para evaluar el potencial de acidificación. En este caso los factores que controlan las concentraciones de metales fueron el origen geológico y la clasificación textural, mientras que la acidificación es controlada tanto por el origen geológico como por la presencia de humedad y es más favorecida en texturas gruesas.

Palabras clave: jales, riesgo ambiental, potencial tóxico, acidificación, clasificación textural, Guanajuato, México.

ABSTRACT

In this study, the environmental risk of tailings in the Guanajuato Mining District is evaluated. Within the district, cyanadation and flotation tailings were located, and information about geological origin, ore process and construction method, and age was compiled for each tailing; the current erosion situation was also described. Five tailings representative of the different geological origins were chosen, and profiles of maximum one meter depth were described and sampled; composite surface samples were also obtained. In the field, morphological evidences of acidification were registered, and total contents of copper, lead and zinc was quantified in the laboratory.

Thirty-two tailings were identified, which occupy an area of 82.5 hectares and have an estimated weight of 40.3 millions of tons. Eleven correspond to cyanadation tailings deposited between 1905 and 1946, of which four are strongly eroded. Twenty-one are bulk-flotation tailings that show textural variations within the deposit: areas proximal to the dam have a sandy texture, low water holding capacity, and are well aerated, while distal zones have a clayey texture, low permeability, and are not well aerated, constituting zones where water accumulates during the rainy season.

Metal concentrations in tailings range from high to medium according to existing regulations in different countries: 37 to 429 mg/kg Cu, 13 to 178 mg/kg Pb and 36 to 448 mg/kg Zn, and, because of their great volumes, tailings can produce negative impacts to the environment. The geological origin of the tailings determines the metal concentrations: stockwork wastes have lower metal contents than wastes from veins or breccias. Flotation tailings present a large spatial variability in their metal contents which is related to the textural classification within the deposit, with proximal zones having lower metal concentrations than distal ones.

The developed strategy was useful to identify factors that control the distribution of potentially harmful elements in the zone and also to evaluate acidification potentials. The main factors that control the metal contents are the geological origin and the textural classification, whereas acidification is controlled by the geological origin and the presence of water, and is favored by coarse textures.

Key words: tailings, environmental risk, potentially harmful elements, acidification, textural classification, Guanajuato Mexico.

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales de la minería en México son una herencia del pasado. Un gran porcentaje de residuos mineros fueron generados antes de este siglo (en algunos distritos a lo largo de más de 450 años) cuando no existía ningún tipo de legislación y control ambiental. Recientemente (septiembre de 2004) fue aprobada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) una norma para la adecuada disposición de jales, la cual sólo aplica para nuevos proyectos (DOF, 2004). Sin embargo, como producto de la actividad minera pasada, existen cientos de millones de toneladas de jales dispersos en el territorio nacional de los que no se conocen sus condiciones y sus potenciales afectaciones al ambiente. Son escasos los recursos disponibles para realizar diagnósticos ambientales y evaluaciones de riesgo en las múltiples regiones mineras del país. Por ello, resulta imperante desarrollar estrategias para identificar sitios que representen un mayor peligro de dispersión de acidez y de elementos con potencial tóxico (EPT) hacia el ambiente, y poder concentrar los esfuerzos de evaluación de riesgo.

Una actividad prioritaria es ubicar, cuantificar y caracterizar los residuos, tanto de las minas activas como las abandonadas, en los distritos mineros históricos de México. Un caso particular es el Distrito Minero de Guanajuato, en el cual la problemática de los residuos mineros es muy com-

pleja debido a las características geológicas y la historia de extracción (Ramos-Arroyo *et al.*, 2004). En este distrito se han realizado varios estudios sobre la dispersión de metales a nivel regional (Ramos-Posada *et al.*, 1994; Ridgway *et al.*, 1995). También se ha estudiado el potencial económico de los minerales no metálicos que contienen los jales (Ramos-Ramírez, 1991).

García-Meza (2003) realizó un estudio sobre el potencial de restauración de los depósitos de jales de Valenciana, pero en la caracterización sólo describe dos muestras que son poco representativas de la variabilidad espacial que hay en este sitio (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 1998). Carrillo-Chávez *et al.*, (2003) publicaron una evaluación geoquímico-ambiental del distrito y concluyen que los jales no representan un riesgo al ambiente, sin embargo no reportan el número de muestras analizadas ni los sitios de colecta, por lo cual es difícil juzgar su representatividad.

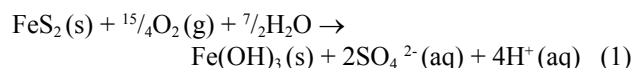
Los yacimientos minerales pueden agruparse según su origen geológico y se esperaría que residuos del mismo origen tuvieran un comportamiento geoquímico-ambiental similar (Plumlee y Nash, 1995). Sin embargo cada depósito de residuos tiene un comportamiento específico debido a la variabilidad espacial en las propiedades, a su vez función de las diferentes zonas explotadas de los yacimientos, de las variaciones de recuperación en los métodos de beneficio y de las condiciones fisiográficas y de drenaje en cada sitio.

Los depósitos de jales son materiales no consolidados

cuyas partículas pueden moverse fácilmente tanto por la acción del viento como por el impacto de las aguas de lluvia (Rorke, 2000). Los depósitos de jales que no presentan obras para desviar el agua de escurrimiento de la cuenca de captación tienen altos riesgos de erosión hídrica. Cuando la lluvia ha caído varios días, los poros tienen un nivel de saturación cercano al 100% y los jales pueden llegar a fluir por efecto de su peso, resultando en pérdida de estabilidad y deslizamiento (Terlien, 1998). Si los jales no contienen cantidades altas de EPT que puedan liberarse, o no presentan condiciones extremas de acidez, alcalinidad o salinidad, pueden ser colonizados por las plantas nativas del sitio (Bradshaw, 1997). El desarrollo natural de la vegetación en jales después del abandono es influenciado por los procesos erosivos, las características químicas del sustrato y el régimen de humedad dentro de los depósitos (Chambers y Sidle, 1991). La cobertura vegetal disminuye la energía del impacto de las gotas de lluvia, además las raíces retienen a las partículas, y la humificación de la materia orgánica ayuda a agregar los granos e incrementa su capacidad de retención de humedad.

Los procesos geoquímicos que se presentan en depósitos de jales y que controlan los niveles de pH e influyen sobre la movilización de EPT hacia otros compartimentos ambientales son:

a) Oxidación de sulfuros que genera acidez. En la Ecuación 1 se muestra la oxidación de pirita por oxígeno disuelto, que considera la hidrólisis del ión férrico (Plumlee, 1999):

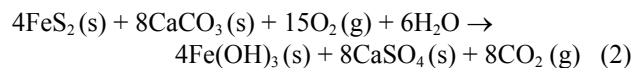


b) Neutralización de acidez por carbonatos y otras fases que cuando se intemperizan generan alcalinidad (Jurjovec *et al.*, 2002).

c) Precipitación de fases minerales secundarias como óxidos, oxihidróxidos, sulfatos e hidroxisulfatos (Nordstrom y Alpers, 1999)

d) Adsorción en superficies de óxidos y oxihidróxidos formados *in situ* (Smith, 1999).

Los minerales depositados no permanecen estables sino que reaccionan hasta que llegan a una situación de equilibrio en función de las condiciones de los sitios. La liberación de iones hidronio (H^+) en los jales depende de la cantidad de minerales con capacidad de generar acidez (principalmente pirita) y para neutralizarla (calcita). En la Ecuación 2 se resume el proceso de oxidación de pirita y neutralización de acidez por calcita que produce yeso y ferrihidrita (Plumlee, 1999):



Los reactivos necesarios para la oxidación son el agua y el oxígeno y su presencia en la superficie de los

jales depende de la granulometría y de la ubicación dentro del depósito, así como de su relación con escorrentías naturales. Evidencias del proceso de oxidación de sulfuros son el pH y la conductividad eléctrica, relacionada con la generación de sulfato. La oxidación se refleja en los tonos rojizos y anaranjados del sustrato por la presencia de óxidos, oxihidróxidos, sulfatos e hidroxisulfatos (Scheinost y Schwertmann, 1999). La formación y acumulación de yeso es una evidencia de que ha habido neutralización de protones por la calcita.

El objetivo general del trabajo consistió en definir una estrategia que permita detectar los factores que controlan la generación de acidez y la distribución de los EPT en los depósitos de jales de cianuración y flotación del Distrito Minero de Guanajuato. Tal estrategia servirá para identificar los sitios que pueden representar un riesgo al ambiente tanto por el aporte de acidez como de EPT. Todos los jales de amalgamación en este distrito se encuentran como sedimentos en el río (Ramos-Arroyo *et al.*, 2004) y no fueron contemplados ya que su estudio rebasa este trabajo. Los objetivos particulares fueron (1) realizar un reconocimiento en campo de los jales de cianuración y flotación en el Distrito Minero de Guanajuato para definir su ubicación, estructura, dimensiones, yacimiento de procedencia, método de beneficio, tiempo de exposición a la atmósfera y su situación actual respecto a la erosión; (2) analizar el potencial de acidificación en sitios de distinto origen geológico usando métodos sencillos de campo; y (3) realizar una caracterización química y mineralógica en muestras de jales y determinar las concentraciones de algunos EPT (Cu, Pb y Zn) para conocer su distribución dentro de los depósitos de jales.

METODOLOGÍA

En la Figura 1 se resume la estrategia general que se desarrolló para seleccionar los depósitos de jales que representan un mayor riesgo de acidificación y liberación de EPT al ambiente en el Distrito Minero de Guanajuato. Se inició con un reconocimiento general en las cartas de INEGI 1:50,000 y se ubicaron los jales que en fotografías aéreas e imágenes de satélite presentaban altos valores de brillantez; con esta información se trazaron rutas para visitar los sitios. Algunos jales de cianuración antiguos sólo pudieron ser localizados gracias a información oral, ya que se encuentran completamente cubiertos de vegetación. Se describen a continuación los métodos aplicados.

Levantamiento de los depósitos de jales

Los jales del Distrito de Guanajuato fueron estudiados en el campo desde julio de 1996 a diciembre de 2000. Se utilizaron tres cartas topográficas INEGI, escala 1:50,000: Nuevo Valle de Moreno F-14-C-42, Guanajuato F-14-C-43

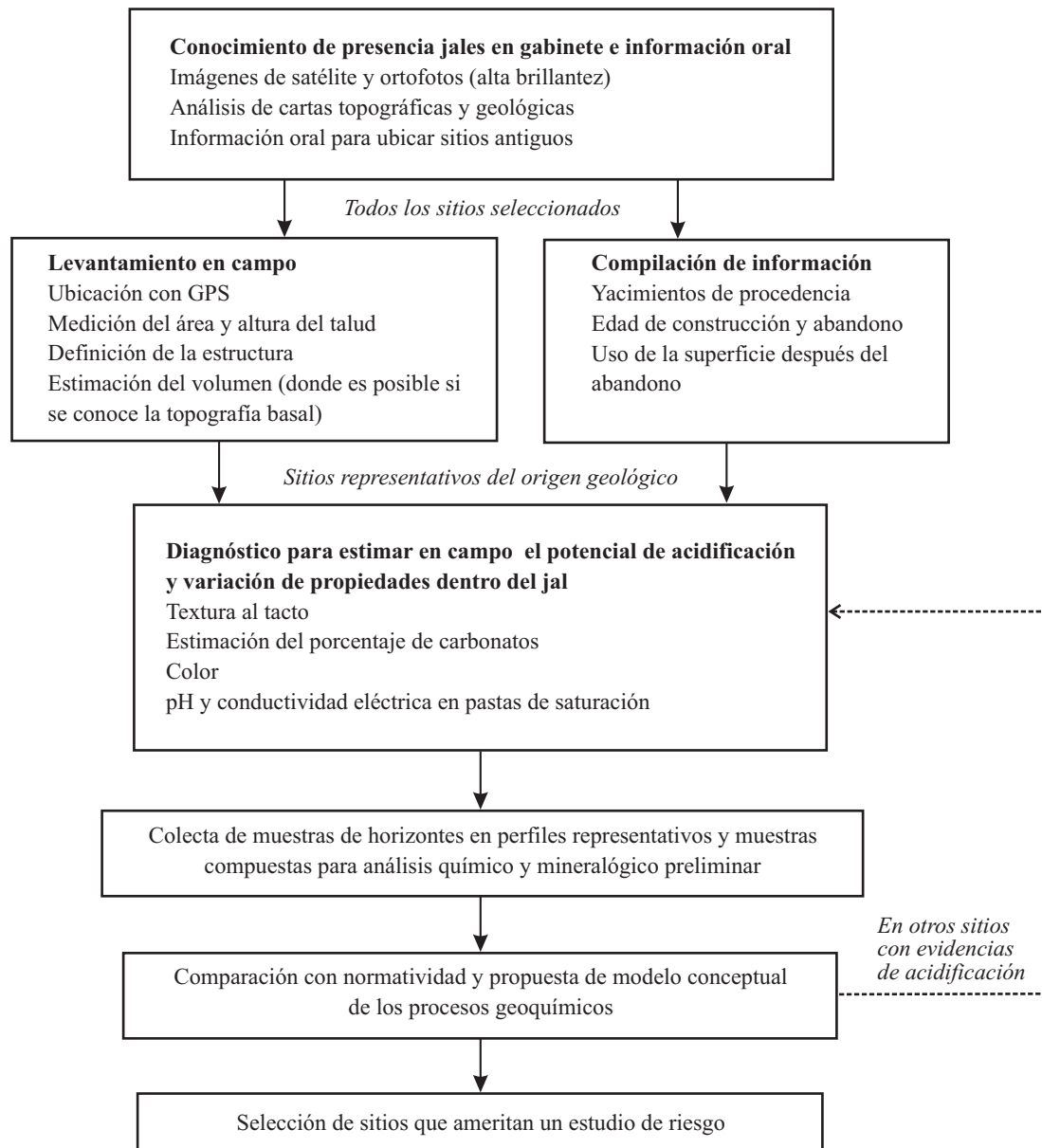


Figura 1. Estrategia general desarrollada para seleccionar los jales que representan un mayor riesgo de acidificación y liberación de EPT al ambiente en el Distrito Minero de Guanajuato.

y Silao F-14-C-53. Se usaron cuatro mapas urbanos a escala 1:5,000 editados en 1975. Para definir la litología se utilizó la carta geológica editada por Martínez-Reyes (1992), además de verificaciones en campo. Se usaron fotografías aéreas, escala 1:37,000, de 1986 donde es posible apreciar los jales que ya existían por sus colores claros.

Se realizaron visitas a los depósitos de jales donde se evaluaron las áreas en superficie y la altura del talud utilizando brújula, cinta métrica y un GPS *Garmin E trex-ventura*. Los volúmenes de depósito se estimaron considerando el área que cubren los jales y la topografía basal, según las cartas de INEGI.

Se compiló información de los archivos de producción

de la compañía minera a la que se tuvo acceso (Sociedad Cooperativa Minero Metalúrgica Santa Fé de Guanajuato No. 1 S.C.L.), así como información oral referente a las características de los residuos en cuanto al origen geológico, método de beneficio, tiempo aproximado de exposición a la atmósfera y al uso del terreno después de que los depósitos de jales fueran construidos y abandonados.

Estimación del volumen de los jales

El volumen en metros cúbicos de los jales se estimó en función del área superficial (longitudinal) del depósito

y la altura del talud. Todos los jales fueron depositados en laderas o en cañadas, de tal manera que el área longitudinal disminuye a profundidad desde la altura de la planicie, factor que debe considerarse en los cálculos. Para los jales que se encuentran en las cercanías de la ciudad de Guanajuato (sitios 3 al 18) fue posible conocer la topografía basal con detalle utilizando mapas urbanos 1:5,000. En los demás sitios, la variación del área longitudinal en función de la profundidad se estimó considerando la pendiente, con apoyo de la topografía basal que se apreció en las cartas escala 1:50,000.

El volumen de cada depósito se estimó considerando una sumatoria de los volúmenes que resultaron al aplicar la Ecuación 3 a cada metro de profundidad del talud hasta completar la altura que hay entre la planicie en la superficie y la base del depósito de jales.

$$\text{Volumen jales (m}^3\text{)}_{\text{cada m profundidad}} = [\text{Promedio del área longitudinal (m}^2\text{)}] [1 \text{ (m)}] \quad (3)$$

Se estimó el área longitudinal promedio cada metro según la variación en la topografía basal.

Para conocer el volumen en toneladas en cada depósito de jales se utilizó la Ecuación 4:

$$\text{Vol (ton) jales} = [\text{densidad jales (ton/m}^3\text{)}] [\text{Vol total (m}^3\text{)}] \quad (4)$$

Los jales presentan porosidad y por lo tanto una densidad que varía con la profundidad, la textura y la presencia de capas cementadas (Blowes *et al.*, 1991). Los jales del Distrito de Guanajuato tienen una porosidad que varía en la superficie de 28% en zonas distales arcillosas de jales de flotación, a 60% en jales antiguos de cianuración donde se ha desarrollado vegetación; la densidad real o peso específico promedio de los jales es de 2.6 g/cm³ (Ramos-Arroyo, 2004). La densidad aparente de los jales del Distrito de Guanajuato varía de 0.9 a 1.7 g/cm³ (Ramos-Arroyo, 2004). Con estos

datos y considerando que son de muestras colectadas en superficie, donde la porosidad es mayor que a profundidad, se asumió una densidad homogénea promedio para todos los jales de 2 g/cm³ y una variación en la densidad de 1.6 a 2.4 g/cm³, por lo que la estimación del volumen arroja un error de ±20%. La unidad de g/cm³ es equivalente a ton/m³ que fue la que se utilizó en el cálculo del volumen.

Descripción de perfiles representativos y colecta de muestras

De los 31 depósitos de jales que se ubicaron, a la fecha de muestreo sólo nueve se encontraban en condiciones de evolución natural, es decir, que después del abandono no fueron regados ni cubiertos con más jales o materiales para estabilizarlos de la erosión (a partir del año 2000, por disposiciones de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, PROFEPA, todos han sido recubiertos con cascajo y suelo). De estos nueve depósitos de jales, se escogieron cinco sitios representativos de las condiciones geológicas de los yacimientos. En la Tabla 1 se describen los factores que diferencian a cada sitio. En cada uno se describió un perfil representativo hasta un máximo de 1 m de profundidad considerando la estratigrafía de los depósitos. En cada estrato se determinó su grosor, el color utilizando tablas estándar Munsell (Munsell Color, 1994), se estimó la textura al tacto y el contenido de carbonatos de acuerdo a la metodología propuesta por Siebe *et al.* (1996). El color es una evidencia de la oxidación de los sulfuros metálicos en jales mineros (Boulet y Larocque, 1998; Shum y Lavkulich, 1998; Shaw *et al.*, 1998), los óxidos de hierro formados se aprecian por tonalidades amarillas, anaranjadas o rojizas (Rowell, 1981; Bigham, 1994, Scheinost y Schwertmann, 1999). Otro proceso que se aprecia mediante el color es la acumulación de materia orgánica debido al oscurecimiento del sustrato (Dobos *et al.*, 1990). Al agregar unas gotas de HCl al 10% a una muestra puede estimarse el contenido de

Tabla 1. Características generales de los jales para cada sitio estudiado.

Factor	San Nicolás LS70	La Luz LL100	Pozuelos VM75	Valenciana-8 VM16	El Cedro VMS0
Origen geológico de los materiales beneficiados	Veta La Sierra, <i>stockwork</i> en mina Asunción	Veta La Luz, vetas de cuarzo y calcita en calizas y granito	Veta Madre, mina Sirena y sedimentos del río Guanajuato	Veta Madre zona central: filones y brechas, 10% oxidadas.	Veta Madre sur, <i>stockwork</i> de calcita y cuarzo en riolita
Edad de abandono	~70 años	~100 años	~75 años	16 años	Recientes
Método de extracción	Cianuración	Cianuración	Cianuración	Flotación <i>bulk</i>	Flotación <i>bulk</i>
Estructura	Apilamiento	Apilamiento; estratificación paralela a pendiente	Terrazas de erosión estratificada	Planicie; gradiente de tamaño de partícula	Planicie; gradiente de tamaño de partícula
Tamaño de partícula	80% > 0.1 mm	50% > 0.1 mm	50% > 0.1 mm	80% > 25 µm	80% > 12.5 µm
Aireación y humedad	BA BCRH	BA BCRH	BA BCRH	Proximal: BA y BCRH Distal: aireación pobre e inundación estacional	Proximal: BA y BCRH Distal: aireación pobre e inundación estacional

BA: bien aireados, BCRH: baja capacidad de retención de humedad.

carbonatos según su nivel de efervescencia; por otra parte, el olor característico de H_2S indica la presencia de piritita secundaria y pone en evidencia el proceso de reducción de sulfato, que ayuda a inmovilizar a los metales (Walton-Day, 1999). A través de la evaluación de la textura al tacto y de las condiciones de humedad es posible definir si los jales se encuentran bien aireados como para tener oxígeno y agua disponibles para la oxidación.

Se colectaron 18 muestras de los horizontes en los perfiles con ayuda de una pala y espátulas, teniendo cuidado de no contaminar la muestra con material de otros estratos. Para conocer la distribución de algunos EPT (Cu, Pb y Zn), se colectaron cuatro muestras compuestas para cada tipo de zona: zonas proximales (jales de cianuración y de flotación) y zonas distales en los jales de flotación; el área de muestreo fue de 25×25 m. En cada área de muestreo se trazó una rejilla, dividiéndola en 12 porciones y en el centro de cada cuadrado se enterró una barrena de 30 cm. Se colectaron los 12 núcleos y se mezclaron por cuarteo sobre un hule de plástico; se tomó aproximadamente 1 kg de la muestra compuesta. Las muestras se guardaron en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas. Se secaron al aire bajo invernadero, se tamizaron a tamaño menor a 2 mm y se almacenaron a temperatura ambiente hasta su análisis.

Métodos de laboratorio

En las 46 muestras colectadas se determinó el pH y la conductividad eléctrica en extractos de pastas de saturación (Black *et al.*, 1965); el contenido de materia orgánica y las concentraciones totales de Cu, Pb y Zn luego de una digestión con *agua regia*. Se determinó la mineralogía por Difracción de Rayos X (DRX) en ocho muestras de los horizontes. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM, excepto los de DRX que se realizaron en el Centro de Investigaciones en Química Inorgánica (CIQI) de la Universidad de Guanajuato.

Para las determinaciones de pH y conductividad eléctrica se pesaron 250 g de muestra en botes de polietileno de boca ancha de 1,000 mL, lavados previamente con HNO_3 al 10% y tres veces con agua destilada. Se agregó agua desionizada haciendo una pasta con ayuda de una espátula hasta saturar los poros, se dejó equilibrar por 24 horas. Posteriormente se filtró al vacío con un embudo Büchner y papel *Whatman* No. 24. En los extractos se analizó el pH con un potenciómetro *Corning* Mod. 10, calibrando con estándares comerciales *J. T. Baker* de pH 4, 7 y 10 y la conductividad eléctrica con un conductímetro *Conductronic* CL8, calibrando con una solución de KCl 0.01 N, que debe dar una lectura de $1,413 \mu S/cm$ a $25^\circ C$.

Para la identificación de las fases minerales presentes, las muestras molidas en mortero de ágata y colocadas en un portamuestra de *plexiglass* se analizaron con un difractor de polvos SIEMENS D-500 bajo las siguientes

condiciones: tubo de cobre FK60-04, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, 35 kV, 30 mA, $V_{\text{papel}} = 2 \text{ cm/min}$; $V_{\text{goniómetro}} = 2^\circ / \text{cm}$; barrido entre 80° y 5° en intervalos de 1° .

Se determinó el contenido de carbono orgánico total (C_{org}) por oxidación con dicromato en medio ácido (Rump y Krist, 1988), utilizando un espectrofotómetro *Spectronic 20 Milton Roy Company* y estándares preparados con glucosa. El contenido de materia orgánica se obtuvo multiplicando el C_{org} por el factor 1.724.

Para el análisis de Cu, Pb y Zn totales, las 46 muestras fueron digeridas con agua regia en parrillas bajo campana de extracción. A 0.5 g de muestra previamente molida en mortero de ágata y depositada en matraces *Erlenmeyer* de 50 mL se agregaron 10 mL de mezcla ácida (proporción en volumen de 75% HCl y 25% HNO_3), se taparon los matraces con vidrios de reloj y se calentó a 60° hasta sequedad repitiendo el tratamiento. Se recuperó el residual del matraz lavando con agua desionizada y transfiriendo a un matraz aforado de 50 mL filtrando en papel *Whatman* No. 24, se aforó a 50 mL con agua desionizada y se leyó la concentración de Cu, Pb y Zn por espectrofotometría de absorción atómica de flama usando un equipo *Perkin Elmer* 503 con lámparas de cátodo hueco. Se utilizaron muestras de un patrón interno del Laboratorio de Edafología Ambiental de un suelo colectado en el Valle del Mezquital para conocer los porcentajes de recuperación del método de digestión. Los porcentajes de recuperación fueron: 96% para Cu, 91% para Pb y 108% para Zn.

RESULTADOS

Ubicación y características generales de los jales

En el Distrito de Guanajuato existen 31 depósitos de jales de cianuración y flotación (Figura 2) que cubren un área total de 81.9 has y representan un volumen de 40.3 millones de toneladas (Mt). En la Tabla 2 se describen sus características y su ubicación se muestra en las Figuras 2 y 3. En el sitio El Cedro hay siete depósitos de jales cuya área y volumen conjunto se describen como el sitio 20 en la Tabla 2. El cálculo del volumen total de jales lleva un error, tanto por variaciones en la densidad de los minerales como en la topografía basal sobre la que se depositaron los jales. Tan sólo por variaciones en la densidad, este error se considera de $\pm 20\%$, por lo que los jales de cianuración y flotación representan de 32.2 a 48.4 Mt.

Condiciones de los sitios y lectura de perfiles

En la Tabla 3 se muestran los valores de pH y conductividad eléctrica obtenidos en extractos de pastas de saturación, el contenido de materia orgánica y las concentraciones totales de Cu, Pb y Zn cuantificadas en laboratorio, así como las determinaciones hechas en campo para las

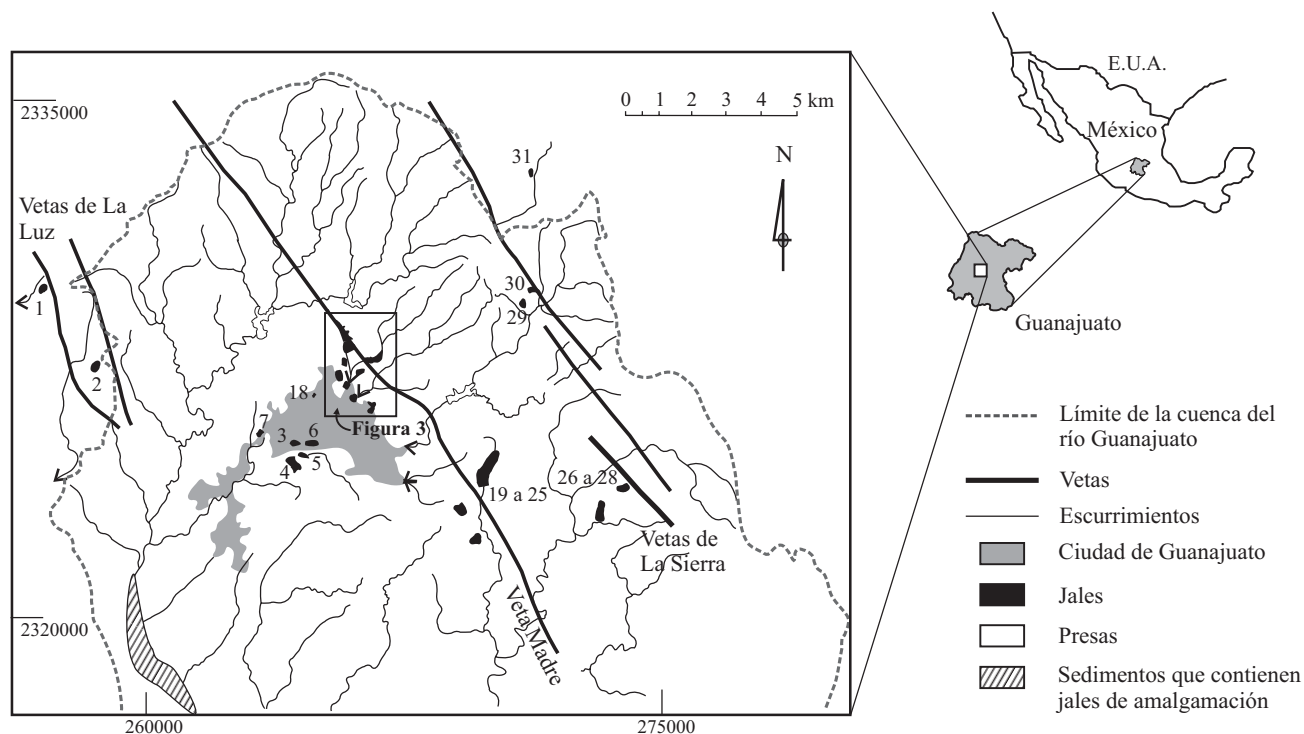


Figura 2. Ubicación de los depósitos de jales de cianuración y flotación en el Distrito Minero de Guanajuato. El recuadro muestra la zona ampliada en la Figura 3.

muestras de los perfiles. A continuación se describen las características en campo de los cinco sitios representativos del origen geológico.

Mineral de La Luz (LL100)

Se encuentran a 10 km al NW de la ciudad de Guanajuato, en la comunidad de La Luz (sitio 1 en la Figura 2). Los residuos, de color blanco, fueron vaciados en una ladera, presentando estratificación paralela a la pendiente, que varía de 15° a 20°. Ocupan un área aproximada de 2 has, el grosor del depósito o la profundidad a la roca basal varía desde 20 hasta 35 m y representan un volumen aproximado de 1.0 Mt. Proviene de la mina La Luz, de la veta La Luz, que contiene un filón de cuarzo y calcita además de brechas mineralizadas; fueron tratados por cianuración y tienen cerca de 100 años de abandono. Se aprecia erosión laminar por impacto de la lluvia y movimiento en masa de material, además de carcavamiento. Se ha erosionado más del 50% del material originalmente depositado. A lo largo de la corriente principal, gradiente abajo se aprecian playas de material erosionado por más de 2 km. La geología que aflora incluye facies de caliza del complejo volcánico-sedimentario de la Sierra de Guanajuato y rocas dioríticas de edad cretácica. Las pendientes abruptas favorecen un drenado rápido y puede existir infiltración por las grietas; muy cerca aflora un manantial debido a un cambio de litología de caliza a diorita.

Es posible distinguir dos tipos de superficies (Figura

4): zonas erosionadas que ocupan un 70% del área y una terraza estabilizada a la erosión por la colonización vegetal que cubre un 30% de la superficie. El tamaño de grano es grueso (50% >200 μm) y el material no ofrece capacidad de retención de agua ni almacenamiento apreciable, por lo que sólo en temporada de lluvias hay disponibilidad de agua para la oxidación de los sulfuros. Se describió un perfil en la zona estabilizada a la erosión en la parte alta del depósito que se encontraba seco y presentaba una inclinación moderada (5%) y exposición al NW. El perfil es homogéneo y las propiedades de los horizontes se describen en la Tabla 3. La colonización tanto por líquenes como por plantas permite la acumulación de materia orgánica (MO) en la superficie y ayuda en la formación de agregados estables a la erosión. En las paredes se aprecia eflorescencia de fases secundarias blancas, posiblemente yeso y óxidos de hierro que ayudan a cementar los granos y a estabilizar los efectos de la erosión. Las sales son sulfatos originados por la oxidación de pirita y neutralización por calcita.

Monte de San Nicolás (LS70)

Son una serie de planicies de jales ubicadas en la comunidad del Monte de San Nicolás a 7 km al NE de la ciudad de Guanajuato (sitio 30 en Figura 2). Tienen una edad de abandono cercana a los 70 años y proceden de la veta Asunción, un *stockwork* en el sistema de vetas de la Sierra de Guanajuato. El material se trató por cianuración, los residuos son de grano grueso (50% >200 μm), y se observa estra-

Tabla 2. Depósitos de jales del Distrito Minero de Guanajuato. Valores de volumen entre paréntesis corresponden a datos proporcionados por personal de la Sociedad Cooperativa Minero Metalúrgica Santa Fé de Guanajuato No. 1, S.C.L.

Sitio (Clasificación)	Ubicación UTM	Altura de la planicie (msnm)	Área depósito (has) Altura talud (m)	Volumen (Mt)	Condiciones de humedad	Método de beneficio, características y situación actual
1 LL100 La Luz (LL- A)	2329740 256636	2,395	2.1 35	1.0 ± 0.1	Fresco en zona alta, seco en el resto	Cianuración, grano grueso, 80% >0.1 mm, más de 20% de calcita, muy erosionados >50% volumen original. Aproximadamente 100 años de abandono, evolución natural.
2 LLM100 Mexiamora (LL-PSD)	2327128 259379	2,350	2.5 20	1.0 ± 0.1	Seco	Cianuración, grano grueso 80% >0.1 mm; muy erosionados >50% volumen original.
3 VMNA70 Facultad Química (VM-PSD)	2324787 264223	1,992	2.1 21	0.9 ± 0.1	Húmedo, son regados	Cianuración de la mina Sirena y sedimentos del río; ~60 años de abandono. Estabilizados con cobertura de pasto, utilizados como campos deportivos
4 VMD70 U Deportiva (VM-PD)	2324695 264515	2,005	6.3 38	2.8 ± 0.3	Seco	Cianuración de la mina Sirena y sedimentos del río; ~65 años de abandono. Estabilizados con cobertura de pasto, utilizados como campos deportivos
5 VM75 Pozuelos (VM-PSD)	2324693 264421	1,995	1.7 22	0.5 ± 0.05	Fresco en zona alta, húmedo en arroyo	Cianuración de la mina Sirena y sedimentos del río. Estratificados, terrazas de erosión, colonización vegetal al 100%. 80% >0.1 mm. ~75 años de abandono, evolución natural.
6 VMNP70 Campo Nieto Piña (VM-PSD)	2325178 264442	2,000	2.2 30	1.3 ± 0.1	Húmedo, son regados	Cianuración, de la mina Sirena y sedimentos del río ~50 años de abandono. Estabilizados con cobertura de pasto, utilizados como campos deportivos
7 VMR70 Hda. Rocha (VM-PSD)	2324843 263850	1,980	0.2 10	0.05 ± 0.005	Seco	Cianuración de la mina Sirena y sedimentos del río, ~50 años. Fueron removidos en fecha reciente.
8 VM44 Cata (VM-PD)	2327194 265746	2,120	1.9 27	0.4 ± 0.05 (0.32)	Húmedo (lluvias)	FB, 79% <0.25 mm. Construidos de 1952 a 1956. Gradiente de tamaño de partícula y estratificados. Se ha vaciado cascajo, basura y aceites sobre ellos.
9 VM38 Presa 2 (VM-PD)	2326841 265607	2,105	4.1 50	0.6 ± 0.05 (0.4)	Húmedo (lluvias)	FB, de 1956 a 1962, 80% <0.25 mm. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula. Utilizados como campos deportivos.
10 VM30 Rayas (VM-PD)	2326608 266609	2,100	2.7 48	0.6 ± 0.05 (0.4)	Húmedo (lluvias)	FB, de 1962 a 1970, 78% <0.25 mm. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula. Soportan instalaciones de la mina de Rayas.
11 VM24 Barrio Nuevo (VM-PD)	2326405 266010	2,084	1.2 10	0.4 ± 0.05 (0.38)	Húmedo (lluvias)	FB, de 1968 a 1976, 78% <0.25 mm. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula. Superficie utilizada para construir unidad habitacional.
12 VM22 Durán (VM-PD)	2326296 266274	2,086	3.5 43	1.3 ± 0.15 (0.42)	Húmedo (lluvias)	FB, de 1972 a 1978, 78% <0.25 mm. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula. Utilizados como campos deportivos,
13 VM20 El Cuarto (VM-PD)	2326750 265712	2,063	1.7 42	0.7 ± 0.05 (0.65)	Húmedo (lluvias)	FB, de 1976 a 1980, 80% <0.25 mm. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula. Campos deportivos y unidad habitacional.
14 VM4 Valenciana-7 (VM-PD)	2327973 265742	2,185	5.4 35	2.0 ± 0.2 (2.00)	Fresco en proximal, húmedo distal	FB, de 1984 a 1994, 80% <0.25 mm. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula Abandonados antes del muestreo, evolución natural.
15 VM16 Valenciana-8 (VM-PD)	2327740 265800	2,150	4.3 55	3.3 ± 0.30 (3.00)	Fresco en proximal, húmedo distal	FB, de 1978 a 1982, 80% <0.25 mm. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula Abandonados antes del muestreo, evolución natural.
16 VM2 Jolula-9 (VM-PD)	2327420 266481	2,110	1.6 40	1.5 ± 0.15 (1.20)	Fresco en proximal, húmedo distal	FB, de 1994 a la actualidad, 80% <0.25 mm. Estratificación y gradiente de tamaño de partícula, evolución natural

Tabla 2. Continuación.

Sitio (Clasificación)	Ubicación UTM	Altura de la planicie (msnm)	Área depósito (has) Altura talud (m)	Volumen (Mt)	Condiciones de humedad	Método de beneficio, características y situación actual
17 VM0 Jolula-9A (VM-PD)	2327656 266752	2,125	0.9 18	0.5 ± 0.05 (0.50)	Drenando agua de proceso	FB, de 2001 a la actualidad, <0.25 mm. Estratificación y gradiente de tamaño de partícula. En construcción
18 VMM Escuela Minas (VM-A)	2326597 265740	2,050	0.15 10	0.06 ± 0.005	Húmedo (son regados)	Cianuración, 80% <0.25 mm, en zona urbana, construcción de Escuela de Minas en su superficie. regados continuamente.
19-25 VMS El Cedro (VM-PD)	232400 269750	2,350	27 35	16.0 ± 1.0	Drenando agua de proceso	FB, 80% <0.125 mm. Complejo de 7 presas de jales. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula.
26-28 LSEC El Cubo (VS-PD)	2323750 273820	2,370	3.8 40	3.1 ± 0.5	Drenando agua de proceso	FB y cianuración. Complejo de 3 presas de jales, cubiertos con vegetación inducida. Estratificados y gradiente de tamaño de partícula.
29 LS65 San Nicolás (VS-A)	2329489 271050	2,360	1.9 38	0.8 ± 0.075	Fresco en zona alta, seco en el resto	Cianuración, apilamiento, abandonados, muy erosionados. Grano grueso, 80% >0.1 mm. Colonizados por pirul, huizache y jara. Aproximadamente 65 años de abandono, evolución natural
30 LS70 San Nicolás (VS-PSD)	2329110 270825	2,320	3.1 40	1.1 ± 0.15	Fresco en zona alta, seco en el resto	Cianuración, planicies abandonadas, estratificadas. Grano grueso 80% >0.1 mm. Tajo de erosión que corta toda la estructura. Colonizados por pirul, huizache, jara. Aproximadamente 70 años de abandono, evolución natural
31 LSSR Santa Rosa (VS-PD)	2332930 271150	2,450	1.0 25	0.4 ± 0.075	Fresco en zona alta, seco en el resto	FB, en construcción, sobre zona de bosque de encinos.

LL: La Luz, VM: Veta Madre, LS: La Sierra, A: apilamiento, PSD: presa sin desviación del drenaje, PD: presa con desviación del drenaje, FB: flotación bulk.

tificación resultante de las etapas de vaciado del material. Ocupan un área de 3 has y representan un volumen total de 1.1 Mt (Figura 5). Este sitio sufrió uno o varios eventos de movilización en masa por lluvia fuerte y se aprecia un tajo de erosión que corta toda la estructura. Se ha perdido del 20 al 25% del material depositado originalmente.

El perfil que se describió estaba expuesto al Sur y se encontraba seco, con una inclinación moderada (5%). Se tomaron en cuenta tres estratos distinguibles por la presencia de raíces. En la Tabla 3 se describen las propiedades de los horizontes en LS70C1, LS70C2 y LS70C3. La conductividad eléctrica aumenta de 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el primer horizonte a 3,050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el segundo y 3,760 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el tercero, que indica lavado de sales hacia abajo. La naturaleza del material ofrece una capacidad media de retención de agua.

Pozuelos (VM75)

Se encuentran a la entrada de la ciudad por la carretera de León e Irapuato, cerca de la cortina de la presa Pozuelos y atrás de la estación de bomberos (sitio 5 en Figura 2). El depósito tiene un área de 1.1 has y un volumen aproximado de medio millón de toneladas. Proceden de sedimentos del río Guanajuato así como de la mina Sirena, en la parte central de la Veta Madre de una zona de brechas y *stockworks*; fueron tratados por cianuración y tienen edad de abandono

de aproximadamente 75 años. Son de grano grueso (50% >200 μm) aunque en el lecho del arroyo se aprecian texturas arcillosas.

Los depósitos forman una terraza moderadamente inclinada (5%) a media altura de una ladera convexa, en lomeríos bajos de pendientes fuertes. Se observan evidencias de erosión laminar por impacto de la lluvia, presencia de cárcavas y movimiento en bloques que da lugar a grietas profundas. Se encuentran completamente cubiertos por vegetación: huizaches, magueyes (*Agave* sp.), cactáceas, pirules (*Schinus mole*), pastos y jaras (*Baccharis glutinosa*); en la superficie también hay crecimiento de líquenes. Durante el depósito se desarrolló una estratificación donde se alternan un horizonte limoso y uno arenoso. Los escurrimientos estacionales dejaron una serie de planicies con diferentes niveles topográficos. Estos jales fueron depositados sobre el conglomerado Guanajuato, el cual, debido a su naturaleza fracturada, puede permitir la infiltración de fluidos de los jales. En la Figura 6 se muestran las diferentes zonas formadas por la erosión las cuales son:

a) Terraza alta. Se describió un perfil de esta zona donde alternan texturas finas con pH alcalino y texturas gruesas con pH ligeramente ácido (5 a 5.5).

b) Talud alto. Acumulación de material derrumbado de la terraza alta, muy poroso con buena infiltración que

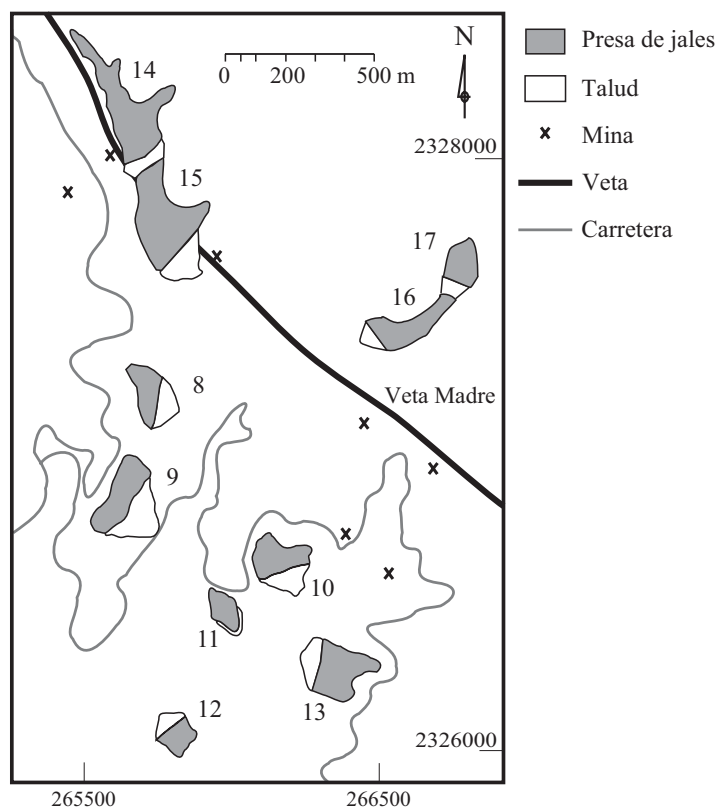


Figura 3. Jales de flotación *bulk* ubicados al norte de la ciudad de Guanajuato.

favorece además la difusión de oxígeno. En los poros de raíces se observan costras de color amarillo (2.5Y 7/8) que en las vías de drenaje constituyen hasta un 30% del volumen total. Estas costras son agregados de óxidos de hierro derivados de la oxidación de pirita.

c) Terraza baja. Las propiedades presentan una gran variación dentro de esta zona relacionada con el drenaje natural. Se observa la tendencia de que a menor contenido de carbonatos, la pedregosidad es más alta así como la conductividad. En esta zona se describió un perfil.

d) Talud bajo. En la pared del talud se observa una estratigrafía muy compleja en relación a la coloración donde se distinguen diferentes etapas de deposición. Los estratos arcillosos están húmedos y se aprecia efluorescencia de sales.

e) Lecho del arroyo. La zona se encuentra húmeda, se observan arrastres tanto de jales como de suelo y rocas de las laderas. La textura es arcillosa y se observan coloraciones de color gris metálico a negro que despiden olor a H_2S al agregar HCl al 10% que sugieren que en esta zona se presentan procesos de reducción de hierro y sulfato. Se estudiaron dos perfiles, uno ubicado en la terraza alta y otro en la terraza baja.

El perfil de la terraza alta (VM75P1) es profundo, bien drenado; el horizonte superior es muy pedregoso por aportes de roca y suelo de la ladera, con alto contenido de MO (5.1%). Hacia abajo, los horizontes se van alternando en se-

ries de estratos limosos y arenosos y tienen bajos contenidos de MO según se aprecia en la Tabla 3. Los estratos limosos tienen pH neutro (6.92 y 7.16), color café amarillento ligero en húmedo (10YR 6/4), bajo contenido de carbonatos (0.5 al 2%) y conductividad eléctrica baja (190 y 250 $\mu S/cm$). Los estratos arenosos tienen color amarillo en húmedo (10YR 6/8), pH ligeramente ácido (6.49 y 5.24), conductividad alta (1,880 y 2,420 $\mu S/cm$) y no contienen carbonatos. En estos horizontes de textura gruesa se observaron agregados anaranjados de 1 cm de grosor que representan 20% del total, además de efluorescencia de sales.

El perfil de la terraza baja (VM75P2) se presenta bien drenado; los tres horizontes descritos son homogéneos, de color café amarillento ligero en húmedo (10 YR 5/4), textura franco arcillo-limosa (CRL), con contenido de carbonatos de 2 a 10% y pH alcalino (7.26, 7.49 y 7.52). La conductividad eléctrica aumenta con la profundidad, de 340, 2,310 a 2,770 $\mu S/cm$, lo que sugiere un lavado de sales hacia abajo en el perfil.

Valenciana-8 (VM16)

En la cañada de Valenciana al norte de la ciudad de Guanajuato hay dos depósitos de jales, a los que se llega por un camino de terracería en el Km. 2 de la carretera a Dolores Hidalgo. Se describió el sitio Valenciana-8 con 16 años de abandono (sitio 14 en la Figura 2). Este depósito tiene un área de aproximadamente 6 hectáreas.

Tabla 3. Propiedades de los horizontes en los perfiles muestreados en depósitos de jales del Distrito Minero de Guanajuato.

Horizonte	Prof. (cm)	Ubicación UTM	Clave color Munsell	Color en húmedo	CaCO ₃ (% en peso)	Clase textural	pH	C.E. (μS/cm)	M.O. (% en peso)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
<i>Sitio LL100</i>												
C1	0-5	2329740 256636	7.5YR 2/2	Café muy oscuro	25-50	CRA	7.23	400	5.96	61.3	47	166
C2	5-12		7.5YR 4/2	Café	25-50	CRA	7.26	280	4.53	52.9	43	145
C3	12-35		7.5YR 4/2	Café	25-50	CLf	7.12	190	5.34	49.3	39	139
<i>Sitio LS70</i>												
C1	0-40	2329110 270825	2.5Y 6/2	Gris pardo claro	2-10	CRA	7.26	280	0.99	128.6	43	136
C2	40-75		2.5Y 6/2	Gris pardo claro	2-10	CRA	7.05	3,050	1.71	387.0	75	121
C3	75-105		2.5Y 6/2	Gris pardo Claro	2-10	CRA	7.94	3,760	0.99	119.0	34	109
<i>Sitio VM75P1</i>												
C1	0-10	2324693 264421	10YR 3/2	Café grisáceo muy oscuro	2-10	CLf	6.70	350	5.1	174.3	134	204
C2	10-30		10YR 5/4	Café claro amarillento	0.5-2	CLg	6.92	190	0.35	188.7	92	125
C3	30-50		10 YR 6/8	Amarillo	0	CA	6.49	1,880	0.15	116.6	162	69
C4	50-65		10 YR 6/4	Café claro amarillento	0.5-2	CLg	7.16	250	0.34	138.2	155	133
C5	65-90		10 YR 6/8	Amarillo	0	CA	5.24	2,420	0.05	92.5	136	47
<i>Sitio VM75P2</i>												
C1	0-18	2324693 264421	10YR 5/4	Café claro amarillento	2-10	CRL	7.26	340	0.75	268.0	178	448
C2	18-40/45		10YR 5/4	Café claro amarillento	2-10	CRL	7.49	2,310	0.47	247.6	170	429
C3	40/45-100		10YR 5/4	Café claro amarillento	2-10	CRL	7.52	2,770	0.47	241.6	130	338
<i>Sitio VM16</i>												
C1	0-0.5/4	2327740 265800	2.5 Y 6/2	Gris pardo claro	2-10	CR	7.58	3,100	0.49	167.1	26	219
C2	0.5/4-8/16		2.5 Y 5/2	Gris pardo claro	2-10	CA	7.36	1,100	0.31	144.2	22	153
<i>Sitio VMS0</i>												
C1	0-4	2324530	5Y 5/1	Gris	10-25	CRA	7.52	1,010	0.35	74.5	13	36
C2	4-20	269750	5Y 5/1	Gris	10-25	CA	7.39	890	0.16	72.1	13	36

C.E.: Conductividad eléctrica; M.O.: materia orgánica. Clases texturales: CRA: franco arcillo-arenosa, CLf: franco limosa fina, CLg: franco limosa gruesa, CA: franco arenosa, CRL: franco arcillo-limosa, CR: franco arcilloso.

Los jales, con un volumen de 3.3 Mt, son residuos del proceso de flotación *bulk* con tamaño de grano que en el 80% es <250 μm; los residuos proceden de cuatro minas de la parte central de la veta Madre. Debido al mecanismo de construcción (aguas arriba) se aprecia un desnivel de aproximadamente 2 m desde la cortina de la presa hacia la zona distal. En las zonas distales hay acumulación de agua que escurre en toda la planicie y de las sustancias arrastradas en solución; estas zonas tienen textura arcillosa y son impermeables presentando inundación estacional. Cuando esta zona se encuentra inundada se aprecian coloraciones azules y gris metálico del ión ferroso así como agregados negros que al reaccionar con HCl desprenden un olor característico a sulfuros, evidencia de la reducción de sulfato. En tiempo de secas, las arcillas se fracturan permitiendo la difusión de oxígeno, por lo que es muy posible que existan

ciclos estacionales de oxidación y reducción.

Se describió un perfil en la zona media (Figura 7), con exposición al Este y 5% de inclinación. Los estratos arenosos se encontraban secos y los arcillosos húmedos, observándose en estos últimos eflorescencia de sales. Las condiciones de aireación y capacidad de retención de humedad contrastan entre los estratos arenosos, bien aireados y con baja capacidad de retención de humedad, y los arcillosos, que retienen agua y están pobremente aireados. Se describieron sólo los dos primeros horizontes, uno arcilloso (VM16PC1), delgado, con 0.5 a 4 cm de grosor, color gris pardo ligero en húmedo (2.5Y 6/2), con contenido de carbonatos de 10 a 25%, pH de 7.58 y conductividad eléctrica de 3,100 μS/cm. El horizonte arenoso (VM16PC2) tiene el mismo color, 0.5 al 2% de carbonatos, pH de 7.36 y conductividad de 1,100 μS/cm.

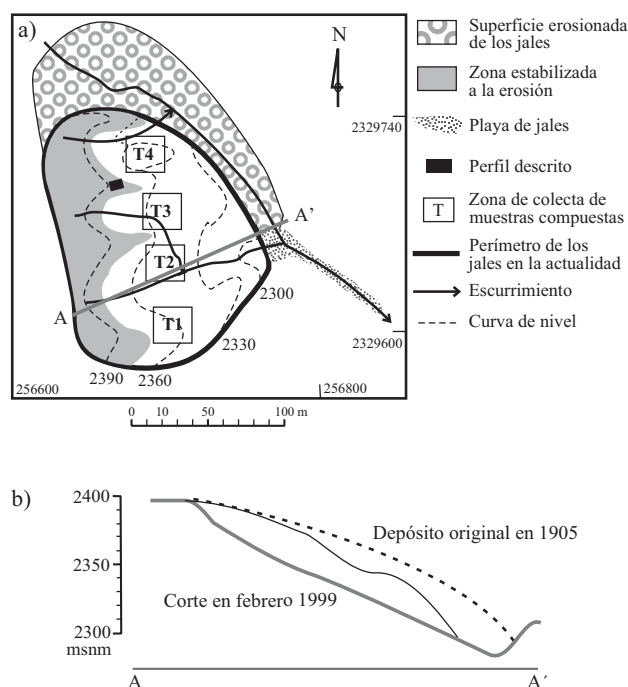


Figura 4. a) Plano del depósito de jales de La Luz (LL100); las playas de jales se extienden por más de 2 km. b) Corte transversal.

El Cedro VMS0

Al este de la ciudad de Guanajuato, en la comunidad de Calderones, existen siete planicies de jales que en total ocupan un área de 29 has, con un volumen aproximado de 16 Mt (sitios 19 a 25 en Figura 2). Se describió el depósito más reciente ya que las otras planicies se riegan continuamente. El depósito descrito contiene residuos del proceso de flotación *bulk* con tamaño de grano del 80% <125 μm , tiene forma de terraza rellenando una cañada y presenta una altura del talud de 30 m. En la Figura 8 se ubica el depósito de jales que fue descrito y los sitios donde se colectaron las muestras. El perfil se encontraba seco con exposición al Oeste, se aprecia eflorescencia de sales en estratos arcillosos y una capa muy delgada (1 mm) de color rojo de óxidos entre estratos arcillosos y arenosos que evidencian la oxidación de pirita. Se describieron sólo dos horizontes cuyas propiedades se muestran en la Tabla 3.

Mineralogía por DRX

En la Tabla 4 se muestra la composición mineralógica de ocho muestras de los horizontes en los perfiles. Los minerales mayoritarios son los mismos en todos los jales pero en diferentes proporciones: cuarzo del 50 al 80 %, feldespato potásico del 5 al 10 %, plagioclasa mayoritariamente cálcica del 5 al 10 % y calcita del 0 al 25 %.

La muestra de La Luz (LL100C2) tiene las señales más fuertes para calcita y le siguen en intensidad las dos

muestras de El Cedro (VMS0C1 y VMS0C2) procedentes de un yacimiento de *stockwork* emplazado en riolitas propilitizadas, donde la calcita es el principal mineral en la ganga (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

Las señales para los minerales arcillosos son mayores en las muestras colectadas en los horizontes de textura fina tanto de Valenciana-8 (VM16C1) como del El Cedro (VMS0C1), esto sugiere que las zonas con textura fina en los jales se encuentran enriquecidas en minerales arcillosos.

Sólo se aprecia pirita en los jales de depósito reciente en El Cedro (muestras VMS0C1 y VMS0C2) y en el horizonte de textura fina en Valenciana-8 (VM16C1), esto puede deberse a que aún no se oxida la pirita y a que en los estratos de textura fina no hay difusión de oxígeno que favorezca la oxidación.

Análisis de cobre, plomo y zinc totales

En las tres últimas columnas de la Tabla 3 se muestran los contenidos de cobre, plomo y zinc totales en las muestras de perfiles, y en la Tabla 5 las concentraciones para estos mismos metales en las muestras compuestas. El menor contenido de cobre (49.3 mg/kg) se encontró en La Luz y el mayor en San Nicolás (387 mg/kg). Las muestras de El

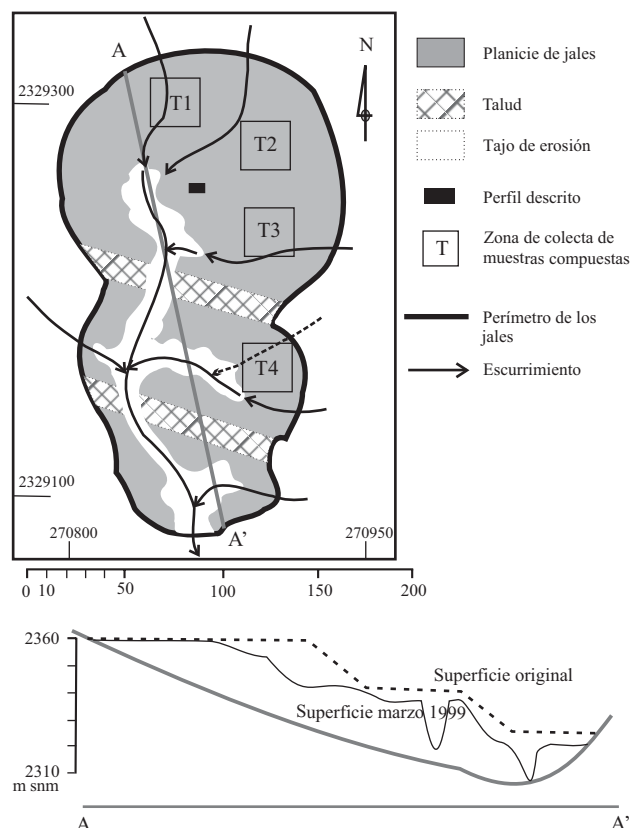


Figura 5. Plano y corte transversal del depósito de jales del mineral del Monte de San Nicolás (LS70).

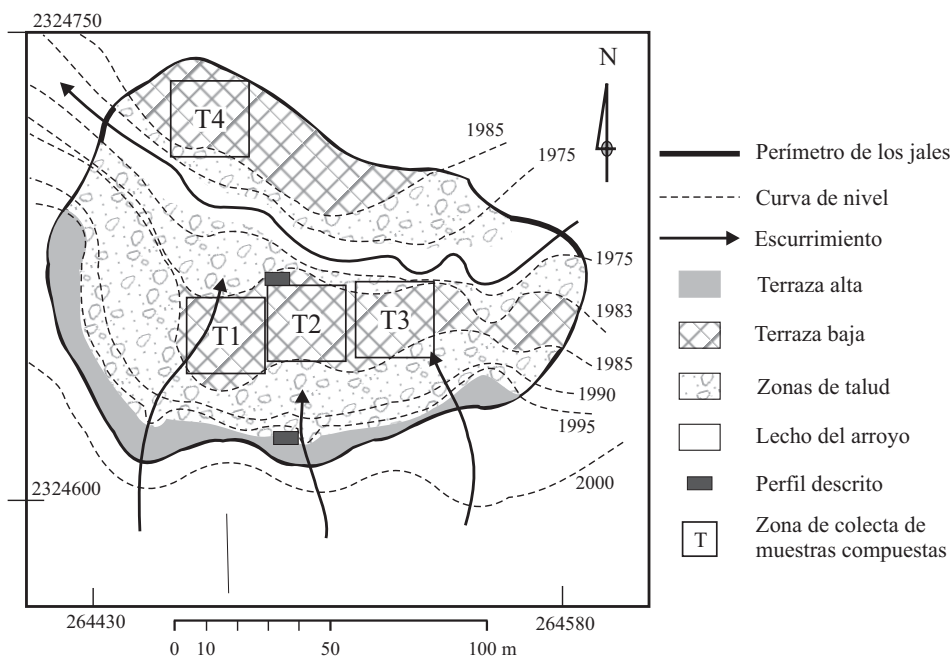


Figura 6. Plano del depósito de jales de Pozuelos (VM75).

Cedro son las que tienen las menores concentraciones tanto de plomo como de zinc (13 y 36 mg/kg respectivamente); en este caso, la molienda fina durante el proceso de beneficio (80% <125 μm) debe favorecer una mejor recuperación de los sulfuros respecto a los otros sitios. Otra razón de las bajas concentraciones puede ser que la zona del yacimiento de donde provienen estos jales es un *stockwork* con bajos contenidos de sulfuros metálicos (Mango, 1992). Las concentraciones mayores para Pb y Zn se encontraron en

la muestra del horizonte 1, perfil 2 de los jales de Pozuelos (178 y 449 mg/kg respectivamente). En la Figura 9 se aprecian los promedios con su desviación estándar para las muestras compuestas de La Luz (LL100), San Nicolás (LS70) y Pozuelos (VM75P1 y VM75P2). Estos resultados muestran que los jales tienen una gran variabilidad espacial en sus propiedades. Más adelante se discutirán los niveles de metales comparados con normas vigentes en diferentes países y los riesgos ambientales que pueden representar.

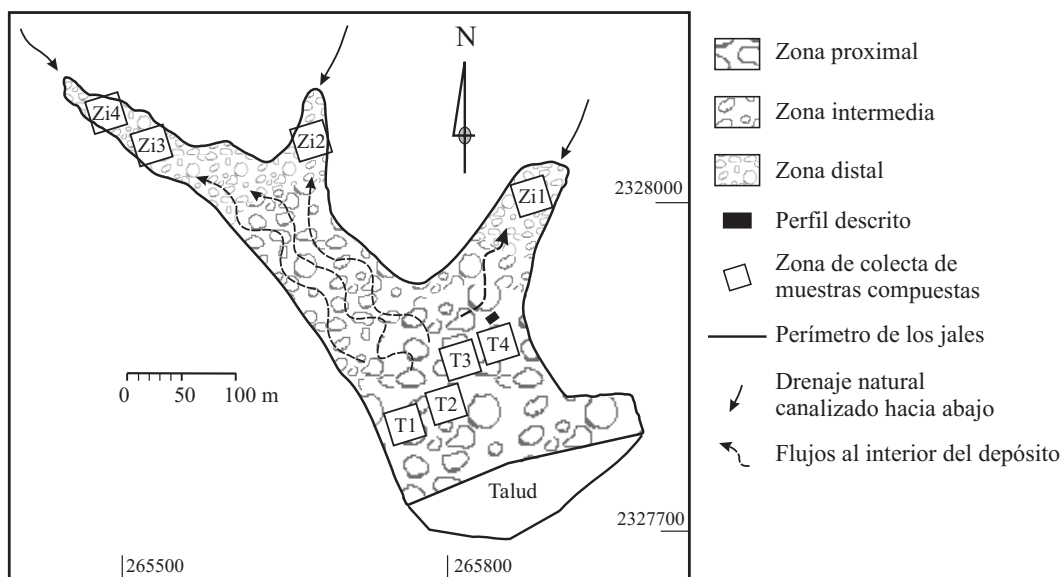


Figura 7. Plano del depósito de jales de Valenciiana-8 (VM16). Zi: Muestras compuestas en zona distal; T: muestras compuestas en zona proximal.

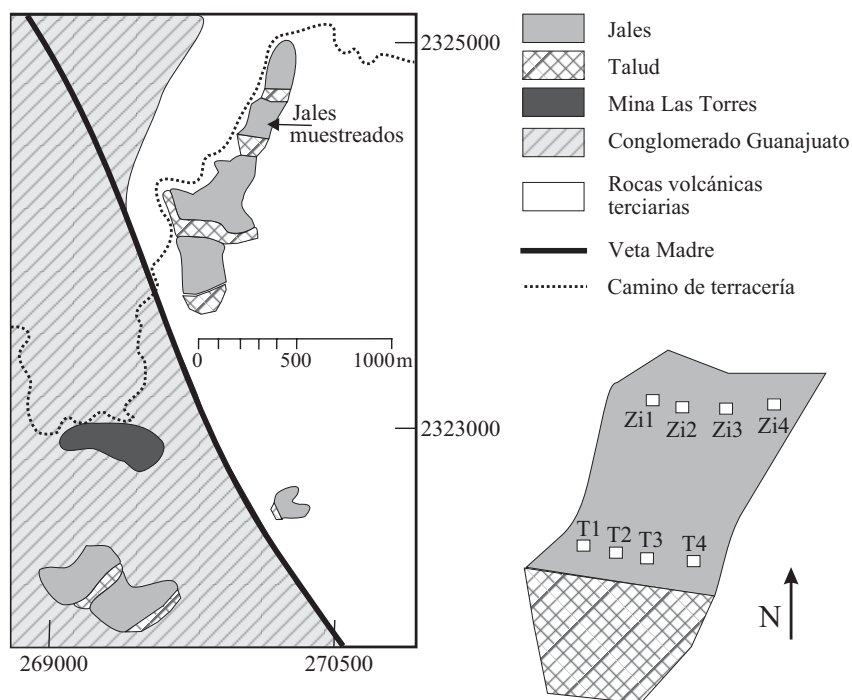


Figura 8. Jales de flotación *bulk* ubicados en la comunidad de El Cedro (VMS0). En la figura ampliada se muestra la localización de los sitios de colecta de muestras compuestas de la zona proximal (T1-T4) y distal (Zi1-Zi4) del depósito. El perfil descrito se encuentra entre las zonas de colecta de las muestras T1 y T2.

DISCUSIÓN

Clasificación de los residuos

El volumen total de jales que se encuentra en el distrito, y que sugiere la historia de extracción, es de 95 Mt (Ramos-Arroyo *et al.*, 2004). En este trabajo se contabilizaron de 32.2 a 48.4 Mt sólo de jales de cianuración y flotación *bulk*. Los residuos de amalgamación fueron vaciados al río y se requiere de una caracterización de los sedimentos en la cuenca del río Guanajuato para conocer su extensión y cantidad; al menos se ha documentado la presencia de 20 Mt en la planicie aluvial de la comunidad de Santa Teresa (COREMI, 1992), cuya ubicación se muestra en la Figura 2. En el distrito también se encuentran dispersos más de 20 depósitos de terreros o materiales de baja ley que tienen grano grueso; la ubicación y caracterización de estos depósitos requiere de otro estudio.

Las rocas que afloran en el Distrito de Guanajuato no tienen carbonatos, excepto las que presentan alteración propilítica y las facies de caliza del complejo volcánico sedimentario de la Sierra de Guanajuato. En todas las vetas del distrito hay calcita y este mineral no es eliminado en los procesos de beneficio, por lo que permanece en los jales. Un método muy sencillo para cartografiar la extensión de los residuos de amalgamación sería la estimación del contenido de calcita por medio de la eferescencia con HCl al 10% en los sedimentos del río, tal como lo propusieron Rowan *et al.* (1995) y Miller (1997).

Una estimación exacta del volumen total de los jales debe desarrollarse a través de sondeos eléctricos verticales en cada sitio, que aparte de definir la profundidad a la roca basal, ayudaría a detectar la profundidad de la zona saturada y la presencia y extensión de capas cementadas, las que restringen la difusión de agua y oxígeno (Blowes *et al.*, 1991).

Conforme transcurre el tiempo, los jales son colonizados por la vegetación nativa; las plantas que crecen en las laderas no disturbadas extienden sus raíces hacia los depósitos. En depósitos de jales sin vegetación, los polvos en la superficie son fácilmente removidos por las tolvaneras que transportan materiales finos hacia afuera de la estructura, depositándose en los suelos cercanos, además de redistribuir

Tabla 4. Mineralogía de algunas muestras de jales. Ca: calcita, Sm: esmectita, K: caolinita, Pi: pirita, Y: yeso, Cl: clorita.

Muestra	Mineralogía
LL100PC2	Ca, Sm, K
LS70PC1	Ca, Sm.
VM75P1C4	Sm, K, Ca, Pi
VM75P1C5	Y, Sm
VM16PC1	Sm, K, Ca
VM16Z14	Sm, Cl, K, Ca, Pi
VMS0PC1	Sm, Cl, K, Ca, Pi
VMS0Z12	Sm, Cl, K, Ca, Pi

los materiales dentro de los depósitos. Coffey *et al.* (1986) proponen que la estratificación y una fuerte pendiente en los taludes aumenta la cizalla entre las partículas, incrementando las tasas de erosión. A continuación se resumen las características de los jales de cianuración y flotación:

Jales de cianuración

Se ubicaron 11 depósitos con tamaño de grano grueso por lo que se encuentran bien aireados y con baja capacidad de retención de humedad. Al construirse no se contemplaron obras de desviación del drenaje en las cuencas de captación y reciben toda el agua de escurrimiento presentando alto riesgo de erosión hídrica. Tres de estos depósitos de jales han perdido por erosión más del 25% de los materiales originalmente depositados (La Luz-LL100, San Nicolás-LS70 y Pozuelos-VM75). Estos depósitos son sistemas abiertos y los materiales que se erosionan son arrastrados por varios kilómetros, habiendo también liberación de sustancias disueltas. La erosión hídrica depende de las condiciones geográficas y climatológicas del sitio, así como también de la geoforma de los depósitos (Osterkamp y Troy, 1997) y al mecanismo de construcción, ya que jales vaciados debajo de plantas de beneficio y con estratigrafía paralela a la pendiente son fácilmente erosionables. Aparte de la vegetación, la erosión es disminuida por la presencia de agregados minerales. La estabilidad de los granos aumenta al estar presentes sustancias cementantes como óxidos de hierro, yeso y materia orgánica.

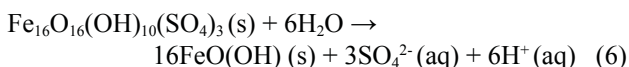
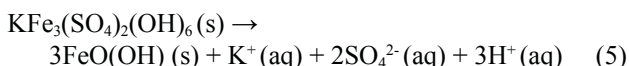
Jales de flotación "bulk"

Se ubicaron 20 depósitos de este tipo de jales, todos contruidos por el método de aguas arriba. Son estructuras con una cortina de materiales gruesos y con obras para la desviación del drenaje natural, el cual se canaliza debajo de los residuos. Durante el depósito drenan las aguas de proceso que contienen residuos de los reactivos de flotación y los solutos que resultan de la oxidación de los sulfuros presentes; en los drenajes de los jales también se observaron flóculos de oxihidróxidos de hierro en suspensión. Durante la construcción de la presa de jales se desarrolló una estratificación muy compleja y una clasificación de tamaños de partícula, de tal forma que hay dos zonas con una hidrología contrastante: proximal y distal a la cortina de retención. En la zona proximal, la limitante para la oxidación es la humedad ya que está bien aireada y se aprecian zonas donde efloran sulfatos secundarios y precipitan oxihidróxidos de hierro. En la zona distal hay acumulación de solutos y se presentan procesos estacionales de reducción de hierro y sulfato.

Condiciones de acidificación en los jales estudiados

La única muestra en la cual se observó pH ácido fue colectada en un horizonte arenoso del perfil ubicado en la terraza alta de los jales de Pozuelos (VM75P1C5); este perfil se encuentra cercano a un escurrimiento natural.

El horizonte tiene pH de 5.2 y conductividad eléctrica de 2,420 $\mu\text{S}/\text{cm}$, textura franco arenosa, no tiene carbonatos y presenta coloraciones amarillas y anaranjadas que indican la presencia de óxidos e hidrosulfatos de hierro [posiblemente jarosita, $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$, o schwertmannita, $\text{Fe}_{16}\text{O}_{16}(\text{OH})_{10}(\text{SO}_4)_3$] que al disolverse generan acidez por hidrólisis (Dold y Fontboté, 2002):



Los horizontes localizados arriba y abajo son de textura franco limosa fina, con bajo contenido de carbonatos y pH alcalino. Posiblemente debido a la textura del perfil hubo un flujo de agua preferencial en el horizonte arenoso que favoreció la oxidación de pirita, con lo cual se consumió la calcita original hasta agotarse y se formó yeso (Ecuación 2); este último mineral se detectó por DRX.

En los estratos arcillosos de todos los jales pueden

Tabla 5. Características físicas y químicas de las muestras compuestas. La ubicación de los sitios de colecta de estas muestras se presenta en las Figuras 4-8. C.E.: conductividad eléctrica; M.O.: materia orgánica.

Muestra	pH	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	M.O. (%)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
LL100-T1	7.45	155	1.15	54.1	25	83
LL100-T2	7.57	188	1.32	37.3	30	120
LL100-T3	7.87	213	1.01	66.1	55	154
LL100-T4	7.60	140	0.36	49.3	17	86
LS70-T1	7.51	2456	1.14	88.9	49	162
LS70-T2	7.80	244	1.33	98.6	53	190
LS70-T3	7.58	2496	1.01	85.3	44	162
LS70-T4	7.64	913	1.34	96.1	55	167
VM75-T1	7.41	2651	0.74	245.2	146	352
VM75-T2	7.40	2440	0.49	216.3	153	355
VM75-T3	7.48	1102	0.47	203.1	98	204
VM75-T4	7.54	1865	0.77	213.9	102	224
VM16-T1	7.57	1937	0.36	141.8	23	144
VM16-T2	7.57	440	0.33	122.6	19	127
VM16-T3	7.31	1703	0.37	150.2	26	125
VM16-T4	7.62	621	0.29	282.4	47	152
VM16-Zi1	7.44	2666	0.69	276.4	47	171
VM16-Zi2	7.69	3190	0.81	266.8	45	152
VM16-Zi3	7.62	3495	0.81	226.0	40	108
VM16-Zi4	7.66	3333	0.94	429.1	80	194
VMS0-T1	7.38	871	0.25	64.9	13	32
VMS0-T2	7.57	347	0.20	78.1	19	41
VMS0-T3	7.52	536	0.10	62.5	15	33
VMS0-T4	7.39	433	0.17	67.3	15	33
VM-Zi1	7.47	2870	0.44	67.3	23	45
VM-Zi2	7.47	2594	0.59	57.7	19	41
VM-Zi3	7.46	1991	0.63	60.1	23	43
VM-Zi4	7.40	2370	0.79	66.1	23	44

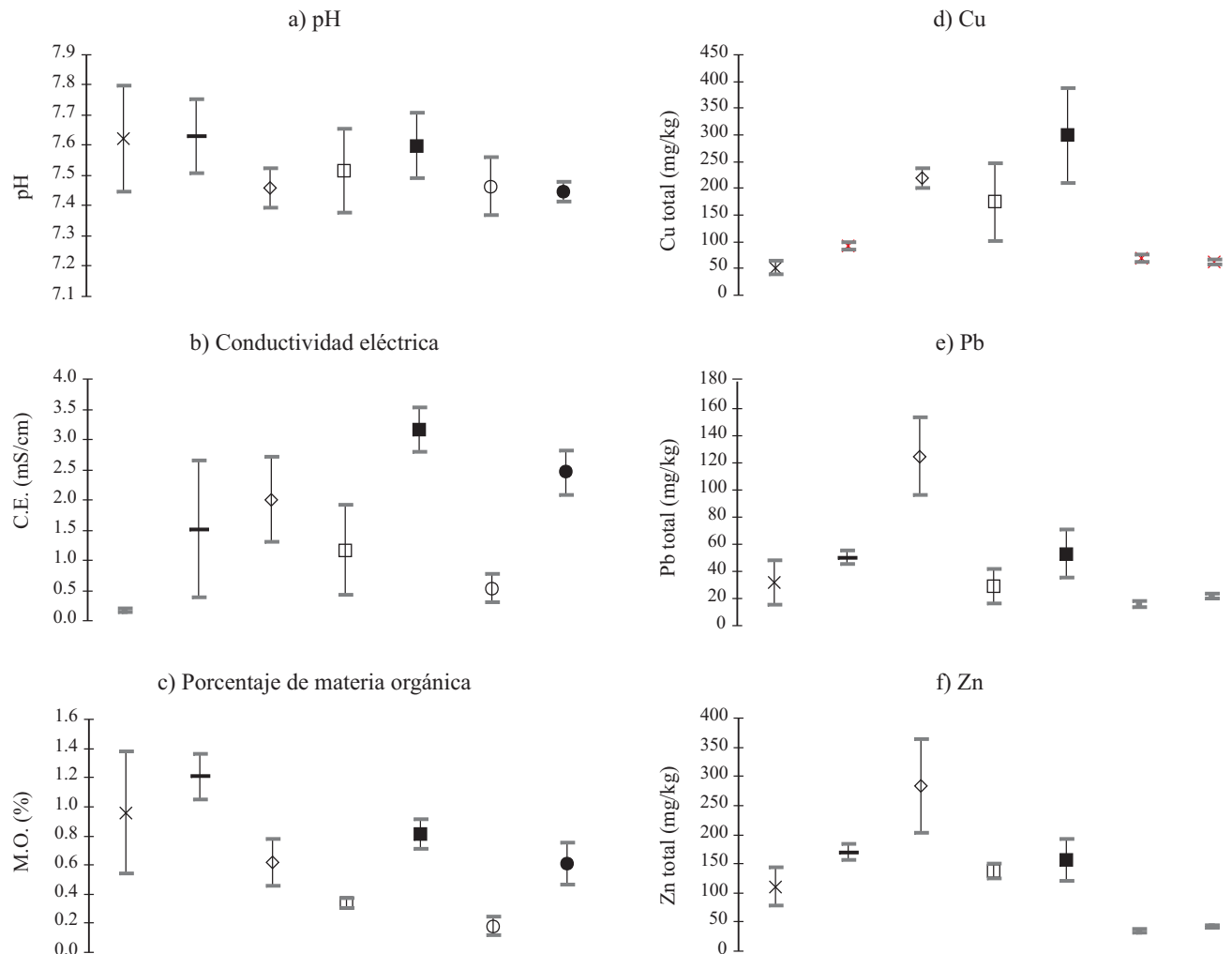


Figura 9. Variación de propiedades físicas y químicas de las muestras compuestas. Se muestra la media y la desviación estándar de los resultados obtenidos para las cuatro muestras colectadas en cada sitio y tipo de zona. Simbología: (x): La Luz (LL100), (-): Monte de San Nicolás (LS70), \diamond : Pozuelos (VM75), \square : Valenciana-8, proximal (VM16-T), \blacksquare : Valenciana-8, distal (VM16-Zi), \circ : El Cedro proximal (VMS0-T), \bullet : El Cedro distal (VM-Zi).

quedar retenidas las aguas de proceso y se observa eflorescencia de yeso producto de la reacción de oxidación y neutralización. Dold y Fontboté (2001) encuentran que en jales de pórfidos cupríferos en el desierto de Atacama en Chile, la humedad es la limitante para la oxidación. Los estratos de textura gruesa pierden humedad fácilmente y por lo general no se oxidan, en tanto que los estratos de textura fina presentan oxidación debido a su mayor capacidad de retención de humedad. A nivel local (en los horizontes arenosos cercanos a escurrimientos naturales), los jales presentan acidificación que es favorecida por factores relacionados con una buena aireación y con la presencia de agua.

Variación de las propiedades

Se encontró que los horizontes arcillosos retienen humedad y tienen mayor conductividad eléctrica que los

arenosos. La variación dentro de los sitios es debida a la clasificación textural durante el depósito y a la redistribución de los materiales por agentes erosivos. En cada etapa de depósito se desarrolla una estratificación y hay una clasificación textural que condiciona la distribución en los minerales. Por otra parte, el tipo de mena determina las cantidades de sulfuros y, por consiguiente, de metales en los jales. Los materiales que provienen de yacimientos tipo *stockwork* (mina Las Torres en el sur de la Veta Madre) tienen menores contenidos de sulfuros que los procedentes de filones y brechas (Mango, 1992).

Entre horizontes existe una fuerte variación de las propiedades físicas y químicas condicionada por una clasificación textural. En La Luz se aprecia una variación muy baja para las muestras en el perfil, las cuales fueron colectadas en una zona que se encuentra estabilizada y no ha tenido otros aportes de jales por deposición. Los jales de Pozuelos también tienen alta variación en las concentraciones de

metales entre horizontes.

La cantidad de calcita en los jales depende de su concentración en las vetas y del tipo de alteración en la roca encajonante. El sistema de vetas La Luz está emplazado en calizas, y tanto las vetas como los jales contienen más de 25% de calcita. Además, la litología condiciona el tipo de mena; por ejemplo, las rocas volcánicas contienen redes de vetillas en *stockwork* donde la calcita es la ganga dominante (10 al 25 % de CaCO_3), en tanto que las brechas y *stockworks* encajonados por el conglomerado Guanajuato (Randall-Roberts *et al.*, 1994) tienen contenidos de calcita bajos de aproximadamente 0 a 10 %.

La presencia de pirita se relaciona con la edad que llevan los jales expuestos a la atmósfera. En sitios de depósito reciente (VMS0) se encontró pirita y en jales con mayor edad de abandono no se detectó debido a que posiblemente se oxidó. También se detectó pirita en un estrato de textura fina de Valenciana-8 (VM16C1), debido a que esta textura no permite una adecuada aireación y aporte de oxígeno. En todos los jales se observó que la vegetación favorece el proceso de oxidación debido a que incrementa la capacidad de retención de humedad y la aireación del sustrato. Cerca de las zonas radicales de plantas, sobre todo de las jaras (*Baccharis glutinosa*), se observaron coloraciones amarillas y rojizas, así como acumulación de yeso. Esto se relaciona al desarrollo de microambientes en las zonas de raíces, donde la oxidación de los sulfuros es más intensa (Walton-Day, 1999).

En la Figura 9 se presentan las variaciones en las propiedades de las muestras compuestas, que permiten distinguir variaciones espaciales; para cada sitio y tipo de zona se representa la media y la desviación estándar de las lecturas obtenidas para las cuatro muestras colectadas. En la Figura 9a se aprecia que el pH de todas las muestras es alcalino, debido a que hay suficiente calcita para neutralizar la acidez que se generaría por la oxidación de pirita. En

la Figura 9b se aprecia que la conductividad eléctrica es muy baja para las terrazas de los jales de La Luz, lo cual se puede deber a que los sulfuros se oxidaron y todos los productos de la oxidación fueron lavados. Es muy notable el contraste entre conductividades de zonas proximales y distales dentro de un mismo depósito de jales, reflejando que las zonas proximales son de lavado, mientras que las distales son de acumulación, tanto de agua por la textura arcillosa, como de solutos, como lo evidencia la C.E. En estas últimas zonas incluso se aprecia ya cementación por precipitación de yeso. En la Figura 9c se aprecia la variación en las concentraciones de materia orgánica, la cual depende de la colonización vegetal; en los perfiles se observó que el contenido de materia orgánica disminuye con la profundidad. En las zonas distales, que se inundan estacionalmente, se observa mayor acumulación de materia orgánica respecto a las zonas proximales debido a que tienen una aireación muy pobre que no favorece la biodegradación y al crecimiento de algas cuando están inundadas.

En las Figuras 9d, 9e y 9f se muestra la variación en las concentraciones de cobre, plomo y zinc, respectivamente. Se aprecia que los jales de San Nicolás tienen una variación muy baja en las concentraciones de estos metales, lo que indica que la fuente es homogénea y que no ha habido redistribución de materiales por la erosión. Las mayores concentraciones, tanto de plomo como de zinc, se encontraron en los jales de Pozuelos, con 75 años de exposición a la atmósfera. Estos jales provienen de la mina Sirena, en la parte central de la Veta Madre, y de materiales removidos del río Guanajuato. Para los jales de Valenciana se aprecia el contraste entre las zonas proximales y distales tanto en el contenido de cobre (en promedio 174 mg/kg en proximal y 300 mg/kg en distal) como de plomo (29 mg/kg en proximal y 53 mg/kg en distal), mientras que no se presentan diferencias significativas en el contenido de zinc entre las zonas. Como ya se ha comentado, los jales de El Cedro tienen muy bajas concentraciones de los metales analizados debido al alto porcentaje de recuperación durante el beneficio y porque provienen de yacimientos con bajos contenidos de metales.

Tabla 6. Niveles de referencia para concentraciones de EPT en suelos y sedimentos según las legislaciones de diferentes países (en mg/kg).

País	Cu	Pb	Zn
Australia-NZ ^a	100	10	200
Alemania ^b	500	500	300
Canada ^c	GCS NEP 35.7 197	GCS NEP 35 91.3	GCS NEP 123 315
Holanda ^d	190	530	720
Suecia ^e	mb < 15 b 15–25 m 25–100 a 100–500 ma > 500	< 50 50–150 150–400 400–2,000 > 2,000	< 150 150–300 300–1,000 1,000–5,000 > 5,000

NZ: Nueva Zelanda. GCS: Guía de calidad para sedimentos, NEP: nivel de efecto probable, mb: muy bajo; b: bajo, m: medio, a: alto, ma: muy alto. ^a ANZECC/ARMCANZ (2000), ^b Kabata-Pendias (1995); ^c ECGSD (1996); ^d MHSPE (2000); ^e Naturvårdsverket (2002).

Estimación del riesgo ambiental de los jales

El impacto ambiental que han ocasionado los jales en el Distrito Minero de Guanajuato ha sido por un lado el azolve del cauce del río ocasionado por el vertido de los jales de amalgamación, los cuales además contenían partículas de mercurio. Los jales de cianuración y flotación cubren un área de 81.9 has y representan un promedio de 40.3 Mt; entre éstos, los jales de cianuración tienen mayores riesgos de erosión hídrica debido a que no cuentan con obras de desviación del drenaje natural.

Para definir si los EPT contenidos en los jales ocasionan efectos tóxicos al ambiente es necesario tomar en cuenta los niveles naturales o de fondo de metales en las rocas y

los suelos. La geología en el Distrito de Guanajuato es muy compleja y para definir un nivel de referencia sería necesario realizar una caracterización de rocas, suelos y sedimentos que representen todas las condiciones geoquímicas que se encuentran en la región. Otra aproximación para definir si estos residuos son tóxicos es comparar las concentraciones de metales analizadas contra valores de referencia establecidos por normatividades de otros países. La Tabla 6 es una compilación de normas y valores de referencia para suelos y sedimentos que se aplican en algunos países.

Las normas de Australia y Nueva Zelanda (ANZECC/ARMCANZ, 2000) son muy estrictas en lo que se refiere a niveles máximos permitidos para suelos y, si se aplicaran a los jales del Distrito de Guanajuato, resultaría que todos tienen potencial tóxico. Sin embargo, desde una perspectiva de legislación, los jales deberían considerarse como sedimentos más que como suelos. La legislación Alemana (Kabata-Pendias, 1995) se refiere a niveles máximos en suelos y bajo este criterio los jales no se considerarían tóxicos. La legislación canadiense (ECGSD, 1996) se refiere a niveles de metales en sedimentos y es aún más estricta que la de Australia. De acuerdo a esta legislación, los jales del Distrito de Guanajuato exceden los niveles de calidad y los contenidos de Cu, Pb y Zn del sitio Pozuelos (VM75) se considerarían tóxicos. Los niveles establecidos por la legislación holandesa (MHSPE, 2000) se refieren a las concentraciones que requieren acciones de remediación en el suelo. En función de esta norma, el sitio Pozuelos requeriría acciones de remediación para eliminar Cu (promedio de 252 mg/kg en el perfil 2). De acuerdo con la legislación sueca para niveles guía en sedimentos (Naturvårdsverket, 2002), los contenidos de cobre cuantificados se encuentran entre niveles medios a altos y los de plomo y zinc entre niveles bajos a medios.

La aplicación de estas normas a sitios con tanta variación en las propiedades como la observada en depósitos de jales requiere que se haga una adecuada selección de las muestras y se delimiten las zonas donde las concentraciones de EPT son mayores con el fin de realizar las acciones de remediación necesarias para evitar efectos adversos al ambiente.

CONCLUSIONES

En el Distrito de Guanajuato existen por lo menos 31 depósitos de jales de cianuración y flotación, los cuales ocupan un área de 81.9 hectáreas, representan un mínimo de 32.2 Mt y un máximo de 48.4 con un valor promedio de 40.3 Mt. Existen 11 depósitos de jales de cianuración que tienen riesgos de erosión hídrica ya que durante su construcción no se contemplaron obras de desviación del drenaje natural. Se identificaron 20 depósitos de jales de flotación con bajos riesgos de erosión hídrica debido a que se construyeron obras de desviación del drenaje, sin embargo pueden presentar erosión eólica intensa si no son

recubiertos en su superficie, debido a que los materiales no están consolidados. En los perfiles descritos se apreciaron evidencias del proceso de oxidación de pirita tales como la presencia de óxidos de hierro (coloraciones rojas, anaranjadas y amarillas) y de minerales secundarios como yeso, que favorece cementación en las zonas distales. Todas las lecturas de pH resultaron de neutras a alcalinas excepto para la muestra del horizonte arenoso en la terraza alta de Pozuelos (VM75P1C5), con pH de 5.24, que se encuentra cerca de una vía de flujo donde no se detectaron carbonatos.

Los jales presentan dos zonas con condiciones geoquímicas diferentes:

A) Zonas proximales de textura gruesa en depósitos de jales de flotación (o en toda el área de los jales de cianuración), drenadas, que favorecen la oxidación de sulfuros y la formación de yeso; el agua es la limitante para la oxidación.

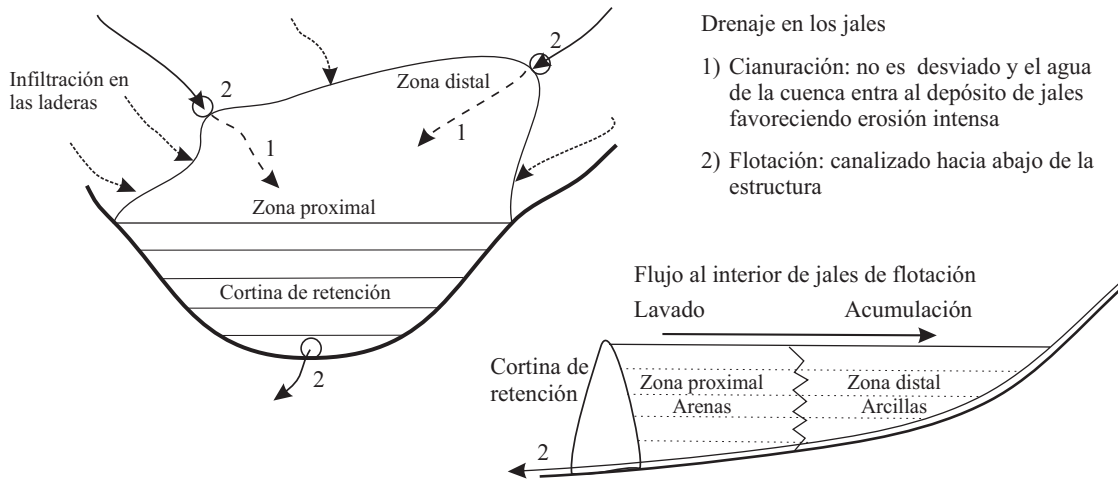
B) Zonas distales de depósitos de jales de flotación, enriquecidas en arcillas minerales, donde hay acumulación de solutos y se presenta reducción de oxi-hidróxidos y sulfatos estacional; la difusión de oxígeno es la limitante para la oxidación.

Las propiedades de los depósitos de jales tienen una variación espacial muy alta. La situación más extrema de generación de acidez se encontró en un perfil ubicado cerca de una vía de flujo, donde el agua actuó tanto disolviendo a la calcita como oxidando a la pirita. A nivel local (en los horizontes arenosos cercanos a escurrimientos naturales) los jales presentan acidificación y los factores que la favorecen se relacionan con una buena aireación y la presencia de agua.

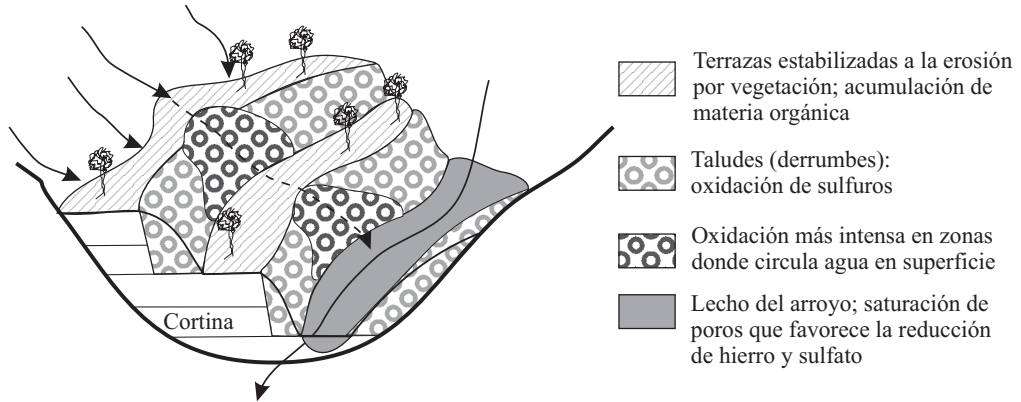
El contenido de metales en los jales se relaciona con la geología del yacimiento, las menas tipo *stockwork* producen jales con menores concentraciones que las menas tipo filón o brechas. Según las normas vigentes en distintos países para niveles de referencia en sedimentos, los jales tienen concentraciones medias a altas para los metales Cu, Pb y Zn y los volúmenes tan grandes que existen dispersos en todo el territorio del Distrito de Guanajuato pueden ocasionar problemas de toxicidad al ambiente. Es muy importante recalcar que deben conocerse los niveles naturales de EPT en rocas, suelos y sedimentos de la región para poder discriminar si efectivamente los jales aportan al ambiente concentraciones de EPT por encima de los niveles de fondo.

La estrategia propuesta resultó ser eficiente para escoger sitios que por sus propiedades pueden representar un riesgo al ambiente. Es conveniente invertir tiempo en el planteamiento de un modelo conceptual sobre los procesos geoquímicos que controlan la acidificación y la liberación de EPT antes de emprender un estudio que involucra muchos recursos. Para el caso de los jales del Distrito de Guanajuato, la variabilidad espacial en las propiedades es un factor muy importante. En la Figura 10 se muestra un modelo conceptual de los flujos de agua en los depósitos de jales para mostrar su influencia en los procesos geoquímicos.

a) Condiciones iniciales de drenaje en los jales que influyen en los procesos geoquímicos.



b) Zonas donde se intensifican los procesos geoquímicos en jales de cianuración erosionados.



c) Desarrollo de procesos geoquímicos en función del tamaño de grano y la humedad.

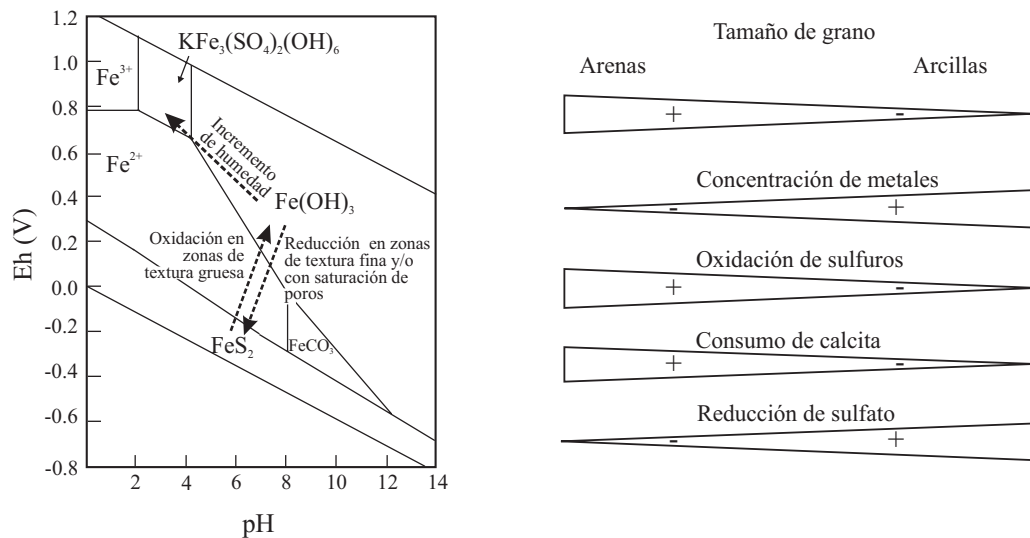


Figura 10. Modelo conceptual de los flujos de agua en los depósitos de jales según el método de construcción y su influencia en los procesos geoquímicos.

En la Figura 10a se aprecian las condiciones iniciales tanto para los jales de cianuración como para los de flotación. En los jales de cianuración toda el agua de la cuenca entra al depósito de jales favoreciendo que se encuentren húmedos y propiciando también erosión. En los jales de flotación se forman dos zonas con condiciones contrastantes: la proximal, con predominancia de arenas, donde el agua se infiltra o escurre y se lavan los productos de las reacciones; y la distal donde se acumula agua y solutos que se generan en la planicie. En la Figura 10b se muestra la zonación condicionada por los flujos de agua: cerca de la ladera hay acumulación de rocas y suelo que se erosionan favoreciendo la colonización vegetal, lo que ayuda a estabilizar estas zonas a la erosión; las zonas de talud son muy porosas, lo que resulta en una oxidación muy intensa; y, finalmente, en el lecho del arroyo existen condiciones reductoras debido a tamaños de partícula finos y a la saturación de los poros. En la Figura 10c se ejemplifica el desarrollo de los procesos geoquímicos en función del tamaño de grano y la humedad: la oxidación de sulfuros y el consumo de calcita se vuelven más importantes al aumentar el tamaño de grano, siempre y cuando exista un aporte de agua; por otra parte, el contenido de metales aumenta al disminuir el tamaño de partícula.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca de doctorado a Yann René Ramos, a Héctor y Abrahan Arroyo por el apoyo en el trabajo de campo, a la Dra. Estela Ramos y a la M. C. Yolanda Gallaga del Centro de Investigaciones en Química Inorgánica (CIQI) de la Universidad de Guanajuato por el apoyo en la realización de los difractogramas. Al M.A. Juan Manuel Tovar por las facilidades para la finalización del manuscrito y a los dos árbitros anónimos que con sus valiosos comentarios ayudaron a mejorar notablemente el manuscrito.

REFERENCIAS

- ANZECC/ARMCANZ, 2000, Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality, National Water Quality Management Strategy 4a (en línea): Canberra, Australia, Australian Government, Department of the Environment and Heritage, actualización: 20 de enero de 2005, <<http://www.ea.gov.au/>>, Publicaciones, acceso libre, consulta: 20 de enero de 2005.
- Bigham, J.M., 1994, Mineralogy of ochre deposits formed by sulfide oxidation, *in* Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds.), Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes: Waterloo, Ontario, Canada, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 22, 103-132.
- Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Clarck, F.E., Dinuer, R.C., 1965, Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties: Madison, Wisconsin, EEUU, American Society of Agronomy, 1280 p.
- Blowes, D.W., Reardon E.J., Jambor J.L., Cherry J.A., 1991, The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 965-978.
- Boulet, M.P., Larocque A.C., 1998, A comparative mineralogical and geochemical study of sulfide mine tailings at two sites in New Mexico, USA: *Environmental Geology*, 33, 130-142.
- Bradshaw A.D., 1997, Restoration of mine-land using natural processes: *Ecological Engineering*, 7/8, 255-269.
- Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida E., Rivas-Solorzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales P., Cienfuegos, E., 2003, Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, México: *Ore Geology Reviews*, 23, 277-297.
- Chambers, J.C., Sidle, R.C., 1991, Fate of heavy metals in an abandoned Lead-Zinc tailings pond; I. Vegetation: *Journal of Environmental Quality*, 20, 745-751.
- Coffey, P.S., Scott, W.D., Summers, K.J. 1986, The effects of tailing dam profiles on relative wind erosion rates: *Journal of Environmental Quality*, 15, 168 -172.
- Consejo de Recursos Minerales (COREMI), 1992, Monografía Geológico-Minera del Estado de Guanajuato: México D.F., Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria básica, 1ª. edición, 136 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF), 2004, Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales (en línea): México, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicado el 13 de Septiembre de 2004, <http://www.gobernacion.gob.mx/dof/2004/septiembre/dof_13-09-2004.pdf>
- Dobos, R.R., Ciolkosz, E.J., Waltman, W.J., 1990. The effect of organic carbon, temperature, time, and redox conditions on soil color: *Soil Science*, 150, 506-512.
- Dold, B., Fontboté, L., 2001, Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing: *Journal of Geochemical Exploration*, 74, 3-55.
- Dold, B., Fontboté, L., 2002, A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide mine tailings of Fe-oxide-Cu-Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile: *Chemical Geology*, 189, 135-163.
- Environment Canada-Guidelines and Standards Division (ECGSD), 1996, Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (en línea): Manitoba, Canada, Environment Canada, actualización: 01 de Marzo de 2004, <<http://www.ec.gc.ca/CEQG-RCQE/>>, Canadian Environmental Quality Guidelines, consulta: 10 de Octubre de 2004.
- García-Meza J.V., 2003, Caracterización fisicoquímica del desecho minero (jal) La Valenciana, Guanajuato, previa y posterior a bioensayos diagnósticos enfocados a la generación de propuestas para su remediación: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 154 p.
- Jurjovec, J., Ptacek, C.J., Blowes D.W., 2002, Acid neutralization mechanisms and metal release in mine tailings; A laboratory column experiment: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 1511-1523.
- Kabata-Pendias, A., 1995, Agricultural problems related to excessive trace metals content of soils, *in* Salomons, W., Forstner, U., Mader, P. (eds.), Heavy Metals Problems and Solutions: Berlín, Springer-Verlag, 687 p.
- Mango, H.N., 1992, Origin of Epithermal Ag-Au-Cu-Pb-Zn Mineralization on the Veta Madre, Guanajuato, México: Hanover, New Hampshire, Dartmouth College, tesis de doctorado, 138 p.
- Martínez-Reyes J., 1992, Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato, escala 1:100,000, con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Serie Cartas Geológicas y Mineras, 8, 1 mapa con texto.
- Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (MHSPE), 2000, Target values and intervention values for soil remediation DBO/1999226863: Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, Directorate-General for Environmental Protection, Department of Soil Protection, The

- Netherlands Government Gazette, 39.
- Miller, J.R., 1997, The role of fluvial geomorphic processes in the dispersal of heavy metals from mine sites: *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 101-118.
- Munsell Color, 1994, Munsell Soil Color Charts, Revised Edition: New Windsor, NY, Macbeth Division of Kollmorgen Instruments.
- Naturvårdsverket, 2002, Guidelines values for polluted soils (en línea): Stockholm, Sweden, Naturvårdsverket (Swedish Environmental Protection Agency), actualización 30 de Septiembre de 2002, <<http://www.internat.naturvardsverket.se>>, Legislation & guidelines, Environmental quality criteria, Contaminated sites, Contamination level, consulta: 23 de Octubre de 2004.
- Nordstrom, D.K., Alpers, C.N., 1999, Geochemistry of acid mine waters, in Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A, Processes, Techniques and Health Issues: Colorado, Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, 6A, 133-160.
- Osterkamp, W.R., Troy, T.J., 1997, Geomorphic considerations for erosion prediction: *Environmental Geology*, 29, 152 - 157.
- Plumlee, G.S., 1999, The environmental geology of mineral deposits, in Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits; Part A: Processes, Techniques, and Health Issues: Colorado, Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, 6A, 71-116.
- Plumlee, G.S., Nash, J.T., 1995, Geoenvironmental models of mineral deposits; fundamentals and applications, in du Bray, E.A. (ed.), *Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental models of mineral deposits: United States Geological Survey, Open-File Report*, 95-831, 1-9.
- Ramos-Arroyo, Y.R., 2004, Caracterización Geoquímica de Depósitos de Jales del Distrito de Guanajuato: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, tesis doctoral, 221 p.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D., 1998, Variabilidad espacial de condiciones geoquímicas en presas de jales: *Actas INAGEQ*, 4, 51-63.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, C.D., 2004, Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México; Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(2), 268-284.
- Ramos-Posada, M.E., Hansen, A., Ortega, L.V., 1994, Enriquecimiento de metales en sedimentos de la Cuenca Lerma-Chapala, en 4º Congreso Nacional de Geoquímica, Memorias, Jiutepec, Mor.: Jiutepec, Mor., México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 151-156.
- Ramos-Ramírez, R.E., 1991, Reconstrucción mineralógica de los jales de Guanajuato y el estudio sobre el seguimiento de las especies químicas contenidas en sus componentes no metálicos: Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Tesis de maestría, 135 p.
- Randall-Roberts, J.A., Saldaña, E., Clark, K.F., 1994, Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, México: *Economic Geology*, 89, 1722-1751.
- Rorke, B., 2000, Soil erodability and processes of water erosion on hill-slope: *Geomorphology*, 32, 385- 415.
- Rowan, J.S., Barnes, S.J., Lambers, B., Hetherington, F., 1995, Geomorphology and pollution; the environmental impacts of lead mining, Leadhills, Scotland: *Journal of Geochemical Exploration*, 42, 57 - 65.
- Rowell, D.L., 1981, Oxidation and reduction, in Greenland D.J., Hayes M.H.B. (eds), *The Chemistry of Soil Processes: New York, John Wiley & Sons*, 401- 461.
- Rump, H.H., Krist, H., 1988, *Laboratory Manual for the Examination of Water, Waste Water and Soil: Berlin, VCH publishers*, 190 p.
- Ridgway, J., Flight, M.A., Martiny, B., Gómez-Caballero, A., Macías-Romo, C., Grealley, K., 1995, Overbank sediments from central México: an evaluation of their use in regional geochemical mapping and studies of contamination from modern and historical mining: *Applied Geochemistry*, 10, 97-109.
- Shaw, S.C., Groat, L.A., Jambor, J.L., Blowes, D.W., Hanton-Fong, C.J., Stuparyk, R.A., 1998, Mineralogical study of base metal tailings with various sulfide contents, oxidized in laboratory columns and field lysimeters: *Environmental Geology*, 33, 209 - 217.
- Scheinost, A.C., Schwertmann, U., 1999, Color identification of iron oxides and hydroxysulfates; use and limitations: *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1463- 1471.
- Shum, N., Lavkulich, L.M., 1998, Use of sample color to estimate oxidized Fe content in mine waste rock: *Environmental Geology*, 37, 281- 288.
- Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K., 1996, *Manual para la Descripción y Evaluación Ecológica de Suelos en el Campo: Chapingo, México, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Publicación Especial*, 4, 57 p.
- Smith, K.S., 1999, Metals sorption on mineral surfaces; an overview with examples relating to mineral deposits, in Plumlee G.S., Logsdon M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques, and Health Issues: Colorado, Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, 6A, 161-182.
- Terlien, T.J., 1998, The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds: *Environmental Geology*, 35, 124 - 130.
- Walton-Day, C., 1999, Geochemistry of the processes that attenuate acid mine drainage in wetlands, in Plumlee, G.S., Logsdon M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A, Processes, Techniques, and Health Issues: Colorado, Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, 6A, 215-228.

Manuscrito recibido: Marzo 15, 2004

Manuscrito corregido recibido: Agosto 15, 2005

Manuscrito aceptado: Septiembre 12, 2005