



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE JALES Y LIXIVIADOS
DE UNA MINA DE SULFUROS MASIVOS EN EL
ESTADO DE MÉXICO”

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO:

INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA

PRESENTA:

CRECENCIO MARTÍNEZ SORIANO

DIRECTOR DE TESIS
DR. FRANCISCO MARTÍN ROMERO



MÉXICO, D.F., 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

En esta dedicatoria quiero tener presentes, a cuatro personas muy importantes para mí, que están siempre en mi corazón, y que confiaban en mis posibilidades; a mis abuelos que hoy faltan - Metódio y Mónica-, -Cándido y Guadalupe- sé que me han dado aliento en todo momento.

A mis padres Crescencio y Estela, va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí. Por haberme apoyado durante mi carrera incondicionalmente, por darme muchas muestras de amor este triunfo es de ustedes.

A mis hermanos, Mónica, Laura, Julio, Oscar y Estela que se han portado muy bien conmigo, me han ayudado a seguir luchando y a no rendirme, me han demostrado que puedo contar con ellos para todo.

A mis sobrinos, Joselyne, Javier, Geraldine, Harumí, Uriel, Mariangeles, Tamahara, Sahara y Quetzal, puedo asegurar que serán gente de bien en el futuro, ¡¡ difícil existe... imposible no!!

AGRADECIMIENTOS

Inmensamente a la UNAM y a la Facultad de Ingeniería por haberme brindado una educación de excelencia y por ser parte fundamental de mi formación como profesional.

Inmensamente a mi asesor y amigo el Dr. Francisco Martín Romero por su gran apoyo, consejos, paciencia y tiempo invertidos en este trabajo.

A la Dra. Rosa María Profl Ledesma por sus consejos y el gran apoyo fundamental para poder realizar este trabajo.

A la Dra. Olivia Zamora Martínez, por sus consejos y el gran apoyo brindado en el trabajo experimental.

A mis sinodales, Ing. Guadalupe Contreras Ordaz, M. I. José E. Santos Jallath y al M. C. José de Jesús Huevo Casillas, por sus valiosos comentarios y observaciones a este trabajo.

A la Dra. Teresa Pi Puig por la ayuda en los análisis de Difracción de Rayos X.

Al laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, en especial a la QFB. Fabiola Vega García y Daniel Ramos por el apoyo en el trabajo en el análisis de muestras.

Al proyecto CONACyT-SEMARNAT-2004-01-350 "Análisis comparativo de desechos mineros para su manejo sustentable"

Gracias al comité de WAAIMÉ por el apoyo otorgado durante gran parte de mi carrera.

A mis tíos Adolfo, Graciela, Rogelio, Francisca, Clara y Altagracia por todo su apoyo.

A mis primos Aydee, Guadalupe, Belen, Nayeli, Lizeth, Pilar, Angélica, Hugo, Mónica, Norma, Juan, Miriam, mil gracias por sus grandes consejos y muestras de cariño los quiero.

A mis compañeros y amigos con los que he compartido los buenos y malos momentos durante estos años: Manuel, Misael, Edgar (Chata), Jonathan, Elías, Lewis, Evaristo, Luis (perrillo), L. Rocío, Elizabeth, Juan Carlos (chikis), Jaime, José Manuel (Chema), Angel, Kury, Abel, Adrian, Rubén, Crispín (Pin), Mario (lab.), Olaf, Nahúm, Eduardo (Snarf y Toluco) Betzy, Damián, Paco, Cesar, Ana Midori, Arlen, Viridiana, Rocío, Minchaca, J. Alfredo, Liz, Don Carlos, Alejandro C. y todos los demás, ya que con gusto puedo decir que me faltarían hojas para escribir a todos aquellos que me han ayudado a cambio de nada.

Gracias a todos mis maestros que me forzaron todos estos años como estudiante sus grandes enseñanzas y consejos quedaran profundamente inmensos en mí ser.

A todas las personas que se me olvida citar, que hayan confiado en mí, gracias de corazón.

Imposible es sólo una palabra que usan los hombres débiles para vivir fácilmente en el mundo que se les dio, sin atreverse a explorar el poder que tienen para cambiarlo. Imposible no es un hecho, es una opinión. Imposible no es una declaración, es un reto. Imposible es potencial. Imposible es temporal.

Imposible es NADA

Adidas

ÍNDICE

Resumen

I.- INTRODUCCIÓN	1
II.- CONTEXTO GEOLÓGICO MINERO DE ESTUDIO	4
2.1.- Objeto de estudio	4
2.2.- Ubicación	4
2.3.- Historia	5
2.4.- Clima	5
2.5.- Fisiografía e hidrología superficial	6
2.6.- Ambiente geológico local y depósitos minerales	7
III.- MARCO TEÓRICO	9
3.1.- Generalidades	9
3.2.- Procesos Geoquímicos en los jales	11
3.2.1.- Oxidación de sulfuros metálicos y generación de drenaje ácido	11
3.2.2.- Neutralización	12
3.2.2.1.- Disolución de carbonatos e hidróxidos metálicos	12
3.2.2.2.- Alteración de aluminosilicatos	14
3.3.- Actividad bacteriana	14
3.4.- Minerales secundarios en la presa de jales y afloramientos de obras mineras	15
3.5.- Drenaje ácido en diferentes zonas de México y su relación con los factores geológicos de dichas zonas	16
3.6.- Pruebas utilizadas para valorar y predecir el comportamiento de los jales con relación al potencial peligro que representan para el ambiente	18
3.6.1.- Pruebas indicadas en la normatividad ambiental mexicana (NOM-141-SEMARNAT-2003)	18
3.6.1.1.- Prueba de extracción	18
3.6.1.2.- Prueba de Balance Ácido-Base	19
3.6.2.- Otras pruebas: Pruebas cinéticas de intemperismo acelerado (celdas húmedas)	19
IV.- METODOLOGÍA	21
4.1.- Muestreo	21
4.2.- Análisis de Laboratorio	22

4.2.1.- Preparación de muestras	22
4.2.2.- pH y Conductividad Eléctrica	22
4.2.3.- Capacidad de generación de drenaje ácido	23
4.2.4.- Composición química	24
4.2.5.- Generación de lixiviados sintéticos de jales y muestras de mina	25
4.2.6.- Análisis mineralógicos	25
V.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
5.1.- Parámetros generales	26
5.2.- Potencial de generación de drenaje ácido	27
5.3.- Concentración total de elementos mayores y elementos potencialmente tóxicos	30
5.3.1.- Elementos mayores	30
5.3.2.- Elementos potencialmente tóxicos	32
5.4.- Concentración geodisponible (solubles) de componentes mayoritarios y elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados de jales y muestras de la mina	36
5.4.1.- Componente mayoritarios: cationes y aniones de los lixiviados	36
5.4.2.- Elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados	39
5.5.- Composición mineralógica	44
5.6.- Procesos geoquímicos identificados en los jales y muestras de mina de la zona de estudio	46
VI.- Conclusiones y Recomendaciones	51
6.1.- Conclusiones	51
6.2.- Recomendaciones	52
Bibliografía	53

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 (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$) galena (PbS) esfalerita (ZnS) calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (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 (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 IOCG¹, 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).

¹ 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 (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.

II. CONTEXTO GEOLÓGICO MINERO DEL SITIO DE ESTUDIO

2.1 Objeto de estudio

El objeto de estudio son los jales de la presa activa e inactiva que provienen del beneficio de un yacimiento polimetálico de sulfuros masivos vulcanogénico, ubicado en Zacazonapan, Estado de México (Fig.2.1) y los lodos o sedimentos provenientes de la obra subterránea, donde actualmente se realiza la explotación de la mina en cuestión.

2.2 Ubicación

La zona de estudio se encuentra localizada, en la parte sur-poniente del Estado de México entre las coordenadas $100^{\circ} 10'$ a $100^{\circ} 15'$ de longitud Oeste y $19^{\circ} 00'$ a $19^{\circ} 05'$ de Latitud Norte (Neri, 1998).

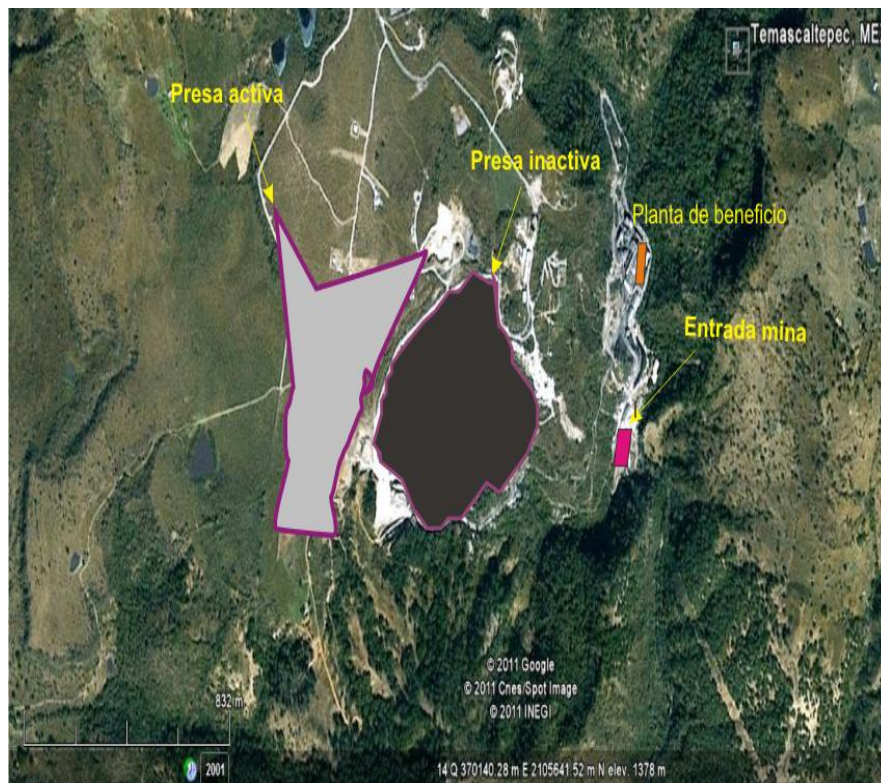


Figura 2.1.-Ubicación de las presas de jales y mina

2.3 Historia

Los datos históricos que a continuación se describen fueron tomados de la Monografía Geológico – Minera del Estado de México (COREMI, 2006):

1977: El Consejo de Recursos minerales después de analizar las imágenes del ERTS-1 que cubren aproximadamente 10000 km² de la provincia Metalogenética denominada “Eje neovolcánico”, encontró importantes rasgos tectónicos que sugerían la evidencia de depósitos minerales aún no descubiertos.

1991: El Consejo de Recursos Minerales somete a concurso la explotación de este nuevo yacimiento mineral

1992: Se constituyen las instalaciones de la unidad Minera que ha generado los jales que son objeto de este estudio.

1993: Inicia la construcción de la unidad minera

1994: Inicia operaciones la planta de beneficio con una capacidad de 800 toneladas por día

1996: Aumenta la capacidad de la planta de beneficio a 1000 toneladas por día

1998: Aumenta la capacidad de la planta de beneficio a 1600 toneladas por día

Actualmente en esta zona se sigue explotando el yacimiento de sulfuros masivos, a través de una mina subterránea y la concentración de minerales se hace por el método de flotación selectiva.

2.4 Clima

La zona de estudio se ubica a una altitud de 1200 m.s.n.m y pertenece a la zona tropical. El clima que predomina es de templado a cálido y se divide típicamente en las épocas de lluvias en verano y la época de secas en invierno, siendo los meses de julio, agosto y septiembre los más lluviosos del año (Fig.2.2).

La temperatura de verano sobrepasa los 30°C y la precipitación anual media es de 1500 mm. La temperatura de invierno oscila entre 10 y 16 °C (Neri, 1998).

2.5 Fisiografía e hidrología superficial

El área donde se localiza el sitio de estudio se encuentra en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur (XII), Subprovincia depresión del Balsas (67), aparato Sierras Altas Compleja con Cañadas (S1C), con el Sistema de Topoformas denominado Sierra (XII67S1C) (SEMARNAT, 2010).

El municipio de Zacazonapan se inserta plenamente en la Región Hidrológica RH 18 Balsas; Cuenca G Cutzamala; Subcuenca f560: Río Temascaltepec.

El municipio forma parte de la cuenca Cutzamala, siendo el río Temascaltepec el recurso hidrológico más importante, el cual presenta su trayecto al sur del municipio; adicionalmente se cuenta con los arroyos Zacazonapan, El Ahogado, La Antigua, Salto Prieto, La Papaya, El Temascal y el San José mismo que llega al este del límite municipal. (SEMARNAT, 2010).

Principales tipos de clima de México



Figura 2.2.-  Zona de estudio clima de templado a cálido (México Channel)

2.6 Ambiente geológico local y depósitos minerales

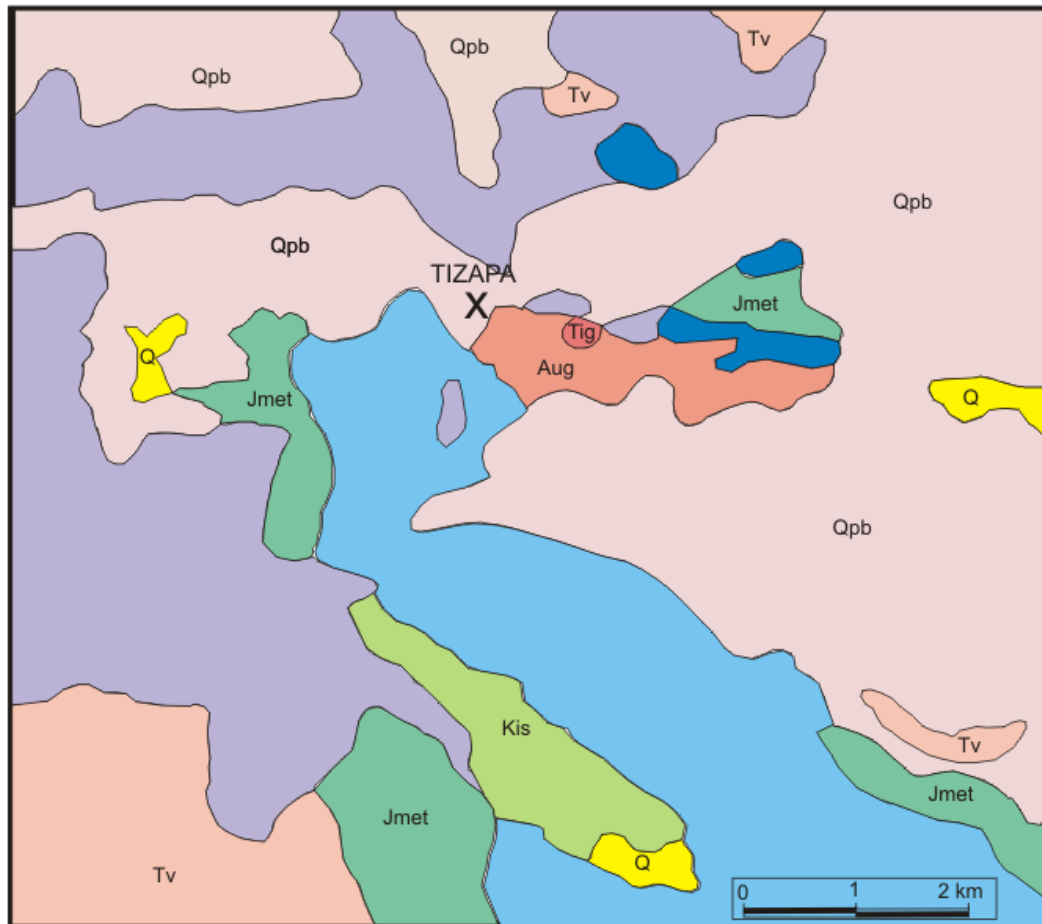
En la literatura especializada (COREMI, 1996) se reporta que la base de la secuencia estratigráfica de la zona de estudio corresponde a las rocas metamórficas del Jurásico, constituidas por esquistos y pizarras (Fig.2.3). Sobre las rocas metamórficas del jurásico yacen rocas del Cretácico constituidas por lutitas, calizas y areniscas. Cuerpos intrusivos riolíticos se han identificado en la parte norte de la zona de estudio. Finalmente, coronando la columna estratigráfica se identifican basaltos, brechas basálticas y material aluvial del Cuaternario.

El depósito mineral, del que provienen los jales de estudio, está constituido por tres cuerpos estratiformes de sulfuros masivos de forma lenticular, concordante con la foliación de la roca huésped, que está constituida por esquistos de moscovita.

Este yacimiento de sulfuros masivos es de tipo vulcanosedimentario Zn-Pb-Cu con valores de Ag y Au. El yacimiento se formó a partir de la exhalación de fluidos hidrotermales por debajo del piso marino. Estos fluidos viajaron a través de fracturas transportando sulfuros ricos en Fe, Zn, Pb, Cu, As y sulfosales de Ag. Los sulfuros se depositaron encima de las rocas volcánicas previamente formadas por la actividad volcánica andesítica, dacítica y de toba riolítica, una vez que el agua marina ocasionó una precipitación rápida, lo cual limitó la formación de minerales de grano medio o grueso.

Este depósito de sulfuros masivos está constituido principalmente por pirita (FeS_2), comparativamente abundante, esfalerita (ZnS) hacia la parte superior con tendencia al aumento de calcopirita (CuFeS_2) en la parte inferior. Además, hay presencia de minerales como arsenopirita (FeAsS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S) y freibergita ($(\text{Ag,Cu,Fe})_{12}(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$).

Las características que presentan estos depósitos tienen gran semejanza con los depósitos tipo “Kuroko” del Japón, que son considerados como depósitos de sulfuros masivos vulcanogénéticos, por la actividad volcánica submarina (COREMI, 1996).



EXPLICACIÓN

ALUVION	Q	ROCA METAVILCÁNICA	Jmet
BASALTO	Qpb	FILITA GRAFÍTICA	
ANDESITA	Tv	ESQUISTO	
GRANODIORITA	Tig	AUGENGNEIS	Aug
METACALIZA	Kis	CONTACTO	

DISTRITO MINERO ZACAZONAPAN

Fig. 2.3.- Mapa geológico de la región Zacazonapan (Modificado de COREMI, 1996)

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Generalidades

México es un país minero por tradición, desde épocas prehispánicas hasta la actualidad sigue contando con un gran potencial tanto en minerales metálicos (plata, plomo, zinc, cobre), como no metálicos (fluorita, yeso, azufre, barita). Entre los principales tipos de yacimientos metálicos que se han explotado tanto en minas subterráneas como a cielo abierto, están: yacimientos tipo vetas epitermales (Taxco, Guanajuato, Pachuca, Zacatecas, Santa Bárbara, etc.), yacimientos tipo skarn (Charcas, Zimapán, La Paz, Concepción del Oro, etc), yacimientos tipo sulfuros masivos vulcanogenéticos (Tizapa, Rey de Plata, etc), yacimientos tipo pórfido cuprífero (La Caridad, Cananea, etc).

Económicamente los depósitos de sulfuros masivos vulcanogenéticos representan una de las principales fuentes de cobre, zinc, plomo, plata y oro y se encuentran dentro de los principales objetivos de exploración para estos metales (Lydon, 1988). En México este tipo de yacimientos ha generado cantidades significativas de Zn, Pb, Cu, Ag, Au y Ba (Miranda-Gasca, 1995). Los recientes descubrimientos de este tipo de yacimientos en México de tonelaje significativamente mayor que los previamente explorados, han renovado el interés por este tipo de yacimientos.

La concentración o beneficio de yacimientos de sulfuros metálicos implica la generación de jales, que contienen cantidades variables de pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (FeCuS) y arsenopirita (FeAsS), que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, etc. (Romero et al. 2003).

Históricamente, los jales generados fueron depositados en los alrededores de las minas de acuerdo a los lineamientos en uso que, en general, no incluían aspectos de protección ambiental. Bajo estas condiciones se convirtieron en fuentes potenciales de contaminación de sitios mineros que operaron sin medidas adecuadas de control y que han afectado los suelos y sedimentos de los alrededores.

En la actualidad la industria minera debe desarrollarse bajo el concepto de Desarrollo Sustentable y por tanto debe de cumplir con leyes ambientales de cada país y con las exigencias de la comunidad internacional, teniendo como un rubro importante la conservación del medio ambiente, para lo que se han implementado diversas tecnologías aplicadas al tratamiento y almacenamiento de los jales (Camero, 2000).

En México, con la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003² el 13 de septiembre de 2004, las empresas mineras, actualmente están obligadas a depositar sus jales en presas diseñadas para reducir el riesgo para el ambiente y la salud, ya que su cumplimiento exige considerar tanto la seguridad estructural de la obra, así como los aspectos relacionados con la estabilidad geoquímica de los residuos.

En la actualidad existen zonas mineras en explotación en diversos estados de México tales como: Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Guerrero, Hidalgo, Sonora, Sinaloa, Coahuila, Guanajuato, Baja California, Michoacán, Oaxaca, Nayarit, Querétaro y Chihuahua. En la última década se han realizado distintos estudios para conocer el grado de contaminación asociado a su operación. Por ejemplo en Zimapán, Hidalgo, se han efectuado investigaciones acerca del origen del arsénico en el agua subterránea (Armienta et al., 1997). En San Luis Potosí se han determinado las concentraciones de As y metales pesados en suelo y vegetales aledaños a depósitos de jales (Castro-Larragoitia et al., 1997). En Baja California Sur se evaluó la potencial contaminación por arsénico de los desechos mineros de minas de oro y plata hacia el agua subterránea (Carrillo y Drever, 1998). En el distrito minero de Guanajuato se ha estudiado la presencia de metales pesados en ríos como resultado de la actividad minera (Ramos, 2004). En Taxco, Guerrero se ha estudiado el fenómeno de drenaje ácido en jales y su impacto en el entorno (Romero et al, 2007, 2008, 2009, 2010).

² Norma Oficial Mexicana 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 post-operación de presas de jales.

3.2 Procesos Geoquímicos en los jales

3.2.1 Oxidación de sulfuros metálicos y generación de drenaje ácido

Los sulfuros metálicos residuales contenidos en los jales o en los afloramientos de las obras mineras utilizadas para la extracción mineral, al estar expuestos al aire y agua, se pueden oxidar con la subsecuente generación de drenaje ácido.

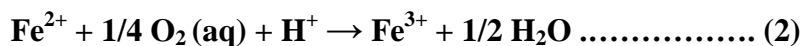
Al exponer a la intemperie a los sulfuros metálicos provenientes de yacimientos minerales formados en condiciones reductoras, e incrementar sus áreas activas por medio de la molienda –en el caso de jales-, se favorecen los procesos de oxidación; con la subsecuente generación de acidez (generación de protones H^+) y liberación de elementos potencialmente tóxicos a las fases acuosas, degradando la calidad del agua y del suelo local (Armienta et al. 2001; Bain et al. 2000; Jung 2001; Ramos-Arrollo, 2006).

La reacción de oxidación de la pirita (FeS_2), por ser el sulfuro más común que acompaña a casi todos los minerales de interés económico, se describe a continuación.

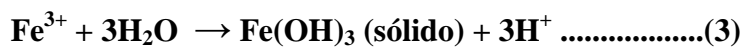


Los productos de la oxidación de la pirita son Fe^{2+} disuelto, sulfatos (SO_4^{2-}) y protones (H^+ , ión ácido), que es la medida de la acidez generada.

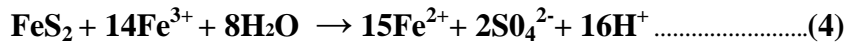
En presencia de suficientes oxidantes, ocurre la reacción 2



Si las condiciones de acidez lo permiten (pH superior a 3.5) se precipita el hidróxido férrico, que es lo que le da el color amarillo-café a los jales o rocas oxidadas.



Algunos cationes férricos que no precipitan, pueden seguir oxidando adicionalmente la pirita:



3.2.2 Neutralización

La oxidación de sulfuros metálicos, no siempre genera drenaje ácido (DA), ya que la generación del DA está en función del balance entre los minerales generadores de acidez (sulfuros) y los minerales consumidores potenciales de acidez (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos).

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina neutralización, en general cuando la capacidad neutralizadora de ácido sobrepasa a la generadora de ácido se consumirán todos los protones y el agua que drene del depósito tendrá un **pH** cercano al neutro.

Los minerales más comunes que consumen acidez (protones H^+) al disolverse son los carbonatos y de ellos el más importante la calcita (CaCO_3), pero hay otros minerales que comúnmente se encuentran en los jales y consumen protones H^+ , pero tienen una reactividad relativamente menor con relación a los carbonatos (Tabla 3.1).

3.2.2.1 Disolución de carbonatos e hidróxidos metálicos

Las reacciones que involucran la disolución de carbonatos (reacción 5) en los jales pueden mantener las condiciones de pH cercanas a las neutras y controlar la liberación y transporte de elementos potencialmente tóxicos.

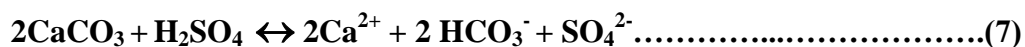
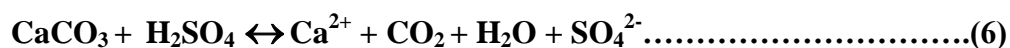


Tabla 3.1.-Minerales agrupados de acuerdo a su capacidad de neutralización de acidez (Jambor, 2000)

Minerales típicos	Reactividad relativa
Calcita, Aragonita, Dolomita, Brucita.	1
Anortita, Nefelita, Olivino, Granate, Jadeita Leucita, Spodumeno, Diopsida, Wollastonita.	0.6
Epidota, Zoisita, Enstatita, Hiperstena Augita, Hedenbergita, Hornblenda. Glaucofano, Tremolita, Actinolita, Antofilita Serpentina, Crisolita, Talco, Clorita, Biotita.	0.4
Albita, Oligoclasa, Labradorita, Vermiculita Montmorillonita, Gibbsita, Caolinita.	0.02
Feldespatos-K, Muscovita.	0.01
Cuarzo, Rutilo, Zircón.	0.004

La disolución de la calcita se efectúa rápidamente y el pH resultante de la solución varía entre 6.5 y 7.5. Esta disolución incrementa la cantidad de carbonatos en solución (Jambor 1994; Dold 2002).

Se ha reportado que para neutralizar un mol de ácido sulfúrico puede necesitarse de uno a dos moles de CaCO_3 , dependiendo si se forman carbonatos o bicarbonatos como producto final (Dold, 2003).



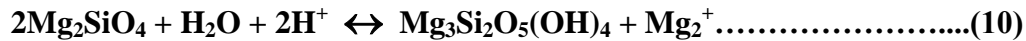
Cuando los carbonatos se agotan, el consumo de acidez se da a través de algunos hidróxidos metálicos como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y el $\text{Fe}(\text{OH})_3$, de acuerdo a las reacciones 8 y 9.



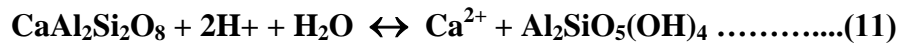
3.2.2.2 Alteración de aluminosilicatos

Bajo condiciones de pH muy bajo, después de que los carbonatos e hidróxidos han sido consumidos, empieza la disolución de los aluminosilicatos. La disolución de muchos aluminosilicatos consume iones H^+ y contribuye con cationes (Ca, Mg, Fe, Na, K, Si Y Al) (Jambor 1994; Dold 2002).

En la literatura se reportan las siguientes reacciones de alteración de aluminosilicatos comunes (Faure, 1998).



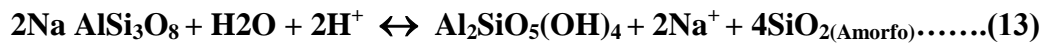
Olivino Serpentinita



Anortita Caolinita



Microclina Caolinita



Albita Caolinita

3.3 Actividad bacteriana

Se reconoce que ciertas bacterias pueden acelerar la velocidad de oxidación incrementando con ello la velocidad de generación de ácido. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es

capaz de oxidar compuestos de azufre reducidos, así como oxidar el hierro ferroso en férrico (que entonces puede actuar como oxidante). Otras bacterias conocidas como participantes o acelerantes de la oxidación de los minerales sulfurosos son: Thiobacillus thiooxidans y Sulfolobus. La velocidad con la cual ocurre la oxidación bacteriana depende de los siguientes parámetros: Temperatura, pH, nutrientes, área superficial del mineral sulfuroso, disponibilidad de oxígeno y de dióxido de carbono.

Por tanto, la oxidación continua puede crear condiciones ideales para el crecimiento de las bacterias oxidantes. La producción de H^+ y la consiguiente disminución del pH, hasta un nivel adecuado para las bacterias que oxidan el sulfato y el hierro, la producción de hierro férrico y el aumento de temperatura debido al proceso de oxidación exotérmico, dan por resultado unas condiciones idealmente adecuadas para estas bacterias.

3.4 Minerales secundarios en las presas de jales y afloramientos de obras mineras

Los procesos de oxidación y neutralización que ocurren tanto en las presas como en las obra mineras propician la precipitación de minerales secundarios a partir de los minerales primarios. Los sulfuros metálicos, carbonatos, silicatos y aluminosilicatos que son minerales primarios comúnmente encontrados en zonas mineras, al estar sometidos a procesos geoquímicos de oxidación-neutralización se transforman en nuevos compuestos que comúnmente se denominan minerales secundarios entre los que destacan los sulfatos, oxihidróxidos y arcillas. Morin y Hutt (1997) listan una serie de minerales secundarios que comúnmente precipitan como producto de la oxidación y neutralización de los minerales primarios en zonas mineras (Tabla 3.2).

Los minerales secundarios juegan un papel importante en el control de la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos:

a) la precipitación de minerales secundarios como óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y arseniatos de los metales liberados durante la oxidación es uno de los principales controles de la movilidad de los EPT (Blowes y Jambor 1990, Lin, 1997; McGregor et al, 1998, Bain et al. 2000, , Roussel et al, 2000; Johnson et al, 2000).

b) la sorción (adsorción y co-precipitación de aniones (arseniatos, seleniatos, sulfatos, fosfatos) y cationes (metales pesados)) en superficies de minerales de arcillas, oxihidróxidos de Fe, Al, Mn y calcita ha sido ampliamente documentada como otro de los principales controles de la movilidad de los metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) (Frost and Griffin, 1976; Goldberg and Glaubig, 1988; Xu et al, 1991; Fuller et al, 1992; Fetter, 1993; Bowel, 1994; Van Der Hoek et al, 1994; Sun and Doner, 1998; Bothe and Brown, 1999; Romero, 2000).

Tabla 3.2 Minerales secundarios comunes que precipitan como producto de la oxidación y neutralización de los minerales primarios (Fuente: Morin y Hutt, 1997)

Nombre	Composición	Nombre	Composición
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Alúmina	Al_2O_3	Serpentinita	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Rozenita	$\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Piromorfita	$\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Anglesita	PbSO_4	Escorodita	$\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	Beudantita	$\text{PbFe}_3\text{AsO}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$
Magnetita	$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Estrengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anhidrita	CaSO_4	Otavita	CdCO_3
Goethita	$\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$	Rodocrosita	MnCO_3
Ferrihidrita	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Lepidocrocita	$\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$	Siderita	FeCO_3
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Cerusita	PbCO_3

3.5 Drenaje ácido en diferentes zonas de México y su relación con los factores geológicos de dichas zonas

En México, se ha reportado que la generación de drenaje ácido en diferentes zonas mineras, depende del tipo de yacimiento mineral de la zona de estudio y de la mineralogía tanto del yacimiento como de la roca encajonante.

Romero et al. (2008) estudiaron los jales ubicados en las regiones mineras de Nacozari-Sonora (depósito de sulfuros de Cu tipo pórfido cuprífero), Santa Bárbara-Chihuahua (vetas hidrotermales con sulfuros de Pb-Zn-Cu), Zimapán-Hidalgo (“skarn” con sulfuros de Pb-Zn-Ag) y Taxco-Guerrero (vetas hidrotermales con sulfuros de Pb-Zn). Estos autores reportan que los valores de pH en los lixiviados de las diferentes zonas mineras indican la generación de drenaje ácido en Zimapán, Taxco y Nacozari: $\text{pH}_{\text{Zimapán}} = 2.6$, $\text{pH}_{\text{Taxco}} = 2.8$ y $\text{pH}_{\text{Nacozari}} = 3.0$; pero los lixiviados de los jales de Santa Bárbara son básicos ($\text{pH}_{\text{Santa Bárbara}} = 8.4$), lo que es determinante para la calidad de dichos lixiviados:

- a) Los lixiviados ácidos de Zimapán se caracterizan por las relativamente altas concentraciones de sulfatos (SO_4^{2-}), arsénico (As), plomo (Pb), cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn) que alcanzan valores máximos, en mg/L de: $\text{SO}_4^{2-} = 3625$, As = 48.7, Pb = 1.8, Cu = 25.5, Fe = 897.7 y Zn = 400.
- b) Los lixiviados ácidos de Taxco se caracterizan por las relativamente altas concentraciones de sulfatos (SO_4^{2-}), arsénico (As), plomo (Pb), cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn) que alcanzan valores máximos, en mg/L de: $\text{SO}_4^{2-} = 4002$, As = 3.2, Pb = 0.5, Cu = 4.7, Fe = 130.2 y Zn 185.5.
- c) Los lixiviados ácidos de Nacozari, se caracterizan por la ausencia de elementos de naturaleza tóxica como el As y Pb; pero contienen concentraciones altas de sulfatos (SO_4^{2-}), cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn) que alcanzan valores máximos, en mg/L de: $\text{SO}_4^{2-} = 4300$, Fe = 203, Cu = 173 y Zn = 25.6.
- d) Finalmente, los lixiviados básicos de los jales de Santa Bárbara, se caracterizan por las relativamente bajas concentraciones de sulfatos ($\text{SO}_4^{2-} = 304$ mg/L) y prácticamente la ausencia de EPT como As, Pb, Fe, Cu y Zn; cuyas concentraciones disueltas fueron inferiores al límite de detección de las técnicas de análisis.

En otro estudio realizado por Romero et al., (2010) se reporta que en jales que provienen de la explotación de yacimientos polimetálicos asociados a un depósito de tipo skarn, en Charcas, SLP, los lixiviados son neutros ($\text{pH} = 6.5 - 8.2$) debido a la abundancia de minerales con potencial de neutralización (calcita y wollastonita), lo que es la explicación de que estos lixiviados no contengan elementos tóxicos disueltos (Romero et al., 2010).

En otro estudio (Luna, 2011), se ha reportado que el drenaje ácido asociado a la minería de Fe en Colima (pH = 2.5 – 2.8), donde el yacimiento de magnetita, que se explota, se asocia al depósito de tipo IOCG (Iron–Oxide–Copper–Gold Deposits) (Tritlla et al., 2003) se caracteriza por las altas concentraciones de sulfatos (SO_4^{2-}) y hierro (Fe), que alcanzan valores máximos, en mg/L de: $\text{SO}_4^{2-} = 3007$ y $\text{Fe} = 252$. Estos lixiviados de jales de la minería de Fe se caracterizan por las bajas concentraciones de cobre ($\text{Cu} = 2.87 - 5.34$ mg/L) y zinc ($\text{Zn} = 0.37 - 1.12$ mg/L) y la ausencia de elementos tóxicos como As y Pb.

3.6 Pruebas utilizadas para valorar y predecir el comportamiento de los jales con relación al potencial peligro que representan para el ambiente

3.6.1 Pruebas indicadas en la normatividad ambiental mexicana (NOM-141-SEMARNAT-2003)

Para que los jales representen un riesgo potencial para el ambiente se requieren que sean peligrosos. De acuerdo a la normatividad mexicana los jales son peligrosos cuando: son generadores potenciales de acidez y/o cuando contienen EPT solubles, esto es que se pueden extraer en una solución de agua meteórica (SEMARNAT, 2003).

En la NOM-141-SEMARNAT-2003 se consideran la prueba de extracción y la prueba de balance ácido-base para determinar la peligrosidad de los jales.

3.6.1.1 Prueba de extracción

Esta prueba tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de jales por su toxicidad. Es la referida a la “prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO_2 ” en el extracto obtenido se cuantifican los metales y metaloides. Si la concentración del extracto de uno o varios de los elementos listados (Tabla 3.2) es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales son peligrosos por su toxicidad.

Tabla 3.2: Límites Máximos Permisibles (LMP) de las concentraciones solubles de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) que hacen a los jales peligrosos por su toxicidad.

Elementos potencialmente tóxicos (EPT)	Límite máximo permisible (mg/L)
Arsénico	5
Bario	100
Cadmio	1
Cromo	5
Mercurio	0.2
Plata	5
Plomo	5
Selenio	1

3.6.1.2 Prueba de Balance Ácido-Base

Esta prueba tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los jales por su reactividad. Consiste en definir el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores. Al realizar la determinación, el generador debe registrar el valor del potencial de neutralización (PN) y determinar el potencial de acidez (PA) de la muestra, calculando el potencial de neutralización neto (PNN) como sigue: $PNN = PN/PA$. En caso de que la relación Potencial de Neutralización (PN)/Potencial Acido (PA) sea menor a 1.2, se consideran generadores potenciales de ácido.

3.6.2 Otras pruebas: Pruebas cinéticas de intemperismo acelerado (celdas húmedas)

Las pruebas cinéticas consisten en someter a intemperismo acelerado a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Una de las pruebas cinéticas más utilizadas es la prueba de celdas húmedas, que son pruebas de laboratorio, diseñadas para simular los procesos de intemperismo geoquímico bajo condiciones de oxidación óptimas: la muestra

se coloca en una cámara cerrada, de unos 20 cm de diámetro donde se somete a ciclos alternados de aire seco y húmedo (tres días cada uno) y un día de lavado con agua destilada y evaluación del lixiviado. Se considera que el tiempo mínimo de prueba es de 20 a 30 semanas. El extracto del lavado se analiza y se obtienen datos de pH, potencial redox acidez, alcalinidad, sulfatos, conductividad y EPT disueltos. Estos datos pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de oxidación, el grado potencial del intemperismo y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido.

La interpretación de los datos resultantes de las pruebas cinéticas es compleja, por lo que en la práctica se le da un mayor peso a los resultados de las pruebas estáticas para la clasificación de los jales con fines de planeación para tomar medidas de prevención (Lawrence et al. 1997).

IV. METODOLOGÍA

4.1 Muestreo

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

En las presas de jales: 13 muestras

En la presa de jales activa, 6 muestras de color gris que no presentan rasgos visibles de oxidación (Fig. 4.1).

En la presa de jales inactiva, 7 muestras de color café con diferentes grados de oxidación (Fig. 4.1).

En interior de la mina: 5 muestras de sedimentos o lodos (de aquí en adelante muestras mina) derivados de los procesos geoquímicos en las obras mineras (Fig. 4.2).

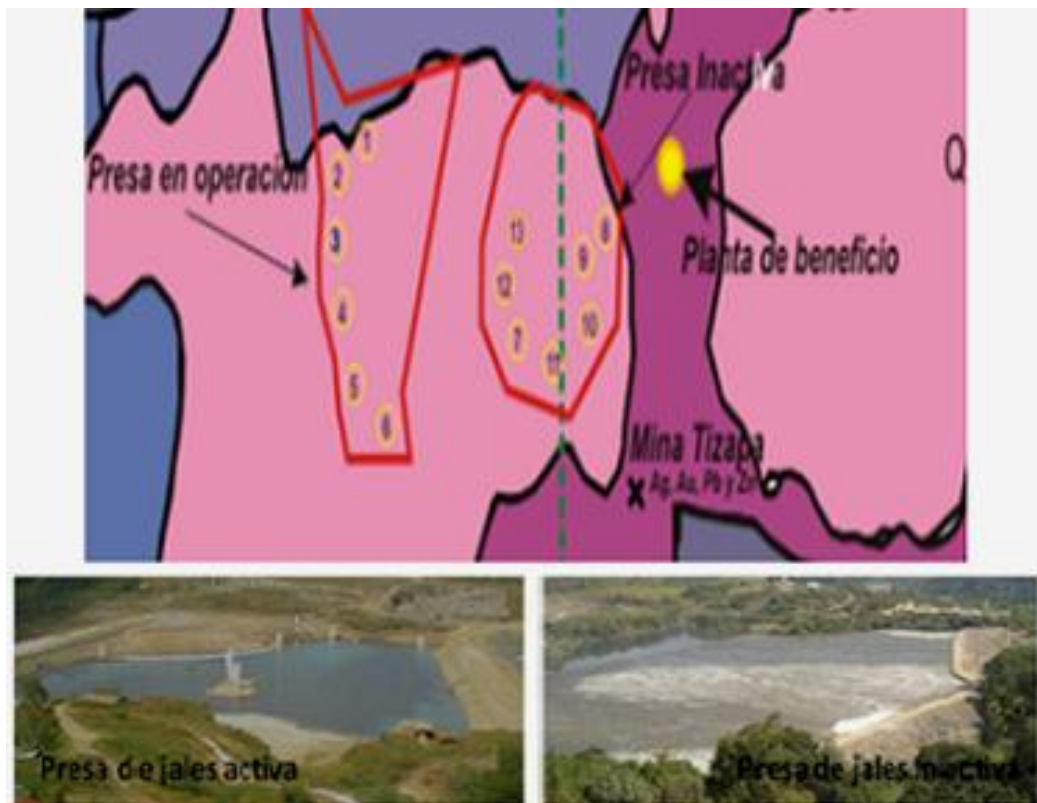


Figura 4.1.- Área de muestreo presas de jales.

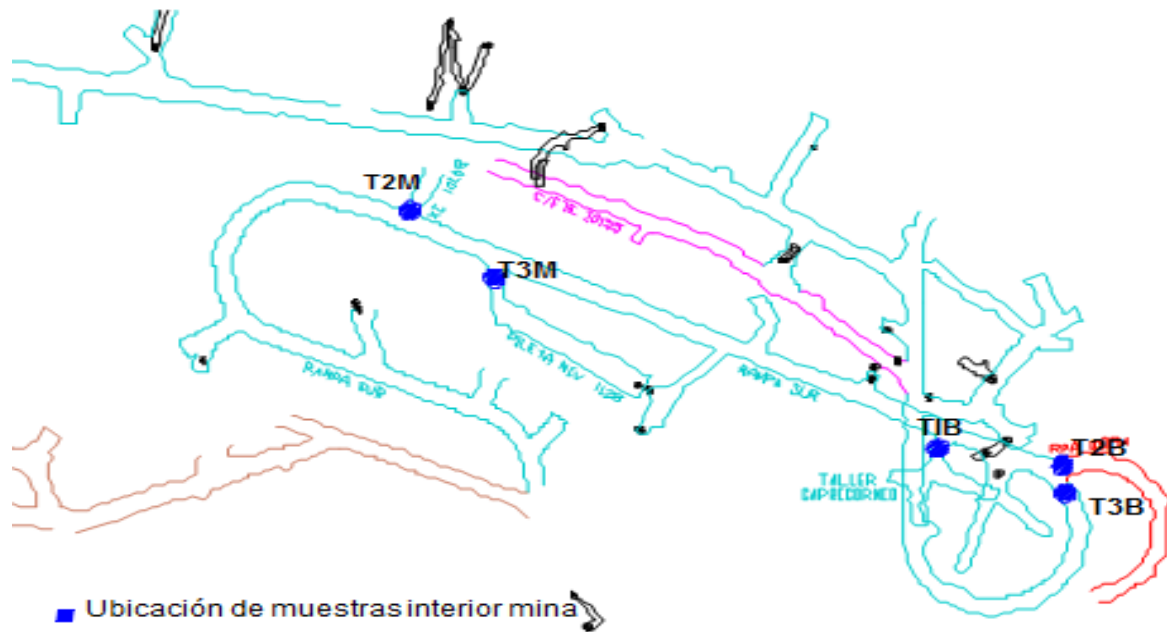


Figura 4.2.- Toma de muestras interior mina

4.2 Análisis de laboratorio

Las pruebas y análisis de laboratorio se realizaron en los siguientes laboratorios de la Universidad Nacional Autónoma de México: Laboratorio de Geoquímica Ambiental y Laboratorio de Difracción de Rayos X, del Instituto de Geología. También se realizaron análisis en un laboratorio comercial de Canadá (Actlabs).

4.2.1 Preparación de muestras

Las muestras de jales y las muestras de mina fueron secadas a 40°C en los hornos Felisa y Craft. Una vez secas, se disgregaron, tamizaron con malla del número 10 y se cuartearon y homogeneizaron.

4.2.2 pH y Conductividad Eléctrica

Para la obtención del pH y la conductividad (CE) se prepararon suspensiones de las muestras homogeneizadas en relación 1:5 sólido agua destilada. En el caso del pH las suspensiones se agitaron durante una hora a una velocidad de 220 rpm de acuerdo al

método de la EPA 9045C y se leyeron con un potenciómetro HI98185 PH/ORP/ISE Meter. En esta misma suspensión, una vez que ésta se centrifugó se determinó la conductividad eléctrica con un conductímetro Equipo Hanna HI99301 EC de acuerdo al método de la SSSA Book Series No.5 parte III (1996).

4.2.3 Capacidad de Generación de drenaje ácido

La capacidad de generación de acidez se valoró mediante la medición del pH en las muestras de jales y las muestras de mina, mientras que para las muestras de jales, visiblemente inalteradas, con valores de pH cercanos al neutro la peligrosidad se valoró a través de la realización de la prueba de balance ácido – base, utilizando el método propuesto por Lawrence, denominado “Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM – ABA)”, que es el señalado en la NOM-141-SEMARNAT-2004.

Esta prueba PM-ABA consiste en determinar en la muestras de jales:

El Potencial de neutralización (PN), que está dado por la presencia de minerales que contienen carbonatos, principalmente calcita,

El Potencial de acidez (PA), que está dado por la presencia de minerales que contienen azufre, principalmente pirita.

Para determinar el Potencial de Neutralización (PN), en esta PM-ABA se determinan los carbonatos por titulación. La muestra se agita durante 24 horas y después de que se haya completado la acidificación, se titula el ácido que no ha sido consumido con una base estandarizada (NaOH) a un pH = 8.3, luego se calcula el equivalente de carbonato de calcio a través de la ecuación:

$$PN = [(N_{NaOH} \times Vol_{NaOH} (ml)) - (N_{HCl} \times Vol_{HCl} (ml)) \times 50] / [peso (g)]$$

Para determinar el Potencial de Acidez (PA), la PM-ABA solamente toma en cuenta la cantidad de azufre que se encuentra en forma de “sulfuro” y se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$PA = \% \text{ de azufre como sulfuro } [\%S^{2-}] \times 31.25^3$$

$$\% \text{ de azufre como sulfuro } (S^{2-}) = \% \text{ azufre total} - \% \text{ azufre como sulfato } (S^{6+})$$

En la Norma Oficial Mexicana en materia de jales NOM -141 se señala que si la relación PN:PA < 1.2, los jales se consideran generadores potenciales de drenaje ácido.

4.2.4 Composición química

A) Concentraciones totales de elementos mayores (EM)

Se determinó la concentración total de los siguientes EM: silicio (SiO₂), titanio (TiO), aluminio (Al₂O₃), calcio (CaO), potasio (K₂O), manganeso (MnO), sodio (Na₂O), potasio (K₂O) y azufre (S). Las muestras homogeneizadas se secaron durante 24 horas a 100°C y se pulverizaron en molino de bolas hasta obtener una granulometría menor a 65 µm (malla 230). Con las muestras pulverizadas se prepararon pastillas fundidas. Las concentraciones totales de los EM se determinaron por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX) con un sistema secuencial de FRX Siemens SRS 3000.

B) Concentración total de elementos potencialmente tóxicos

Los análisis para determinar las concentraciones totales de EPT se realizaron con un equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X de tercera generación, NITTON XLt3 de Thermo Scientific, de acuerdo al método estandarizado US-EPA 6200⁴. Se determinaron las concentraciones totales de As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Ni, Co y V. Cada muestra homogeneizada y finamente molida se separó en bolsas de plástico aproximadamente en una cantidad de 60g.

³ El factor 31.25 se basa en la acidez generada, según se derivó por estequiometría química, para la oxidación completa de la pirita y la subsiguiente hidrólisis del Fe³⁺ generado. Por tanto, este factor relaciona la acidez total producida con la alcalinidad equivalente como CaCO₃ requerida para la neutralización.

⁴ Method 6200 "Field portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment". Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods
<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6200.pdf>

La calidad de los resultados de los análisis se controló a través de análisis de muestras de jales de referencia RTS-3, RTS-4 Y Till-4 (exactitud del método). Las muestras se analizaron por triplicado para valorar la precisión del método.

4.2.5 Generación de lixiviados sintéticos de jales y muestras de mina

Los lixiviados sintéticos se generaron utilizando el método descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003.

De acuerdo a la metodología referida en esta NOM-141 la prueba de extracción consiste en:

- Preparar suspensiones de los jales con agua en equilibrio con CO₂ (pH = 5.5 ± 0.2) en una relación 1:20
- Agitar durante 18.0 horas ± 0.25
- Separar la fase sólida del extracto mediante la centrifugación y filtración con membrana de 0.45 µm

Los análisis químicos de los extractos se realizaron utilizando Cromatografía iónica para el caso de los iones mayores en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, UNAM y las de los elementos potencialmente tóxicos regulados por la normatividad ambiental mexicana, se determinó por ICP-MS e ICP-OES en ACTLABS, Canadá.

4.2.6 Análisis mineralógicos

Las muestras se molieron y se homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se analizaron utilizando un portamuestras de aluminio en el intervalo angular 2θ de 4° a 70° y velocidades de 2°/minuto. Se utilizó un **Difractómetro Shimadzu XRD-6000** equipado con filtro de Ni, tubo de cobre y monocromador.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Parámetros generales

En las tablas 5-1 a y b, se muestran los resultados de pH y conductividad eléctrica. Para los jales, tanto oxidados como los visiblemente inalterados, los valores de pH varían entre 2.1 y 6.4; mientras que para las muestras de la mina varían entre 2.4 y 3.5. Los valores de conductividad eléctrica (mS/cm) varían entre 1.46 a 3.88 para los jales y entre 2.6 a 4.33 para las muestras de la mina subterránea.

Tabla 5.1a Valores de **pH** y conductividad eléctrica (**CE**) en muestras de jales

MUESTRA	CE	pH	OBSERVACIONES
	mS/cm		
JTZ1	1.78	5.3	Inalterados (gris)
JTZ2	1.71	5.1	inalterados (gris)
JTZ3	1.98	5	inalterados (gris)
JTZ4	1.46	5	inalterados (gris)
JTZ5	3.25	4	inalterados (gris)
JTZ6	1.82	5.1	inalterados (gris)
JTZ7	2.61	3	oxidados (café)
JTZ8	2.62	3	oxidados (café)
JTZ9	3.88	2.9	oxidados (café)
JTZ10	2.21	3.2	oxidados (café)
JTZ11	1.96	6.4	oxidados (café)
JTZ12	3.15	2.1	oxidados (café)
JTZ13	3.02	3	oxidados (café)

Tabla 5.1b Valores de pH y conductividad eléctrica en muestras de la mina

MUESTRA	CE	pH	OBSERVACIONES
	ms/cm		
T1B	2.88	2.7	oxidada (rojizo)
T2B	2.6	3.5	oxidada (amarillo)
T3B	3.33	3.3	oxidada (café)
T2M	4.33	2.4	oxidada (café)
T3M	2.8	3	oxidada (café)

Los resultados presentados en la Tablas 5.1 “a” y “b” indican que en las muestras de la mina y de los jales oxidados, de la presa inactiva de jales, los valores de pH son más bajos (mayor acidez) que en las muestras de los jales, visiblemente inalterados, de la presa activa.

Las muestras con valores de pH más ácidos presentan los mayores valores de CE (Fig. 5.1 a) y viceversa. El análisis estadístico de estos parámetros indica que el pH y CE se correlacionan de manera inversa con un coeficiente de correlación $r = -0.7657$ (Fig. 5.1b) lo que indica que a menor pH mayor CE.

Los valores altos de CE, el color café-amarillo y los valores de pH ácidos en las muestras de la mina y de los jales oxidados, de la presa inactiva de jales, indican que estos materiales están intensamente oxidados y que durante este proceso se liberaron protones y se formaron sales solubles.

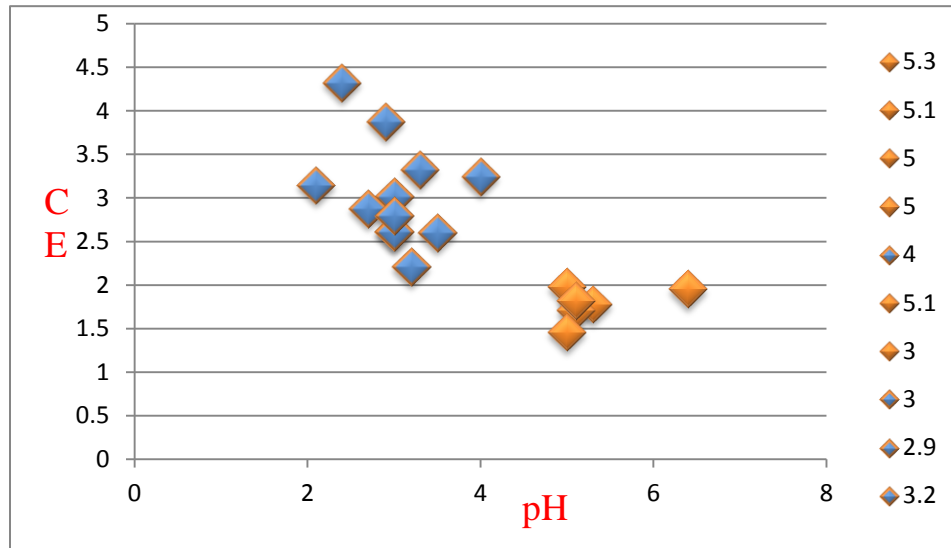
El hecho de que bajo las condiciones más ácidas se determinen los mayores valores de CE se debe probablemente a que en el medio ácido se propicia la disolución de minerales presentes en los residuos mineros. Considerando que la disolución de minerales implica su disociación en sus iones componentes, los cuales pasan a formar parte de los lixiviados, con el subsecuente aumento de la CE; por lo tanto éste parámetro podría ser utilizado como un indicador indirecto para valorar la calidad de los lixiviados de residuos mineros.

Es importante destacar que los jales grises de la presa activa de jales presentan valores de pH ligeramente ácidos y altos valores de CE, lo que parece indicar procesos de oxidación incipientes, pero que aún no han incidido en el cambio de coloración de estos residuos.

5.2 Potencial de generación de drenaje ácido

En el caso de los jales oxidados y las muestras de la mina, donde los procesos de oxidación son intensos (coloración de las muestras café-amarillo-rojo) la determinación del pH es suficiente para valorar su potencial para la generación de drenaje ácido. En este tipo de

muestras los valores bajos de pH (Tabla 5.1 “a” y “b”) indican condiciones de acidez extrema, lo que sugiere que actualmente son generadores de drenaje ácido.



Jales y muestras de minas oxidadas de color café con pH ácido



Jales poco inalterados grises, con pH cercano al neutro

Figura 5.1. “a” Comportamiento de valores de CE en función del pH

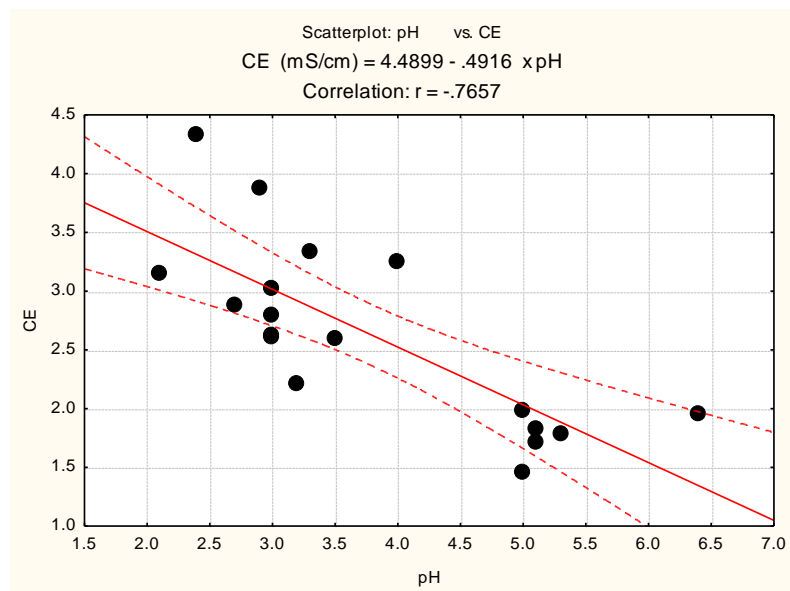


Figura 5.1. “b” Correlación entre los valores de CE en función del pH

En los jales, visiblemente inalterados, de color gris de la presa activa de jales, los valores de pH varían entre 4 y 5.3 (Tabla 5.1 “b”), lo que indica condiciones de acidez moderada. Sin embargo, la determinación de los valores de pH en jales inalterados no es suficiente para valorar su potencial de generación de drenaje ácido en el futuro; ya que en estos jales el proceso de oxidación está en la etapa inicial; por lo que en este tipo de jales se llevó a cabo la prueba de balance ácido-base, de acuerdo a la metodología señalada en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2004, con el fin de pronosticar si se generará drenaje ácido, en el futuro, cuando estos jales se oxiden por la acción del agua y aire.

Los resultados de las pruebas de balance ácido-base se presentan en la Tabla 5.2. Los resultados de esta prueba permiten pronosticar que los jales de esta mina serán generadores de drenaje ácido en el futuro cuando se oxiden, ya que el potencial de neutralización “PN” (media=16.5Kg CaCO₃/tonelada de jal) es muy inferior al potencial de acidez “PA” (media=584.105Kg CaCO₃/tonelada de jal). La relación PN/PA varía entre 0.021 y 0.051.

Tabla 5.2 Potencial de generación de drenaje ácido

MUESTRA	CE	pH	PN	PA	PN/PA
	mS/cm		Kg CaCO ₃ /ton	Kg CaCO ₃ /ton	
JTZI	1.78	5.3	12.34	586.25	0.021
JTZ2	1.71	5.1	12.71	558.70	0.023
JTZ3	1.98	5	12.72	616.89	0.021
JTZ4	1.46	5	14.65	683.15	0.021
JTZ6	1.82	5.1	17.38	589.86	0.029
JTZ11	1.96	6.4	25.53	502.56	0.051

Nota: De acuerdo a los criterios establecidos en la Normatividad Ambiental de México los jales se clasifican como generadores de potencial de acidez cuando la relación PN/PA < 1.2 (NOM-141-SEMARNAT-2004).

5.3 Concentración total de elementos mayores y elementos potencialmente tóxicos

5.3.1 Elementos mayores

En la Tabla 5.3 se muestran las concentraciones totales de los siguientes elementos: silicio (SiO_2), titanio (TiO_2), aluminio (Al_2O_3), manganeso (MnO), calcio (CaO), magnesio (MgO), potasio (K_2O), sodio (Na_2O), hierro (Fe_2O_3) y azufre (S).

De manera general, se puede observar en la Tabla 5.3, que la composición química de las muestras del sitio de estudio está dominada por la presencia de Fe como Fe_2O_3 , (14.08 – 45.09 %) y azufre (10.64 – 22.84%). En proporción muy inferior destacan las concentraciones de Si como SiO_2 (4.67 – 7.78%), Al como Al_2O_3 (0.76-2.11%) Ca como CaO (0.26-2.61%), Na como Na_2O (0.05-1.31%) y K como K_2O (0.06-0.52%)

Las concentraciones de los elementos asociados a minerales con potencial neutralizador son muy bajas (Si, Al, Ca, K y Na) con relación a los elementos que puedan asociarse a los minerales con potencial para la generación de acidez (Fe y S).

En el caso más conservador si se asume que todo el Fe está asociado a la pirita (principal sulfuro metálico que al oxidarse genera drenaje ácido) y que todo el calcio está asociado a la calcita (principal mineral neutralizador), se puede inferir que la calcita presente es insuficiente para poder neutralizar el drenaje ácido que se genere. De manera gráfica se presenta en la Figura 5.2 el predominio de las concentraciones totales de Fe sobre las concentraciones de Ca.

El predominio en la composición química, de las muestras de estudio, de elementos asociados a minerales productores de acidez sobre los elementos (asociados a minerales consumidores de acidez, explica el hecho de que los jales de la presa inactiva y muestras de la mina sean, actualmente, generadores de drenaje ácido; y que las pruebas de pronósticos (prueba de balance ácido-base) indiquen que los jales de la presa activa serán generadores de drenaje ácido en el futuro.

Tabla 5.3 Concentración de los elementos mayores por Fluorescencia de Rayos X

CLAVE MAPA	MUESTRA		SiO ₂	TiO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	S
			%									
1	JTZ1	Jales	6.54	< LOD	0.99	40.59	0.08	0.83	0.33	0.13	0.11	19.90
2	JTZ2		7.49	< LOD	0.98	35.21	0.08	0.66	0.42	0.21	0.14	18.68
3	JTZ3		6.57	< LOD	0.88	41.78	0.08	0.80	0.38	0.09	0.10	20.71
4	JTZ4		6.76	< LOD	0.83	42.70	0.08	0.67	0.27	0.08	0.08	22.61
5	JTZ5		6.76	< LOD	1.05	42.52	0.08	0.48	0.26	0.70	0.17	18.26
6	JTZ6		7.14	< LOD	0.84	39.99	0.09	0.71	0.35	0.21	0.10	20.00
7	JTZ7		7.41	< LOD	0.84	44.71	ND	0.58	0.29	0.17	0.10	22.84
8	JTZ8		7.14	< LOD	0.76	45.09	0.05	0.53	0.28	0.31	0.07	22.01
9	JTZ9		7.78	< LOD	1.17	40.25	0.05	0.54	0.34	0.29	0.11	19.06
10	JTZ10		6.86	< LOD	1.01	40.35	ND	0.71	0.33	0.39	0.11	19.93
11	JTZ11		7.55	< LOD	1.06	40.72	ND	0.54	0.55	0.19	0.06	18.11
12	JTZ12		5.81	< LOD	0.88	38.28	ND	0.12	0.29	1.31	0.15	19.76
13	JTZ13		5.10	< LOD	1.98	42.96	ND	0.55	0.26	0.05	0.10	17.95
T-2M	T-2M	Mina	5.30	< LOD	1.96	40.24	ND	0.44	1.50	0.14	0.27	15.59
T-3M	T-3M		4.67	< LOD	1.76	16.26	0.04	0.53	2.61	0.21	0.43	10.64
T-1B	T-1BOTELLA		5.35	< LOD	1.65	14.08	0.06	0.44	1.89	0.26	0.52	10.67
T-2B	T-2BOTELLA		7.26	< LOD	2.11	31.66	ND	0.32	0.55	0.14	0.28	15.17
T-3B	T-3BOTELLA		5.92	< LOD	1.68	41.26	0.06	0.47	1.23	0.14	0.27	15.09
Mínimo			4.67	<LOD	0.76	14.08	0.04	0.12	0.26	0.05	0.06	10.64
Máximo			7.78	<LOD	2.11	45.09	0.09	0.83	2.61	1.31	0.52	22.84
Promedio			6.52	<LOD	1.25	37.70	0.07	0.55	0.67	0.28	0.18	18.17

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis

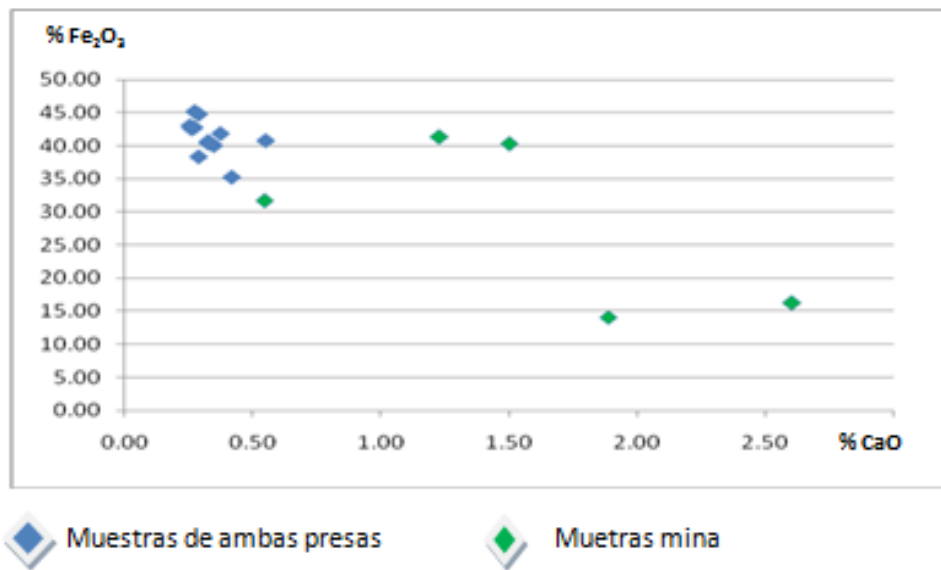


Figura.5.2 Concentración de Fe₂O₃ vs CaO

5.3.2 Elementos potencialmente tóxicos

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados de las concentraciones de los EPT en las muestras de los jales y de la mina de la zona de estudio.

A) Elementos potencialmente tóxicos regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia de jales: Norma Oficial Mexicana NOM-141⁵

Las concentraciones totales de Cr y Hg son inferiores al límite de detección, lo que indica que en la zona de estudio los jales y las muestras de la mina se caracterizan por la ausencia de estos elementos. Además, estas muestras se caracterizan por las bajas concentraciones de Ba (No detectado - 601 mg/kg), Ag (No detectado – 62 mg/kg), y Se (No detectado – 31 mg/kg), que son incluso inferiores a los límites permisibles establecidos en la normatividad mexicana para suelos contaminados⁶, por lo que se puede afirmar que en la zona de estudio no hay una fuente de contaminación de estos EPT (Cr, Ba, Ag, Hg y Se).

Sin embargo, las concentraciones de As (315 – 8291 mg/kg), Cd (No detectado – 181 mg/kg) y Pb (446 – 3043 mg/kg) son relativamente altas y pueden representar un peligro y riesgo para el medio ambiente y salud humana. Cabe señalar que la actual NOM-141-SEMARNAT-2003, no considera límites permisibles respecto a la concentración total EPT esto debería ser considerado por las autoridades.

Las concentraciones de As, Cd y Pb son mayores a los valores de fondo máximo, reportados para la región donde se ubica la zona de estudio⁷. De manera general, en el caso del As, el valor de fondo se supera de 2 hasta 52 veces, para el plomo de 5 hasta 33 veces y para el cadmio de 2 a 14. Veces (Fig. 5.3).

⁵ Los elementos normados son: As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb y Se

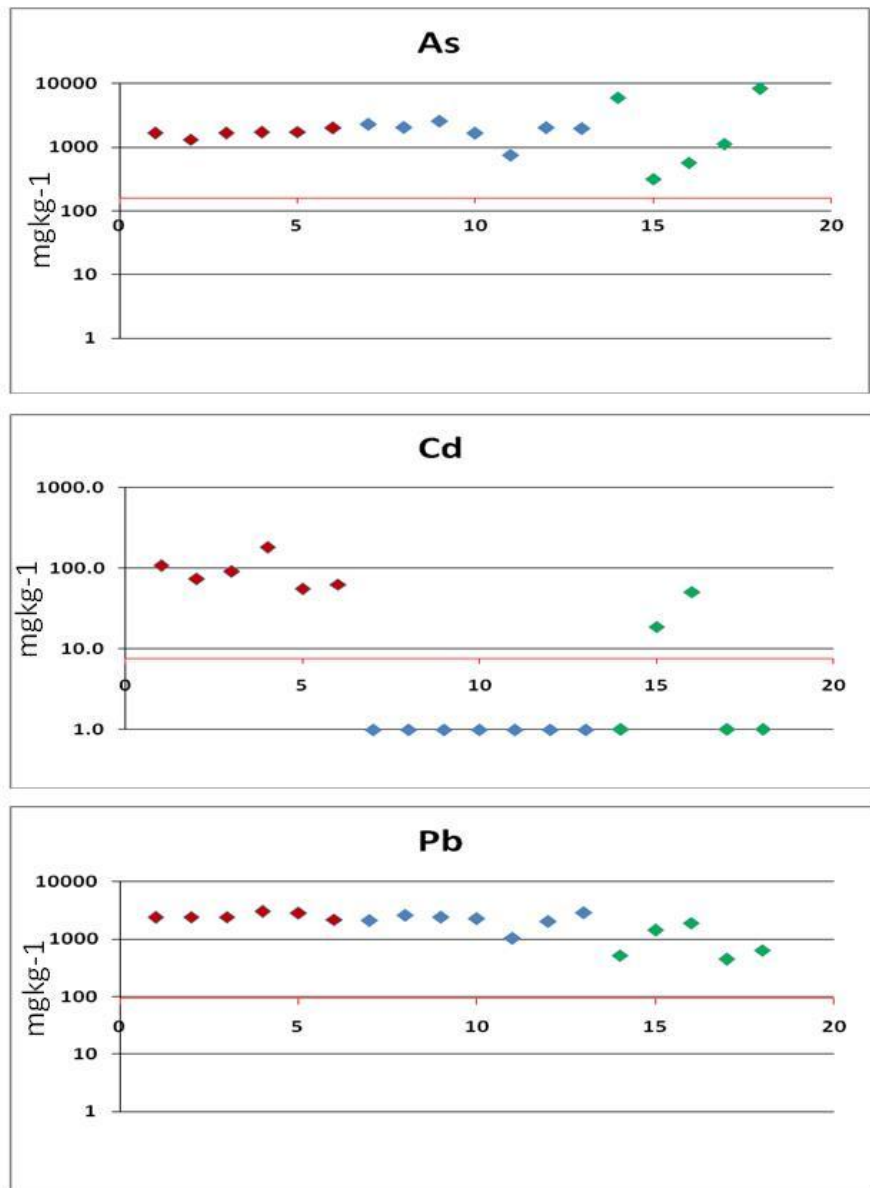
⁶ Límite permisibles de EPT (mg/kg) indicados en la NOM-147- SEMARNAT-2004: As = 22, Ba = 2400, Be = 150, Cd = 37, Cr = 280, Hg = 23, Ni = 1600, Ag = 390, Pb = 400, Se = 390, V = 78

⁷ Valores de fondo (mg/kg) reportados; As = 161, Cd = 8 y Pb = 94. Fuente: SNIB-CONABIO Proyecto No. FBII293/GS00/08. México D.F

Tabla 5.4 Concentración total de Elementos Potencialmente Tóxicos

CLAVE			As	Ba	Cd	Cr	Hg	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Ni	Co	V
MAPA	MUESTRA		mg/kg												
1	JTZ1	Jales	1666	259.8	107.6	< LOD	< LOD	50.6	2378	< LOD	941	18577	< LOD	< LOD	< LOD
2	JTZ2		1318	173.6	73.9	< LOD	< LOD	38.2	2403	22.22	1075	13095	< LOD	< LOD	< LOD
3	JTZ3		1661	226.1	90.9	< LOD	< LOD	54.4	2420	< LOD	1065	15559	< LOD	< LOD	< LOD
4	JTZ4		1700	288	181	< LOD	< LOD	62.5	3043	< LOD	1268	32644	< LOD	< LOD	< LOD
5	JTZ5		1730	600.8	55.6	< LOD	< LOD	37	2830	28.41	996	8580	< LOD	< LOD	< LOD
6	JTZ6		2013	209.3	62.9	< LOD	< LOD	29.8	2170	19.22	927	12081	< LOD	< LOD	< LOD
7	JTZ7		2288	262.9	< LOD	< LOD	< LOD	27.8	2135	< LOD	182	2733	< LOD	< LOD	< LOD
8	JTZ8		2041	273.4	< LOD	< LOD	< LOD	35.3	2624	< LOD	198	1815	242.2	< LOD	< LOD
9	JTZ9		2562	207.5	< LOD	< LOD	< LOD	26.1	2443	< LOD	283	1581	< LOD	< LOD	< LOD
10	JTZ10		1659	150.6	< LOD	< LOD	< LOD	27	2301	22.51	214	1382	< LOD	< LOD	< LOD
11	JT11		746	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	1048	< LOD	154	4359	< LOD	< LOD	< LOD
12	JTZ12		2025	173.7	< LOD	< LOD	< LOD	23.4	2053	16.39	130	1319	< LOD	< LOD	< LOD
13	JTZ13		1964	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	30.5	2913	30.71	192	2026	< LOD	< LOD	< LOD
T-2M	T-2M	Mina	5991	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	524	< LOD	83	1565	150.5	< LOD	< LOD
T-3M	T-3M		315	144.5	18.7	< LOD	< LOD	21.4	1434	< LOD	363	5600	< LOD	< LOD	< LOD
T-1B	T-1BOTELLA		573	233.8	51.1	< LOD	< LOD	32.6	1897	< LOD	535	8452	< LOD	< LOD	< LOD
T-2B	T-2BOTELLA		1126	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	446	< LOD	102	1070	292	< LOD	< LOD
T-3B	T-3BOTELLA		8291	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	635	< LOD	164	3863	< LOD	< LOD	< LOD
Mínimo			315	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	446	< LOD	83	1070	< LOD	< LOD	< LOD
Máximo			8291	601	181	< LOD	< LOD	62	3043	31	1268	32644	292	< LOD	< LOD
Promedio			2204	246	80	< LOD	< LOD	35	1983	23	493	7572	228	< LOD	< LOD

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis



Muestras

◆ Jales de presa activa

◆ Jales de presa inactiva

◆ Muestras mina

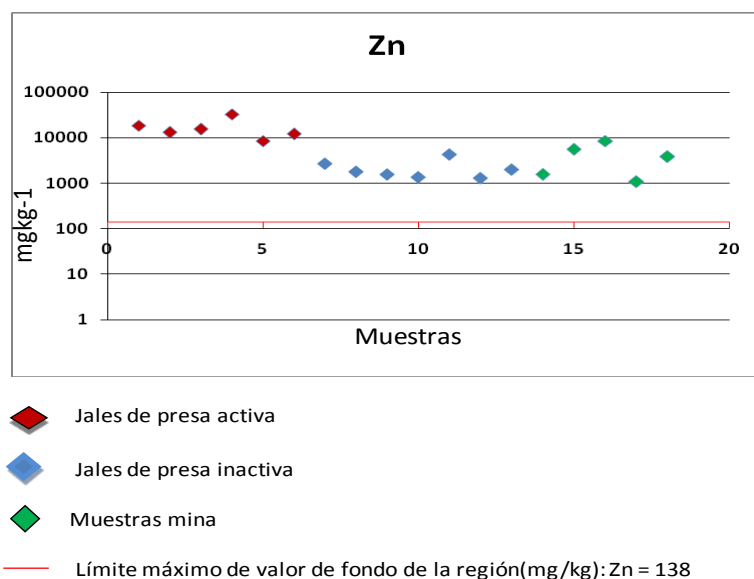
— Límite máximo de valor de fondo de la región(mg/kg): As= 161, Cd= 8, Pb= 94

Figuras 5.3. Concentración de As, Cd y Pb y valores de fondo reportados para la región: As= 161, Cd=8 y Pb=94

B) Elementos potencialmente tóxicos No regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia de jales: Norma Oficial Mexicana

Adicional a los elementos potencialmente tóxicos (EPT) regulados en NOM-141, se determinaron las concentraciones de otros EPT, como Ni y V. Los resultados indican que en la zona de estudio no hay problemas de contaminación por estos elementos potencialmente tóxicos ya que las concentraciones de Co, V y Ni (No detectado - 292 mg/kg) no fueron detectados por la técnica de análisis, son incluso inferiores a los límites permisibles establecidos en la normatividad mexicana para suelos contaminados⁸.

Las concentraciones de Cu (83-1268 mg/kg) y Zn (1070 – 32644 mg/kg) que no son regulados en la normatividad ambiental mexicana, son relativamente altas. Las concentraciones de Cu y Zn, son mayores a los valores de fondo máximo, reportados para la región donde se ubica la zona de estudio⁹. En el caso del Cu, el valor de fondo se supera de 1 hasta 13 veces, mientras que para el caso de Zn se supera de 8 hasta 236 veces (Fig. 5.4).



Figuras 5.4. Concentración de Zn y volares de fondo reportados para la región

⁸ Límite permisibles de EPT (mg/kg) indicados en la NOM-147- SEMARNAT-2004: As = 22, Ba = 2400, Be = 150, Cd = 37, Cr = 280, Hg = 23, Ni = 1600, Ag = 390, Pb = 400, Se = 390, V = 78
⁹ Valores de fondo (mg/kg) reportados; Cu = 100 y Zn = 138. Fuente: SNIB-CONABIO Proyecto No. FBII293/GS00/08. México D.F

5.4 Concentración geodisponible (soluble) de componentes mayoritarios y elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados de jales y muestras de la mina

5.4.1 Componentes mayoritarios: cationes y aniones de los lixiviados

La composición química de los lixiviados está dominada por la presencia del anión sulfato (SO_4^{2-}) y el catión Ca^{2+} . Las mayores concentraciones de SO_4^{2-} y Ca^{2+} se determinaron en los lixiviados de las muestras de mina, seguidas de los jales oxidados, Tabla 5.5. Las menores concentraciones de SO_4^{2-} y Ca^{2+} corresponden a los lixiviados de los jales grises que muestran poca alteración visible.

Tabla 5.5 Concentración de componentes mayoritarios en lixiviados

CLAVE MAPA	MUESTRA		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
			mg/L					
1	JTZ1	Jales inalterados	0.409	0.368	150.2	13.4	0.5	572
2	JTZ2		0.306	0.313	112.4	11.4	0.3	400
3	JTZ3		7.426	0.930	75.5	13.3	1.5	485
4	JTZ4		0.414	0.285	65.6	6.7	0.3	372
5	JTZ5		12.303	0.875	345.3	77.3	0.3	1470
6	JTZ6		2.163	0.378	155.6	18.3	0.7	564
7	JTZ7	Jales oxidados	2.135	0.000	279.7	4.7	0.8	954
8	JTZ8		0.748	0.000	257.2	2.1	0.3	953
9	JTZ9		0.334	0.000	196.5	7.4	0.5	1864
10	JTZ10		0.183	0.000	170.6	1.1	0.3	899
11	JT11		1.778	0.516	409.1	0.7	0.7	1014
12	JTZ12		1.016	<LOD	242.5	12.0	0.9	1219
13	JTZ13		0.677	<LOD	262.4	7.1	0.6	1096
T1B	T1B	Mina	2.789	<LOD	414.8	2.9	2.2	1627
T2B	T2B		0.466	<LOD	971.9	104.4	0.0	1980
T3B	T3B		6.443	<LOD	553.7	80.0	2.7	1970
T2M	T2M		1.133	<LOD	565.0	14.6	3.4	1892
T3M	T3M		1.133	<LOD	598.2	34.5	2.9	1683

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis

El análisis estadístico de estos datos indica que la mayor correlación se determinó entre Ca^{2+} y SO_4^{2-} con coeficientes de correlación “r” = 0.8 (Tabla 5.6) lo que indica que la presencia de estos iones podría deberse a la disolución del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que es uno de los minerales secundarios más importantes que ocurren como producto de las reacciones de oxidación de la pirita (FeS_2) y neutralización por la disolución de la calcita (CaCO_3) en los residuos mineros, a través de la siguiente reacción química:

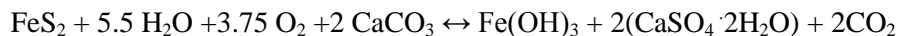


Tabla 5.6 Matriz de correlación entre los componentes mayoritarios y los valores de pH y CE en los lixiviados de la zona de estudio

	Na_+	K_+	Ca_{2+}	Mg_{2+}	Cl	SO_4^{2-}	CE	pH
Na_+	1							
K_+	-0.1	1						
Ca_{2+}	0.0	0.7	1					
Mg_{2+}	0.5	0.4	0.7	1				
Cl	0.1	0.6	0.4	0.1	1			
SO_4^{2-}	0.1	0.7	0.8	0.5	0.5	1		
CE	0.2	0.5	0.4	0.2	0.5	0.8	1	
pH	0.1	-0.6	-0.3	-0.1	-0.4	-0.6	-0.8	1

Por otro lado, la buena correlación entre los valores de SO_4^{2-} y CE ($r = 0.8$) indica que a mayores valores de CE, mayores valores de SO_4^{2-} (Fig. 5.5), lo que indica que la concentración de este anión es la causa de la CE, lo que a su vez demuestra que los procesos de oxidación-neutralización, que ocurren en los residuos mineros de estudio, van acompañados de la liberación de SO_4^{2-} , por lo que corroboramos la afirmación hecha con anterioridad acerca de que la CE es un parámetro que podría ser utilizado como un indicador indirecto para valorar la calidad de los lixiviados de residuos mineros.

También es importante notar que las mayores concentraciones de Ca^{2+} y SO_4^{2-} se determinaron en los lixiviados más ácidos (Fig. 5.6).

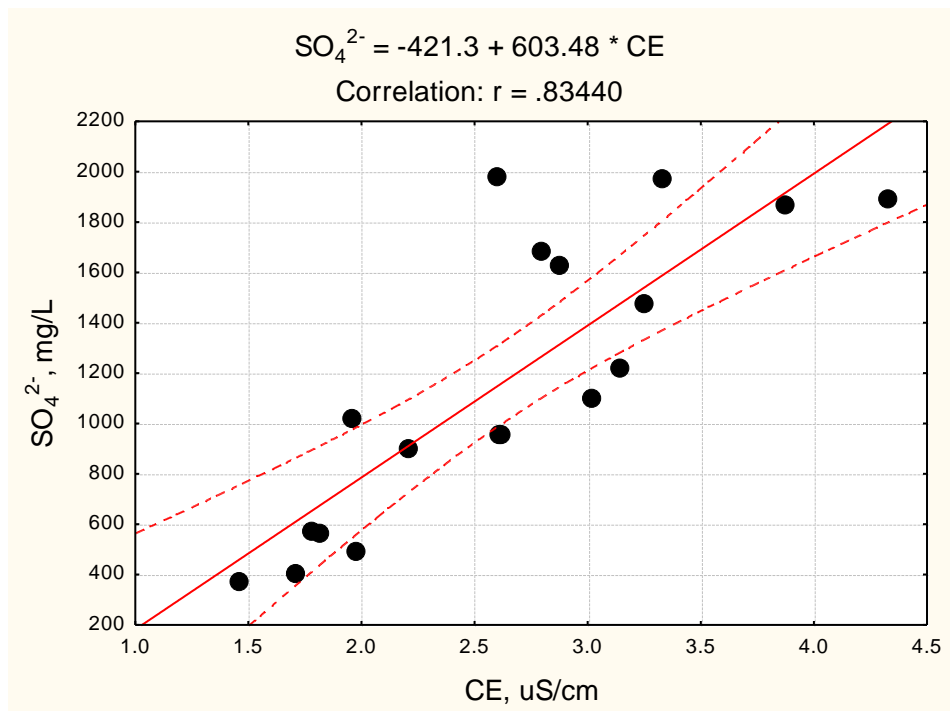


Figura 5.5 Correlación entre SO_4^{2-} y CE

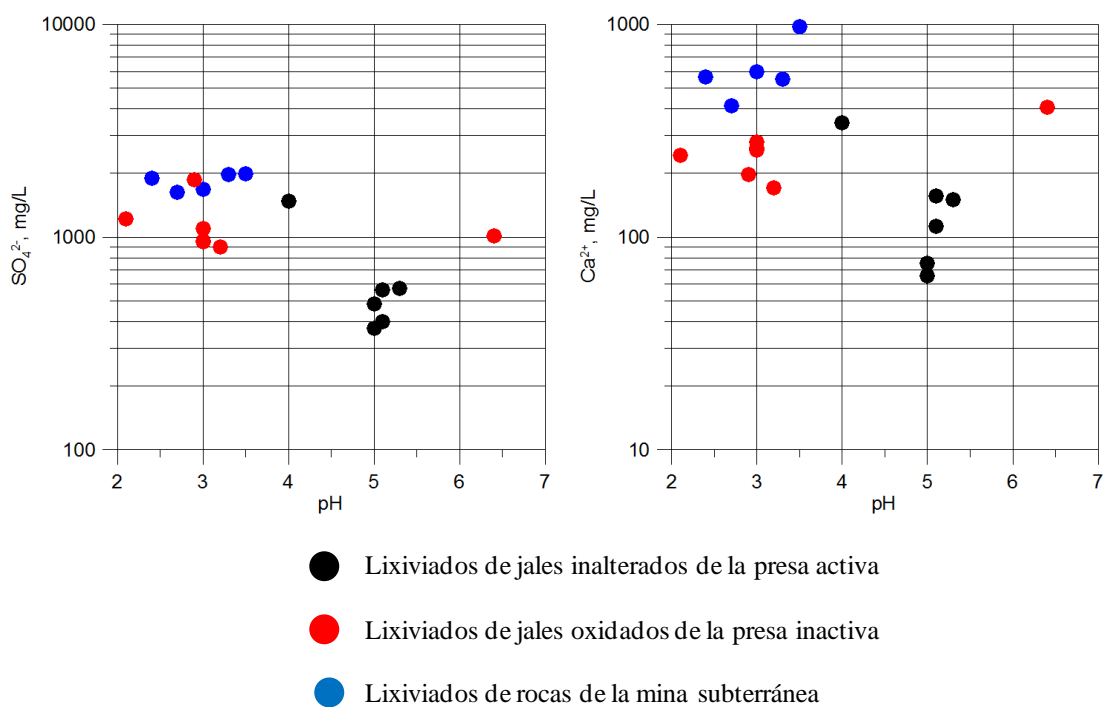


Figura 5.6.- Comportamiento de las concentraciones de Ca^{2+} y SO_4^{2-} en función del pH de los lixiviados en los jales y muestras de mina

5.4.2 Elementos potencialmente tóxicos en lixiviados

Con el objetivo de valorar la peligrosidad, por toxicidad, de los jales y muestras de la mina del sitio de estudio, se realizó la prueba de extracción señalada en la Norma Oficial Mexicana NOM – 141 – SEMARNAT – 2003. Los resultados se muestran en la Tabla 5.7 y 5.8.

A) Elementos potencialmente tóxicos regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia de jales NOM – 141 – SEMARNAT – 2003

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones geodisponibles (solubles) de los EPT regulados en la NOM – 141 – SEMARNT – 2003, son inferiores a los límites permisibles en dicha norma; por lo cual se concluye que estos materiales se pueden clasificar como NO PELIGROSOS por su toxicidad debido a que no contienen elementos potencialmente tóxicos geodisponibles (solubles) en concentraciones superiores a las señaladas en dicha norma

A pesar de las altas concentraciones totales de arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb) (ver Tabla 5.4 de la sección 5.3.2), la concentraciones geodisponibles o solubles son relativamente bajas. En el caso del Cd, las concentraciones geodisponibles son del mismo orden tanto en el medio ácido como el neutro. Sin embargo, en el caso del As y Pb se puede observar (Fig. 5.7) que a valores ácidos de pH, se determinaron concentraciones muy bajas de estos EPT, lo que podría indicar que su retención en la fase sólida está relacionada con procesos de atenuación natural que disminuyen la peligrosidad de los jales y obras mineras de la zona de estudio.

B) Elementos potencialmente tóxicos No regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia a de jales: Norma Oficial Mexicana

Para los elementos potencialmente tóxicos (EPT), cuya concentración total fue detectada en los jales y las muestras de la mina subterránea, se determinaron las concentraciones geodisponibles (solubles) (Tabla 5.8).

Los resultados indican que los lixiviados de los jales y muestras de mina de la zona de estudio se caracterizan por concentraciones relativamente altas de Si, Al, Fe, Mn, Cu y Zn que alcanzan valores máximos (mg/L) de 9.6, 40, 224, 9.8, 5.3 y 90, respectivamente.

Para el caso de Fe y Al, las mayores concentraciones de estos EPT corresponden a los lixiviados ácidos con pH < 4; mientras que para el caso del Si, Zn, Cu y Mn, las mayores concentraciones geodisponibles corresponden a los lixiviados ácidos (pH < 4) y medianamente ácidos (pH < 5.5) (Fig. 5.8).

Tabla 5.7 Concentración geodisponible en los lixiviados de elementos potencialmente tóxicos (EPT) regulados en la Normatividad Ambiental Mexicana (NOM-141) en los jales y muestras de mina

Clave Mapa	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Ag	Pb	Se
	mg/L							
1	0.0042	0.0181	0.242	<LOD	<LOD	<LOD	1.99	0.0062
2	0.0067	0.0173	0.172	<LOD	<LOD	<LOD	2.68	0.0075
3	0.0043	0.0137	0.232	<LOD	<LOD	<LOD	2.45	0.0093
4	0.006	0.0131	0.265	<LOD	<LOD	<LOD	2.91	0.0151
5	0.0135	0.0023	0.588	0.0024	<LOD	<LOD	2.05	0.0178
6	0.0062	0.0195	0.199	<LOD	<LOD	<LOD	1.15	0.0086
7	0.198	0.0103	0.0461	0.0665	<LOD	<LOD	0.85	0.0084
8	0.11	0.0069	0.0582	0.0261	<LOD	<LOD	2.35	0.0103
9	0.0746	0.0148	0.273	0.0486	<LOD	<LOD	0.64	0.0097
10	0.0039	0.0029	0.0365	0.0042	<LOD	<LOD	0.0043	0.0202
11	0.0256	0.0357	0.0001	<LOD	<LOD	<LOD	0.0007	0.0191
12	0.015	0.0105	0.08	0.0373	<LOD	<LOD	1.5	0.004
13	0.0069	0.0074	0.067	0.0234	<LOD	<LOD	2.32	0.0397
T2M	0.163	0.0076	0.0564	0.0011	<LOD	<LOD	0.0118	0.0022
T3M	0.0162	0.0071	0.0879	BLD	<LOD	<LOD	0.0032	0.0033
T1B	0.0501	0.0031	0.258	0.001	<LOD	<LOD	0.0172	0.0058
T2B	0.0029	0.001	0.0838	0.0031	<LOD	<LOD	0.0034	0.002
T3B	0.241	0.0046	0.053	<LOD	<LOD	<LOD	0.0035	0.0134
Mínimo	0.0029	0.001	0.0001	<LOD	<LOD	<LOD	0.0007	0.002
Máximo	0.241	0.0357	0.588	0.0665	<LOD	<LOD	2.91	0.0397
Límite permisible NOM-141-SEMARNAT-2004								
	5.0	100.0	1.0	5.0	0.2	5.0	5.0	1.0

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis

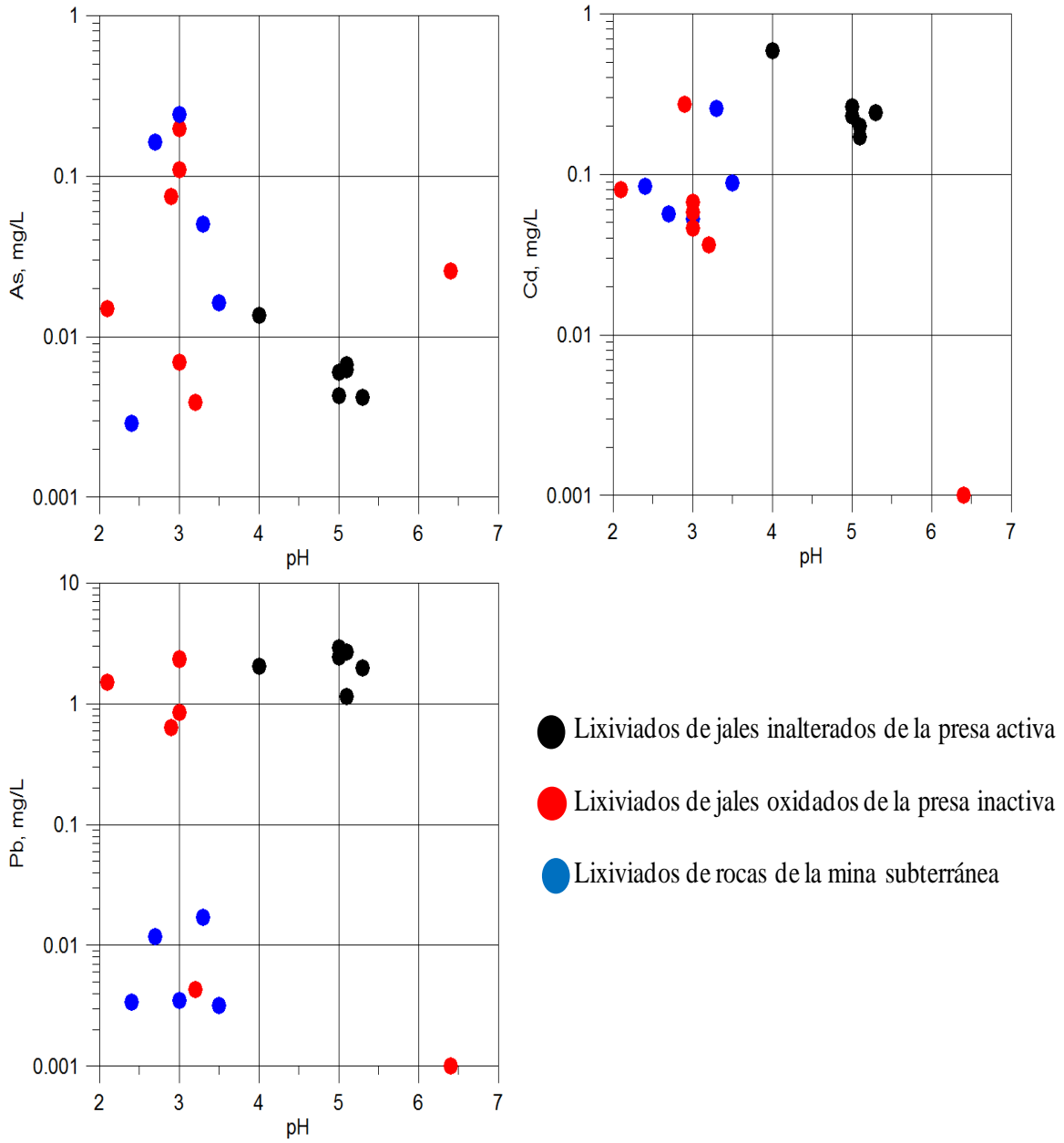


Figura 5.7 Comportamiento de las concentraciones geodisponibles (solubles) de As, Cd y Pb en función del pH de los lixiviados en los jales y muestras de mina

Tabla 5.8 Concentración geodisponible en los lixiviados de elementos potencialmente tóxicos (EPT) No regulados en la Normatividad Ambiental Mexicana (NOM-141), cuya concentración total fue detectada en los jales y muestras de mina

Clave Mapa	Si	Al	Fe	Mn	Cu	Zn
	mg/L					
1	1.10	0.03	0.05	3.24	0.23	29.70
2	0.80	0.01	0.04	2.08	0.19	19.60
3	1.00	<LOD	<LOD	2.36	0.11	24.70
4	0.90	0.01	0.04	2.47	0.15	32.60
5	1.60	0.56	4.41	9.80	1.58	77.70
6	1.00	0.00	0.05	3.05	0.13	26.50
7	0.60	6.60	41.50	0.33	1.48	6.39
8	0.70	14.90	54.00	0.35	1.30	6.77
9	1.40	40.00	224.00	0.81	5.33	37.60
10	0.60	9.00	18.90	0.28	0.38	3.62
11	6.80	0.01	<LOD	0.00	0.01	0.01
12	0.80	23.00	93.90	0.67	0.90	10.30
13	0.80	29.90	71.30	0.73	1.43	8.83
T2M	4.70	1.50	31.20	0.64	0.12	23.40
T3M	9.60	8.30	17.00	1.40	0.37	43.70
T1B	3.50	4.90	6.00	1.35	0.49	36.20
T2B	1.90	2.80	43.80	1.75	0.09	17.30
T3B	9.60	3.14	9.46	4.27	0.07	90.10
Mínimo	0.60	<LOD	<LOD	0.00	0.01	0.01
Máximo	9.60	40.00	224.00	9.80	5.33	90.10

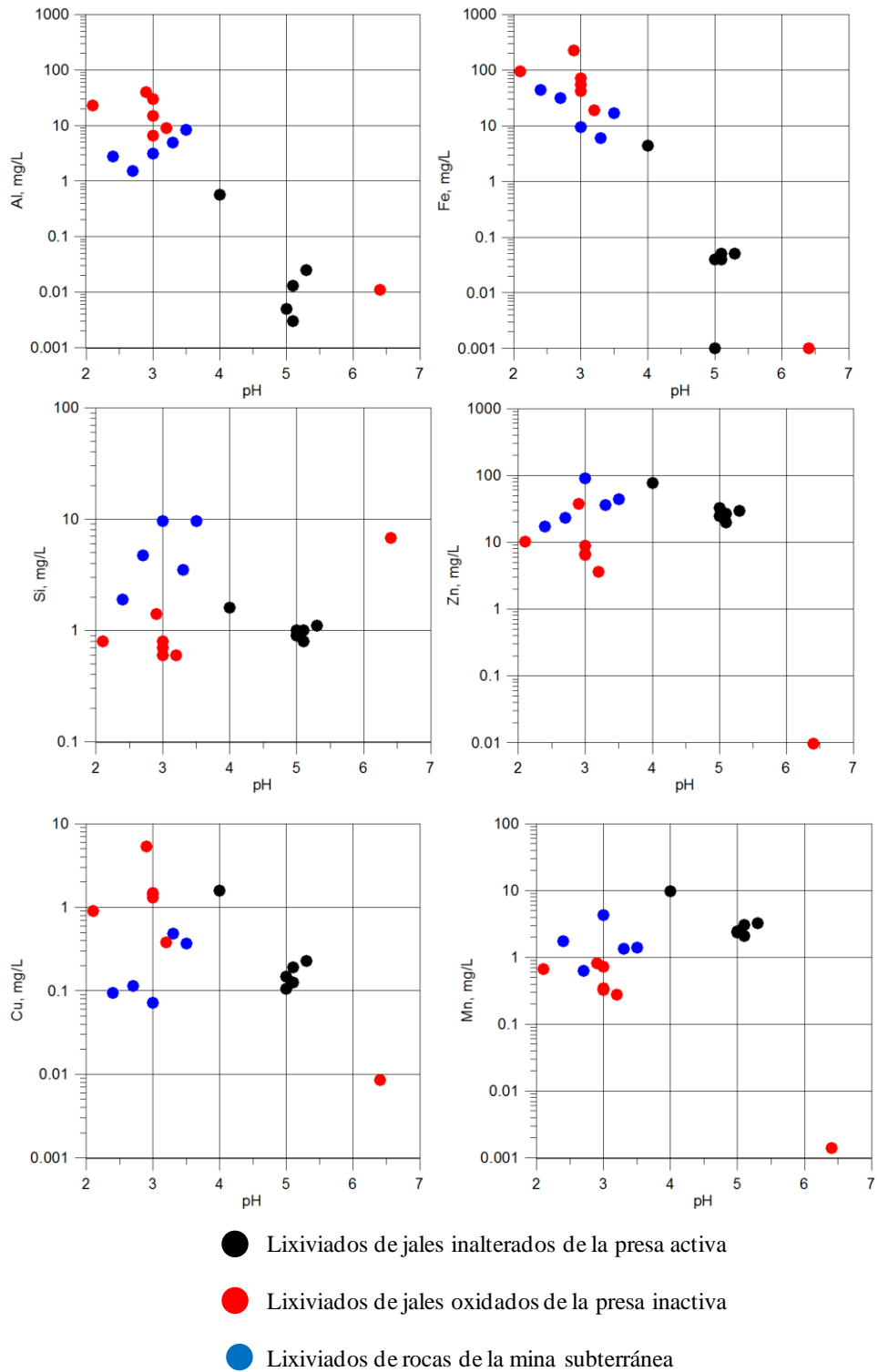


Figura 5.8 Comportamiento de las concentraciones geodisponibles (solubles) de Fe, Al, si, Zn, Cu y Mn en función del pH de los lixiviados en los jales y muestras de mina

5.5 Composición mineralógica

Los resultados de la composición mineralógica, determinada por DRX, se presentan en los cuadros 5.1 y 5.2.

En todas las muestras se identificaron los minerales primarios pirita (FeS_2), cuarzo (SiO_2), mica tipo moscovita: $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$ y clorita $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$. En dos muestras de jales de la presa activa se identificaron picos de calcita (CaCO_3).

Adicionalmente, en las muestras de jales oxidados de la presa inactiva y de las muestras de mina se identificaron los minerales secundarios yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y jarosita $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})$; que son propios de ambientes mineros donde se genera drenaje ácido (Romero et al., 2007, 2009 y 2010). Adicionalmente en algunas muestras se identificaron picos de plagioclasas $(\text{Ca}(\text{Si,Al})_2\text{Si}_2 \text{O}_8)$.

Cuadro 5.1 Composición mineralógica de los jales de las presas activa (JTZ1-JTZ6) e inactiva (JTZ7-JTZ13)

Mineralogía de los jales	JTZ1	JTZ2	JTZ3	JTZ4	JTZ5	JTZ6	JTZ7	JTZ8	JTZ9	JTZ10	JTZ11	JTZ12	JTZ13
Pirita: FeS ₂	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cuarzo: SiO ₂	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Clorita: (Mg,Fe,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Mica tipo moscovita: (k,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Calcita: CaCO ₃		X		X									
Yeso: CaSO ₄ 2H ₂ O			X		X	X	X						
Jarosita: (K,H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆							X				X	X	
Plagioclasa :Ca(Si,Al) ₂ Si ₂ O ₈											X		

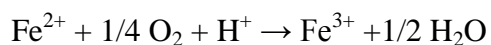
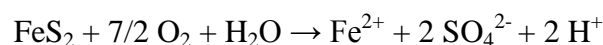
Cuadro 5.2 Composición mineralógica de las muestras mina

Mineralogía muestras mina	T2M	T3M	T1B	T2B	T3B
Pirita: FeS ₂	X	X	X	X	X
Cuarzo: SiO ₂	X	X	X	X	X
Clorita: (Mg,Fe,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	X	X	X		X
Mica tipo moscovita: (k,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	X	X	X	X	X
Yeso: CaSO ₄ 2H ₂ O	X	X		X	X
Jarosita: (K,H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	X	X		X	X
Plagioclasa :(Ca (Si,Al) ₂ Si ₂ O ₈		X			

5.6 Procesos geoquímicos identificados en los jales y muestras de mina de la zona de estudio

a) Oxidación de pirita y generación de acidez

Los resultados de la difracción de rayos X indican que el principal sulfuro metálico en las muestras estudiadas es la pirita cuya oxidación derivó en la generación de drenaje ácido (liberación de protones H^+), Fe^{2+} y Fe^{3+} y sulfatos (SO_4^{2-}) de acuerdo a las siguientes reacciones:

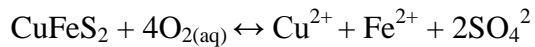
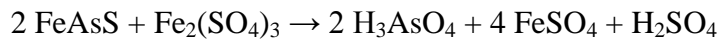
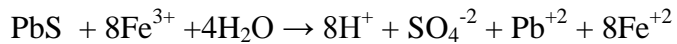
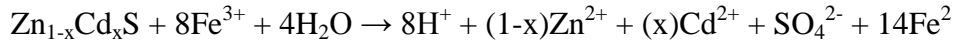


Lo anteriormente expuesto se pudo confirmar con los resultados en los lixiviados ácidos de la zona de estudio, donde se determinaron concentraciones de Fe geodisponibles (solubles) de hasta de 224 mg/L y para el SO_4^{2-} hasta de 1980 mg/L.

Aunque el análisis mineralógico sólo permitió la identificación elevada de pirita, las altas concentraciones de As, Zn y Pb permite inferir que en los jales y muestras de mina es posible la existencia de esfalerita (ZnS), galena (PbS), arsenopirita ($FeAsS$) y calcopirita ($FeCuS_2$) cuya oxidación y subsecuente disolución explicarían las concentraciones geodisponibles de Zn, Pb, As y Cu. La presencia de Cd en los lixiviados podría explicarse debido a la oxidación-disolución de la esfalerita, ya que ha sido reportada la presencia de Cd como impureza importante en la composición de la esfalerita (Romero et al., 2007), que incluso podría llegar a formar la esfalerita cádmica ($Zn_{1-x}Cd_xS$).

Diferentes autores han reportado las reacciones de oxidación de los principales sulfuros metálicos que se encuentran en las zonas mineras (Faure 1980, Bain et al. 2000, Jennings et

al. 2000, Armienta et al. 2001, Costello 2003). A continuación se presentan las reacciones de oxidación de estos sulfuros metálicos:



b) Neutralización

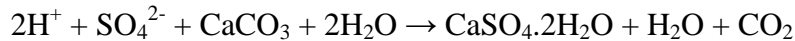
Bajo las condiciones ácidas, se propició la disolución o alteración de otros minerales presentes en los jales y muestras de mina, lo que derivó en la generación de lixiviados que se caracterizan por la presencia de algunos iones metálicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Na^+ , Mn^{2+} , Si y K^+ , con concentraciones máximas (mg/L) de hasta 972, 104, 40, 12.3, 9.8, 9.6 y 0.93, respectivamente.

Sin embargo, la disolución de los minerales con potencial de neutralización no fue suficiente para consumir toda la acidez generada por la oxidación de la pirita y a medida que estos minerales se agotaron o volvieron inaccesibles, el pH de los lixiviados acuosos de los jales y las muestras de mina disminuyó hasta los valores que se determinaron en este estudio con valores promedio de: $\text{pH}_{\text{Jales de presa activa}} = 4.91$, $\text{pH}_{\text{Jales de presa inactiva}} = 3.37$, $\text{pH}_{\text{Muestras de mina}} = 2.98$).

Entre las principales reacciones de neutralización que pudieron haber ocurrido en el sitio de estudio y que explican las concentraciones geodisponibles de los cationes metálicos antes descritos están:

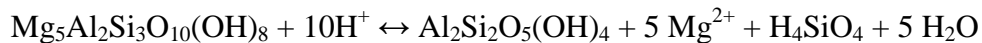
b.1) Disolución de calcita (CaCO_3)

En algunas muestras se identificó calcita (CaCO_3) que se disolvió debido a la interacción con los lixiviados ácidos y ricos en sulfatos (SO_4^{2-}), producto de la oxidación de la pirita, lo que propició la precipitación del mineral secundario denominado yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que fue debidamente identificado por las técnica de DRX en este estudio.



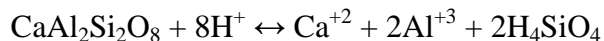
b.2) Disolución de clorita $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

La clorita es otro mineral que fue identificado por DRX en las muestras de estudio y su disolución en el medio ácido podría ser la explicación de las relativamente altas concentraciones de Mg^{2+} y Si (en forma de H_4SiO_4).



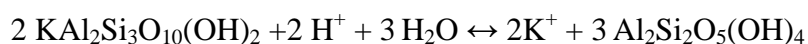
b.3) Disolución de plagioclasas $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

La plagioclasa es otro mineral que fue identificado por DRX en las muestras de estudio y su disolución en el medio ácido podría ser la explicación de las relativamente altas concentraciones de Ca^{2+} y Al^{3+} y Si (en forma de H_4SiO_4).



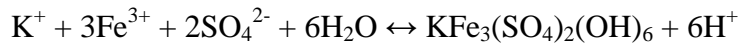
b.4) Disolución de moscovita $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

La moscovita es otro mineral que fue identificado por DRX y su disolución en medio ácido podría ser la explicación de las concentraciones de K^+ .



Sin embargo, los iones K^+ en presencia de Fe^{3+} y SO_4^{2-} tienden a precipitar como jarosita, lo que podría explicar las relativamente bajas concentraciones de K^+ en los lixiviados de la

zona de estudio (en comparación con los otros cationes) y la presencia de jarosita que fue debidamente identificada en este estudio por DRX.



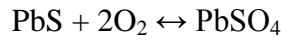
C) Minerales secundarios y su relación con la movilidad del arsénico (As) y plomo (Pb)

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones geodisponibles (solubles) de los EPT, regulados en la NOM – 141 – SEMARNT – 2003, en los lixiviados ácidos de la zona de estudio son inferiores a los límites permisibles en dicha norma

A pesar de las altas concentraciones totales de arsénico (As) y plomo (Pb) las concentraciones geodisponibles o solubles son relativamente bajas y varían entre 0.0029 y 0.241 para el As y entre 0.007 y 2.91 mg/L para el Pb. En varias muestras de lixiviados se determinaron concentraciones muy bajas de estos EPT, lo que indica su retención en la fase sólida y que podría interpretarse como procesos de atenuación natural que disminuye la peligrosidad de los jales y obras mineras de la zona de estudio.

Un posible mecanismo que explique la atenuación natural del arsénico (As) podría ser su retención en jarosita, que fue debidamente identificada en la zona de estudio. Varios autores han reportado la retención de As en minerales del grupo de la jarosita debido al intercambio aniónico entre As (V) de los lixiviados y el SO_4^{2-} de la estructura cristalina de la jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) (Foster, 1998; Paktunc and Dutrizac, 2003; Asta et al, 2009).

Un posible mecanismo que explique la atenuación del plomo (Pb) podría ser la precipitación de anglesita, que es un mineral poco soluble ($K_{sp} = 10^{-7}$) en medios ácidos y medianamente ácidos (Romero et al., 2008). Aunque la anglesita no fue identificada en la zona de estudio su precipitación es muy común en sitios mineros, ya que bajo condiciones aeróbicas el producto de oxidación de la galena es la anglesita (Costello, 2003; romero et al., 2007)



Finalmente, un posible tercer mecanismo para explicar la atenuación natural de As y Pb podría ser la precipitación de la beudantita ((PbFe₃[SO₄][AsO₄][OH]₆),) que es estable en medio ácido. Aunque la beudantita no fue identificada en la zona de estudio su precipitación ha sido reportada como un mecanismo eficiente para el control de la movilidad del As y Pb en ambientes mineros bajo condiciones ácidas (Roussel et al., 2000; Romero et al., 2007 y 2010, Morales 2010).

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. 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 relativamente altas concentraciones de elementos de naturaleza tóxica como el arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd). Se determinaron concentraciones totales de hasta 8291 mg/kg de As, 3043 mg/kg de Pb y 181 mg/kg de Cd. Estos materiales también se caracterizan por las altas concentraciones de otros metales pesados que no son de naturaleza tóxica como el cobre (Cu), zinc (Zn) y hierro (Fe). Se determinaron concentraciones totales de hasta 1268 mg/kg de Cu, 32644 mg/kg de Zn y 45.09% de Fe como Fe_2O_3 .
2. Tanto en las presas de jales como en la mina subterránea de la zona de estudio existe la capacidad de generación de drenaje ácido. En el caso de los jales oxidados y las muestras de mina, los valores de pH indican que actualmente son generadores potenciales de drenaje ácido con valores promedio de pH de 3.37 y 2.98 para los jales oxidados y las muestras de mina, respectivamente. En el caso de los jales de la presa activa, que no muestran signos visibles de alteración, el promedio de los valores de pH igual a 4.91 indican 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).
3. Los jales actualmente no son peligrosos desde el punto de vista de toxicidad ya que en los lixiviados las concentraciones geodisponibles (solubles) de los EPT regulados en la normatividad ambiental mexicana, son inferiores a los límites permisibles en dicha norma, debido probablemente a 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.

6.2 Recomendaciones

La predicción del potencial de generación ácida y lixiviación de metales es muy importante desde una perspectiva ambiental y también desde la económica.

Por las características del yacimiento de Sulfuros Masivos estudiado, su alto contenido de pirita, su elevada capacidad de generación de DA y las altas concentraciones de EPT se recomienda realizar la prueba cinética de celdas húmedas, para pronosticar si estos jales en el futuro van a liberar EPT cuando su pH disminuya más, ya que actualmente no son peligrosos por su geodisponibilidad. Esta información es necesaria para la determinación de los requerimientos de cierre y sus costos, así como para mejorar los programas de control.

En el interior de mina se está generando DA, lo cual debemos de tomar en cuenta a futuro al concluir la operación.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Armienta, M.A., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley, L.K., Mango, H., 2001, The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapan Valley, Mexico: *Environ. Geol.* 40 (4-5), 571-581.
- Asta MP, Cama J, Martínez M, Giménez J (2009) Arsenic removal by goethite and jarosite in acidic conditions and its environmental implications. *J Hazard Mat* 171:965–972.
- Bain, J.G., Blowes, D.W., Robertson, W.D., Frind, E.O., 2000, Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site: *J. Contam. Hydrol.* 41 (1-2), 23-47.
- Blowes, D.W. and Jambor, L.L., 1990. The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailing, Waite A mullet, Quebec, Canada. *Applied Geochem.*, 5(3): 327-346.
- Bothe, J., Brown, P., 1999. Arsenic immobilization by calcium arsenate formation. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 3806-3011.
- Bowell, R. J., 1994. Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. *Appl. Geochem.* 9. pp 279-286.
- Camero P.H., 2000, Encapsulamiento concurrente de la pirita en presa de relaves. Potosí – Bolivia. Curso internacional de maestría en medio ambiente “Técnicas ambientales”
- Carrillo, A., Drever, J.I.; 1998. Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio – El triunfo mining area, Baja California, México. *Environmental Geology* 35 (4). pp 251 – 257.
- Castro-Larragoitia, J., Krama, U., & Puchelt, H. (1997). 200 years of mining activity at La Paz/San Luis Potosí/Mexico-Consequences for environment and geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 58,81–91.

- Consejo de Recursos Minerales (COREMI). 1996. Monografía Geológico – Minera del Estado de México. Consejo de Recursos Minerales, México.
- Costello, C., 2003. Acid mine drainage: innovative treatment technologies. Washington. D.C., United States Environmental Protection Agency, Technology innovation Office pp.52.
- Dold, B., 2002, Basic Concepts of Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Waste, Curso de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México, 22-28 Abril. Pp. 1-38.
- Dold Bernhard, 2003, Aguas Ácidas: formación, predicción, control y prevención, University of Lausanne, Suiza, (www.iimp.org.pe/minería), p 1-9
- Dold y Fontboté L. (2001). Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. J. Geochem Explor. 74, 3 – 35.
- Faure, G., 1980. Principles and applications of geochemistry. Macmillan publishing Company, Canada.
- Faure, G., 1998. Principles and applications of geochemistry. Prentice Hall. Second Edition, Upper Saddle River, New jersey 07458, 600p.
- Fetter, C. W., 1993. Contaminant Hidrogeology. Macmillan Publishing Company, N.Y.
- Foster, A.L., Brown, G.E., Tingle, T.N. and Parks, G.A., 1998, Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. American Mineralogist, 83(5-6), 553-568
- Frost, R.F., Griffin, R.A., 1976. Effect of pH on adsorption of arsenic and selenium from landfill leachate by clay minerals.

- Fuller, C.C., Davis, J.A., Waychunas, G.A., 1992. Surface chemistry of ferrihydrite: Part2. Kinetics os arsenate adsorption and coprecipitation. *Geochim. Cosmochin. Acta* Vol. 57, pp. 2271-2282.
- García de Quevedo, X., 2011. Inauguración del IX Taller de Intercambio de Experiencias entre PROFEPA, CONAGUA y las Empresas Mineras. Manzanillo, Colima. Organizador: Cámara Minera de México.
- Goldberg, S., D.L. Suarez, and R.A. Glaubig. 1988. Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of arid zone soils. *Soil Sci.* 146:317-325
- Holmstrom H. y Ohlander B. (2001). Layers rich in Fe – and Mn - oxihydroxides formed at the tailings – pond water interface, a possible trap for trace metals in flooded mine tailings. *J. Geochem.Explor.* 74, 189 – 2003
- Jambor, J. L., 1994, Mineralogy of sulfide-rich Tailing and Their Oxidation Products in., Short course handbook in Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes, mineralogical association of Canada 3, 4, 9 and 10, pp 58-292
- Jambor, J. L., 2000, The relationship of mineralogy to acid-and neutralization-potential values in ARD. In: *Environmental Mineralogy: Microbial interactions, Anthropogenic influences, contaminated Land and Waste Management* (J.D Cotter-Howells, L.S. Campell, E. Valsami-Jones and M. Batchelder, editors). Mineralogical society. Series, 9. Mineralogical society, London. Hudson-Edwards, K.A., Macklin, M.G., pp. 141-159
- Jennings SR, Dollhops DJ, Inskep WP. 2000. Acid Production from sulfide minerals using hydrogen peroxide weathering. *Appl Geochem* 15: 235 – 243.
- Johnson R.H., Blowes, D.W., Robertson, W.D., and Jambor, J.L., 2000, The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario: *J. Contam. Hydrol.* 41 (1-2), 49-80.

- Jung, M.C., 2001, Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea: *Appl. Geochem.* 16 (11-12), 1369-1375.
- Lawrence, R.W., Wang, Y., 1997, Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage: Fourth International Conference on acid rock drainage. Vancouver, BC. Canada.
- Levy et al., 1997 D. B. Levy, K.H. Curtis, W. H. Casey and P.A. Rock, A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine. *Appl. Geochem.* 12, 203 – 211
- Lin, Z., 1997, Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden: *Sci. Total Environ.* 198, 13-31.
- Lizárraga- Mendiola L.G., 2008. Afectación de una Presa de Jales de Sulfuros Masivos a la Hidrogeoquímica de los Ecurrimientos Superficiales Aledaños
- Luna, L. C., 2008. Mineralogía y geoquímica de los jales de la unidad minera Charcas, San Luís Potosí.
- Luna, L. C., 2011. Barreras geoquímicas para el control de drenaje ácido en jales de una mina de hierro. Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM.
- Lydon J. W., 1988. Volcanogenic massive sulphide deposits, Part 1: A descriptive model, in ores deposits models Geoscience Canada, reprint series 3, pp. 145 -153. Canadá
- McGregor, R.G., Blowes, D.W., Jambor, J.L., Robertson, W.D., 1998, The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canadá: *Contam Hydrol* 33, 247-271.
- Méndez, M., Armienta, M.A., 2003, Arsenic phase distribution in Zimapán mine tailings, Mexico: *Geofísica Internacional*, 42(1), 131-140.

- Miranda – Gazca M.A 1995. The volcanogenic massive sulfide and sedimentary exhalative deposits of the Guerrero Terrane, México. Ph. D. Disertation, University of Arizona. Arizona, EEUU.
- Morales – Arredondo J.I., 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras de México: implicaciones ambientales. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Muhech V (2001). Acciones sugeridas para el abandono ordenado de almacenamiento de residuos mineros. Memorias del seminario “Almacenamiento de Residuos Mineros”. México.
- Neri, M.A., 1998. Descripción del modelo geológico del yacimiento de Sulfuros Masivos de Tizapa, Zacazonapan, Estado de México.
- NOM-141-SEMARNAT-2003 (2004): Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto construcción y operación y pots-operación de presas de jales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 30 pp. México D.F. México.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- NOM-52-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F. México.
- Núñez L.A., 2008 Análisis de residuos mineros y alternativas de manejo en Pinar del Río, Cuba, y Taxco, México. Trabajo de Estudios Avanzados, España.
- Paktunc D, Dutrizac J.E., 2003. Characterization of arsenate-for sulfate substitution in synthetic jarosite using X-ray diffraction and X-ray

absorption spectroscopy, *The Canadian Mineralogist*, 41, 905-919

- Ramos - Arroyo Y.R., Prol-Ledesma R.M., Siebe-Grabach C., 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 – Arrollo Y.R., Siebe- Grabach C.D., 2006; Estrategias para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: Estudio de caso en el distrito Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1):54-74
- Romero, F.M., 2000. Interaccion de aguas contaminadas con arsénico con rocas calizas de Zimapan, Hidalgo.
- Romero F.M., Armienta M.A., Gonzalez-Henandez G., 2003. The solid-pHase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. 23: 23-40.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., Villaseñor, G., González, J.L., 2006, Mineralogical constraints on the mobility of arsenic in tailings from Zimapán, Hidalgo, México: *International Journal of Environment and Pollution*, 26 (1/2/3), 23-40.
- Romero F. M, Gutiérrez M. R., 2010; Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 1: 43-53.
- Roussel C., Neel C. y Bril H. (2000). Minerals controlling arsenic and lead solubility in an abandoned gold mine tailing. *Sci. Total Environ.* 263, 209–219.
- Sommer I., Fernández P., Rivas H. y Gutierrez M. (2000). La geoestadística como herramienta en estudios de contaminación de suelos. Análisis de caso: Afectación por arsénico, plomo y cadmio contenidos en jales mineros. *Revista internacional de contaminación ambiental* 16(4) 205-214.

- Santos – Martínez C.A., 2006. Determinación de la peligrosidad de jales mineros con base en la normatividad ambiental mexicana y su efecto potencial en el ambiente.
- Sun, X. y H.E. Doner, 1998, “Adsorption and oxidation of arsenite on goethite”, *Soil Science*, 163, pp. 278-287.
- Tritlla, J., Camprubí, A., Centeno-García, E., Corona-Esquivel, R., Iriondo, A., Sánchez-Martínez, S., Gasca-Durán, A., Cienfuegos-Alvarado, E., Morales-Puente, P., 2003, Estructura y edad del depósito de hierro de Peña Colorada (Colima): un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOCG: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, 182–201.
- Van Der Hoek, E., Bonouvrie, P., Comans, N., 1994. Sorption of As and Se on mineral components of fly ash: relevance for leaching processes. *Applied Geochemistry*. Vol. 9. Pp. 403-412.
- Xu, H., Allard, B., Grimvall, A., 1991. Affects of acidification and natural organic materials on the mobility of arsenic in the environment. *Water, Air and Soil Pollution*. Vol. 57-58, pp. 269-278.