



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LOS JALES DE LA
UNIDAD MINERA CHARCAS, SAN LUIS POTOSÍ.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO GEOLOGO
P R E S E N T A :
LEONEL LUNA CELIS

DIRECTOR: DR. FRANCISCO MARTIN ROMERO



MÉXICO, D.F. A MARZO DE

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
I INTRODUCCIÓN.....	1
II ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO-MINEROS DE LA REGIÓN DONDE SE UBICA EL ÁREA DE ESTUDIO.....	3
2.1 Descripción del área de estudio: Depósito de jales de la Unidad Minera Charcas.	
2.2 Historia de la minería en la región	
2.3 Fisiografía	
2.4 Climatología	
2.5 Aspectos geológico-mineros	
2.5.1 Geología local	
2.5.2 Geología estructural	
2.5.3 Yacimientos minerales	
2.5.4 Origen del depósito	
2.6 Hidrología	
2.6.1 Hidrología superficial	
2.6.2 Hidrología subterránea	
2.7 Edafología	
III REVISION DOCUMENTAL.....	13
3.1 Generalidades	
3.2 Presas de jales	
3.2.1 Elementos constitutivos de una presa de jales	
3.2.2 Métodos de almacenamiento de jales	
3.2.3 Problemas de inestabilidad	
3.2.4 Sedimentología en presas de jales	
3.3 Procesos geoquímicos que tienen lugar en los jales de sulfuros metálicos.	
3.3.1 Oxidación de sulfuros metálicos	
3.3.2 Procesos de Neutralización	
3.3.3 Clasificación mineralógica de los jales	
3.4 Estudio de jales y valoración de la contaminación de los mismos	
3.4.1 Peligrosidad de jales de acuerdo a la experiencia internacional	
3.4.2 Peligrosidad de los jales de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-141- SEMARNAT- 2004	

IV	METODOLOGÍA.....	32
4.1	Muestreo	
4.1.1	Estrategia de muestreo	
4.1.2	Formación de muestras compuestas	
4.1.3	Muestreo subsuperficial de los jales (perfiles)	
4.1.4	Muestreo en la zona de descarga	
4.1.5	Muestreo del mineral en el frente de explotación (cabeza)	
4.2	Pruebas y análisis de laboratorio	
4.2.1	Análisis de laboratorio	
4.2.2	Preparación de las muestras para análisis de laboratorio	
4.2.3	Determinación de pH y Conductividad eléctrica (CE)	
4.2.4	Caracterización química y mineralógica de jales	
4.2.5	Peligrosidad de jales	
V	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
5.1	pH, conductividad eléctrica, sulfatos y caracterización química	
5.1.1	Valores de pH	
5.1.2	Valores de conductividad eléctrica (CE) y sulfatos (SO_4^{2-})	
5.1.3	Análisis del comportamiento de las concentraciones totales de los EPT en los jales superficiales	
5.1.4	Análisis del comportamiento de las concentraciones totales de los EPT en los perfiles de 100cm de profundidad	
5.1.5	Concentración total de elementos mayores	
5.2	Valoración de la peligrosidad de los jales de la UMCh	
5.2.1	Elementos potencialmente tóxicos solubles	
5.2.2	Capacidad de generación de drenaje ácido	
5.3	Mineralogía	
5.3.1	Jales recientes de color gris - presa activa "1"-	
5.3.2	Jales antiguos de color café -presa inactiva "2"-	
5.3.3	Jales antiguos de color rojo -presa inactiva "3"-	
5.4	Procesos geoquímicos identificados en los jales de estudio e importancia de los minerales secundarios que se han formado	
VI	CONCLUSIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	75

RESUMEN

Se realizó una investigación geoquímica y mineralógica de detalle en los jales de la Unidad Minera Charcas, San Luís Potosí; con el fin de valorar su peligrosidad e identificar los principales procesos geoquímicos, así como la mineralogía y su relación con la peligrosidad de los mismos. Estos jales provienen de la explotación y beneficio de minerales de zinc, plomo, plata y cobre que están encajonados en rocas calizas.

Se colectaron un total de 68 muestras simples de jales, con las cuales se formaron 12 muestras compuestas que son representativas de las tres diferentes zonas identificadas en la presa de jales:

- i) zona de jales recientes de color gris –presa activa “1”-
- ii) zona de jales antiguos de color café –presa inactiva “2”-
- iii) zona de jales antiguos de color rojo –presa inactiva “3”-

La peligrosidad de los jales se valoró de acuerdo a lo señalado en la Norma Oficial Mexicana NOM 141-SEMARNAT -2003. La caracterización química se realizó utilizando la técnica de Espectroscopia de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma. La composición mineralógica se determinó por difracción de rayos X, microscopia electrónica de barrido acoplada con espectrometría de Rayos X (SEM-EDS), y petrografía óptica.

Los resultados de los análisis químicos indican que los jales de la Unidad Minera Charcas; se caracterizan por las altas concentraciones totales de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT): As (225 -1493 mg/kg), Cd (33 – 1716.4 mg/kg), Pb (433 – 26824 mg/kg), Zn (2308 – 80072 mg/kg), Cu (213 – 6376 mg/kg) y Fe (3 - 15.29 %). Las concentraciones totales de Ba, Ag, Cr, Ni y V fueron muy bajas, y para Hg, Se, Be y Tl incluso fueron inferiores al límite de detección de la técnica de análisis

Los jales estudiados se pueden clasificar como NO PELIGROSOS ya que no son generadores potenciales de acidez y no contienen elementos tóxicos

solubles dado que las concentraciones solubles de los EPT analizados están por debajo del límite de detección de la técnica de análisis utilizada.

El valor de pH en los jales recientes y antiguos varía entre 6.5 a 8.4, lo que significa que actualmente no hay generación de acidez y las pruebas de pronóstico de balance ácido-base indican que el potencial de neutralización excede el potencial de acidez entre 2.4 y 9.3 veces, lo que sugiere que en el futuro no se espera generación de drenaje ácido.

En la composición mineralógica de los jales recientes de color gris el mineral predominante es el cuarzo, destaca la presencia de sulfuros metálicos (pirita, esfalerita, galena, calcopirita y arsenopirita) y de minerales alcalinos con capacidad de neutralización como la calcita y wollastonita. En los jales antiguos de color café y rojo se identificaron minerales secundarios como el yeso, oxihidróxidos de hierro, jarosita, celestita y covelita.

La presencia de abundante calcita explica el predominio de condiciones alcalinas en los jales de estudio.

Los análisis por MEB-EDS indican que la movilidad del As, Pb, Cu y Zn parece estar controlada por procesos de sorción en los oxihidróxidos de Fe y la jarosita. Si embargo la movilidad del cobre también parece estar controlada por la precipitación de covelita. Estos procesos geoquímicos (sorción-precipitación) explican el hecho de que los jales no contengan elementos potencialmente tóxicos solubles, ya que están en forma de compuestos químicamente estables.

I INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras históricas y actuales han generado una gran cantidad de residuos en diferentes regiones de México, que representan un riesgo potencial para el medio ambiente. A pesar de esta situación, se han realizado pocos estudios integrales que incluyan la caracterización geoquímica y mineralógica de detalle de estos residuos, los cuales son indispensables para la adecuada valoración de la peligrosidad de los mismos.

La concentración de los minerales con valor comercial, mediante procesos físico-químicos genera desechos de diferente granulometría denominados jales. Los jales de procesos de concentración de plomo, zinc y cobre contienen cantidades variables de sulfuros metálicos como la pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS). Estos sulfuros metálicos se oxidan por acción del aire (oxígeno) y agua, lo que puede traer como consecuencia la generación de drenaje ácido, que son soluciones con valores bajos de pH y altas concentraciones solubles de elementos potencialmente tóxicos (EPT) (USEPA, 1994a; Johnson et al., 1999; Bain et al., 2000; Roussel et al., 2000).

Sin embargo, la oxidación de los sulfuros metálicos no siempre genera drenaje ácido (DA), ya que la tendencia de los jales para producirlo es función del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores potenciales de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos). El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina "neutralización". En general, cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales (potencial de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirán todos los protones y el agua que drene del depósito tendrá un pH cercano al neutro.

En función de la mineralogía original de los jales y de la intensidad de los procesos de oxidación y neutralización, se forman minerales secundarios que son importantes desde el punto de vista ambiental ya que juegan un papel determinante en los procesos de retención de los EPT liberados debido a los fenómenos geoquímicos de sorción y precipitación (Goldberg 1986; Fuller et.

al. 1993; Bowel 1994; Lin 1997; Foster et al. 1998; McGregor et al. 1998, Romero et al. 2007).

El problema ambiental asociado a los jales se relaciona con la dispersión de los mismos hacia su entorno debido a que por lo general contienen altas concentraciones de EPT. En las zonas lluviosas, esta problemática ambiental está relacionada con la generación de drenaje ácido y su dispersión a través de los escurrimientos superficiales (dispersión hídrica); mientras que en las zonas áridas se relaciona con la dispersión provocada por el viento (dispersión eólica).

Para este trabajo se seleccionaron los jales de la Unidad Minera Charcas, en el Estado de San Luis Potosí para realizar un estudio geoquímico y mineralógico de detalle con el objetivo de:

1.- Valorar la peligrosidad de los jales de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-141- SEMARNAT-2003; esto en función de:

- i) La concentración total de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en muestras sólidas de jales.
- ii) Capacidad de generación de drenaje ácido.
- iii) Concentración geodisponible de EPT en lixiviados acuosos de los jales.

2.- Identificar los minerales primarios y secundarios en los jales y establecer la relación con la peligrosidad

3.- Identificar los principales procesos geoquímicos que gobiernan la movilidad de los EPT

II. ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO-MINEROS DE LA REGIÓN DONDE SE UBICA EL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Descripción del área de estudio: Depósito de jales de la Unidad Minera Charcas

Los jales de estudio se ubican en la Unidad Minera Charcas (UMCh), que se localiza a una distancia de 120 km al norte de la ciudad de San Luis Potosí; dentro del estado del mismo nombre y a una distancia de 4 km al poniente de la ciudad de Charcas, situado en las siguientes coordenadas geográficas: 23° 08' 09" Latitud Norte 101° 09' 15" Longitud Oeste (Fig. 1).

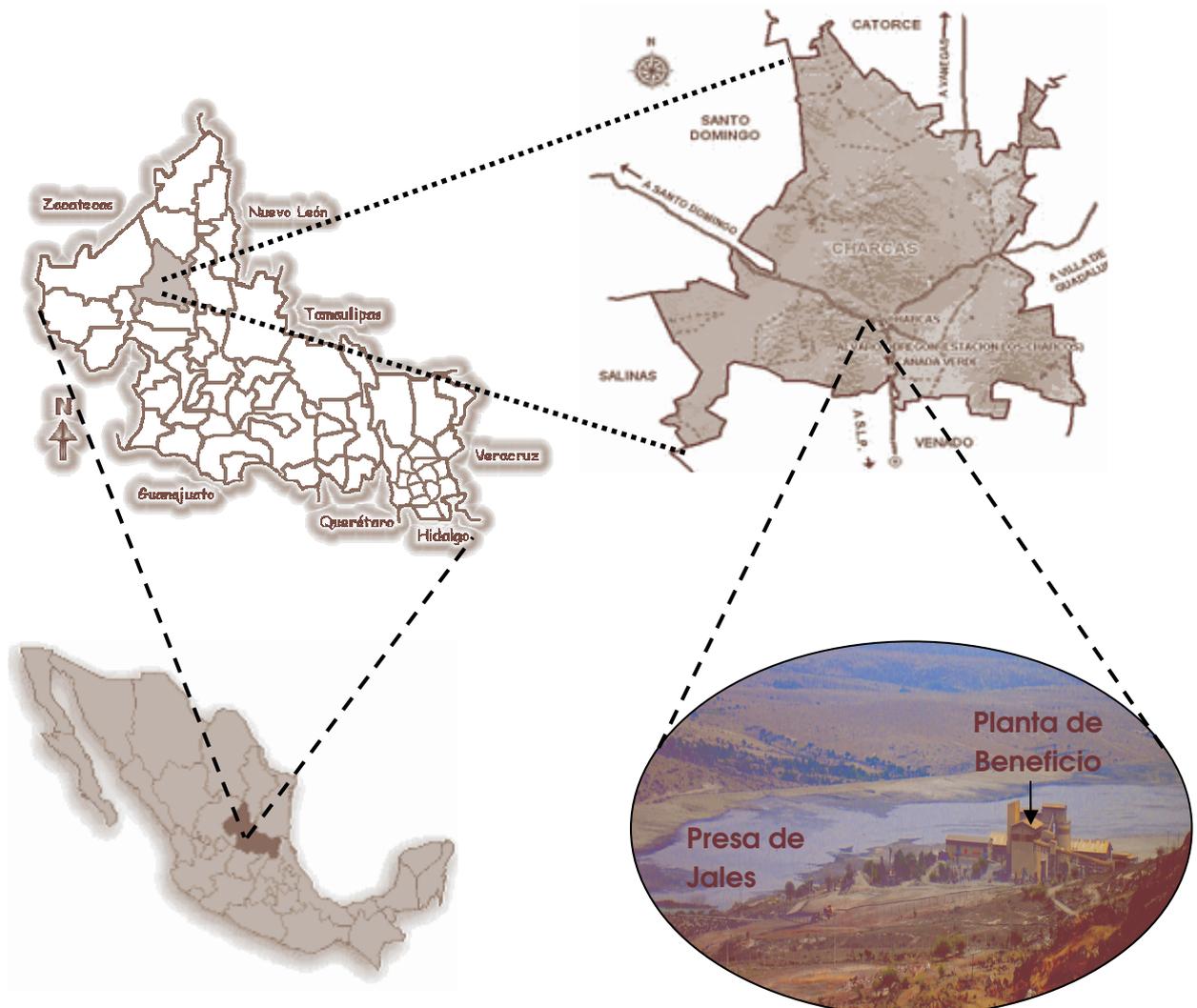


Figura 1. Localización de la presa de jales de la Unidad Minera Charcas (UMCh)

Los jales de estudio están almacenados en el único “depósito de jales” que existe en la UMCh y ocupan una superficie de aproximadamente 95 hectáreas. Se distinguen dos de los componentes principales: “El Vaso” en la parte central del depósito, y “El Talud” que conforma la cortina contenedora alrededor del depósito

En este depósito de jales se distinguen tres zonas que por sus características visuales corresponden con la historia de su almacenamiento: i) Zona de jales recientes y de color gris, en la parte centro-norte. ii) Zona de jales antiguos y oxidados de color café, en la parte este, la cual está parcialmente cubierta con material de relleno y vegetación. iii) Zona de jales antiguos y oxidados de color rojo, en la parte sur. En la zona de jales grises se distingue una subzona donde se están depositando los jales en forma de pulpa que actualmente se están produciendo.

2.2. Historia de la minería en la región

El origen de Charcas se remonta al año de 1526 cuando comenzó la fundación del poblado de Real de la Natividad. Los primeros trabajos de explotación minera se realizaron en el año de 1583 en las vetas denominadas Leones y Santa Isabel. El mineral extraído era exclusivamente de la zona de oxidación, utilizando para el beneficio el método de patio. Para los años 1870, se alcanza la zona de sulfuros (zona de reducción), cuya explotación se inició hasta inicios del siglo XX con la introducción del proceso de flotación selectiva (IMMSA, 2007).

En el año de 1911 las compañías Metalúrgica Nacional y American Smelting and Refining Company (ASARCO) adquirieron los derechos de explotación en Charcas. En 1924, pasó a propiedad de la Compañía Minera Asarco, S. A., quien construyó una planta de beneficio que entró en operación en el año de 1925.

A partir de 1965, la Unidad Minera de Charcas es operada por Industrial Minera México, subsidiaria de Southern Copper. Esta Unidad Minera incluye una mina subterránea y dos plantas de flotación con una capacidad de 4,500 toneladas métricas de mineral al día. La UMCh produce concentrados de zinc, plomo y cobre con cantidades importantes de plata; los cuales son enviados para ser procesados en la Refinería de Zinc y la Fundición de Cobre de San Luis Potosí.

2.3 Fisiografía

El municipio de Charcas se localiza dentro de dos provincias fisiográficas del estado de San Luis Potosí, que son la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental, dentro de las subprovincias Llanos y Sierras Potosino - Zacatecano y Sierras y Lomeríos de Aldama. En el territorio municipal se distinguen dos regiones montañosas formadas por la Sierra de los Picachos del Tunalillo, Sierra La Cuesta Blanco y Coronado; la Sierra de los Picachos del Tunalillo atraviesa de norte a sur la parte central del municipio, es importante porque en ella se localiza la principal zona minera del municipio (Pedraza, 1994).

2.4 Climatología

El clima característico de Charcas es seco templado, semiseco templado y seco semicálido. De acuerdo a los datos reportados en la estación meteorológica Charcas (CNA, 2007), que se localiza a 800 m del poblado del mismo nombre en la región donde se localiza la zona de estudio se reportan los siguientes datos climáticos para el periodo 1962 - 1999:

- i) La temperatura media anual es de 16.9°C. En el mes de mayo se reporta la temperatura media mas alta con un promedio de 21.8 °C, y en el mes de enero la temperatura mas baja con un promedio 11.3 °C (Fig 2).
- ii) La precipitación media anual es de 391.2 mm (Fig 3). Siendo febrero el mes con menor captación (57.2 mm) y en julio el mes con mayor captación (582 mm).
- iii) La evaporación potencial 1 941.9 mm anuales (CNA, 2007).

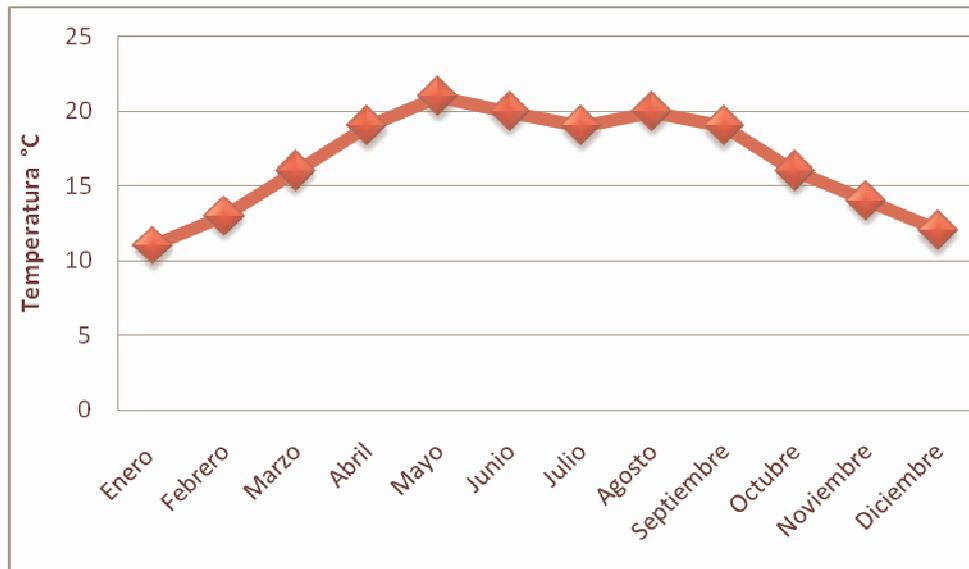


Figura 2. Temperatura media mensual para Charcas de 1962 a 1999

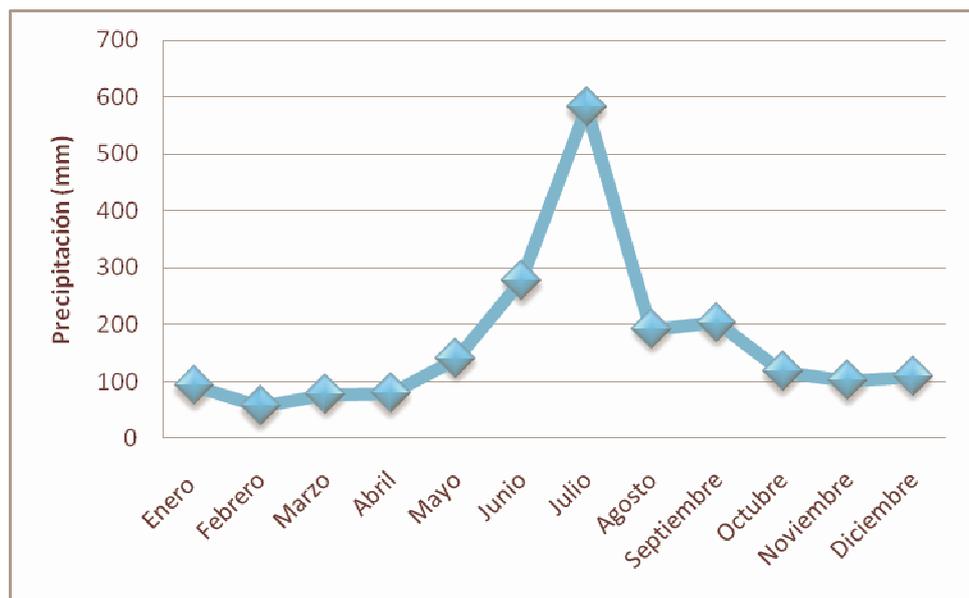


Figura 3. Precipitación media mensual para Charcas de 1962 a 1999.

Y las observaciones de campo indican que la dirección de los vientos predominantes es de SW a NE y de NW a SE.

alternando con capas de 3 a 4 m de caliza finamente cristalina. La unidad Superior (160 m de espesor) está compuesta de caliza microcristalina densa en capas gruesas con lentes de pedernal negro (Salas, 1988).

Calizas de la Formación Cuesta del Cura

Está constituida por caliza en estratos delgados a medios con intercalaciones de horizontes arcillosos y abundantes bandas de pedernal negro. Aflora en las faldas de los cerros del norte y al sur de Charcas. En estas calizas ocurren vetas y cuerpos de reemplazamiento (Salas, 1988).

Rocas Intrusivas

El cuerpo de mayor importancia y representatividad es el *stock* “El temeroso” el cual ha sido clasificado como un porfido cuarzolítico. Su edad, determinada mediante el método K-Ar, es de 46.6 ± 1.6 millones de años. El afloramiento tiene su eje principal aproximadamente Norte- Sur (1300 m) y su eje menor oriente – poniente (400 m). Esta intrusión fue un factor determinante en el control de la mineralización pues ocasionó fracturas radiales y periféricas donde posteriormente fueron alojados cuerpos minerales (Salas, 1988).

2.5.2 Aspectos estructurales

Desde el punto de vista estructural, el anticlinal asimétrico denominado “San Rafael” es la estructura más importante. Esta estructura tiene aproximadamente 20 km de longitud y un rumbo norte- sur. El distrito minero de Charcas se localiza en el flanco oriente de esta estructura.

El fallamiento de bloques del Jurásico dividió el distrito en cuatro áreas con diferentes rasgos estructurales, la más importante de las cuales es la que aloja al intrusivo de El Temeroso, la aureola de metamorfismo y las principales zonas de mineralización, están limitadas al norte por la falla del Pozo y al sur por la falla del Flojo. (Salas, 1988)

2.5.3 Yacimientos minerales

De acuerdo a la información del departamento de Geología de la UMCh, los depósitos minerales que se han extraído y beneficiado se identifican como cuerpos de reemplazamiento y relleno de fisuras.

La mineralización de relleno de fisura es paralela al contacto intrusivo-caliza incluye las mayores vetas, Reyna y Santa Isabel, mismas que convergen hacia el oriente formando la veta Combinación. Hacia el poniente la Veta Leones entra en la caliza en tanto que Santa Isabel entra en el intrusivo con una considerable reducción en su ancho. Se ha atribuido el fisuramiento a una falla normal que resultó de la contracción subsidencia del intrusivo ocasionadas por su enfriamiento (Salas, 1988).

Los cuerpos de reemplazamiento ocurren como masas de mineral de forma irregular y se encuentran encajonados en calizas del Jurásico-Cretácico (Formación Cuesta del Cura), y están asociados a zonas de contacto con intrusivos ácidos.

Los minerales de mena (de interés comercial) identificados son: esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (FeCuS_2) y argentita (Ag_2S). Entre los minerales de ganga se reportan pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS), calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), diopsida ($\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$), wollastonita (CaSiO_3), grosularita ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), damburita ($\text{CaB}_2(\text{SiO}_4)_2$).

Los métodos de extracción mineral que se utilizan en la UMCh son el de de cuartos y pilares con bancos descendentes, y el de corte y relleno hidráulico. Este último método permite que los jales de granulometría gruesa sean utilizados para el relleno de las obras subterráneas, mientras que los jales finos se están depositando en la denominada “presa de jales”. (IMMSA, 2007).

2.5.4 Origen del depósito

El fisuramiento resulta del fallamiento regional y posteriormente del enfriamiento del magma intrusivo que se extendió en las calizas como al stock mismo, propiciando el emplazamiento de cuerpos mineralizados en ambas

rocas, de lo que se deduce que el cuerpo intrusivo tuvo que estar solidificado cuando ocurrió la mineralización, descartando la posibilidad de que fuera contemporáneo al origen de la misma. Las vetas y los remplazamientos contienen las mismas especies mineralógicas, coexistiendo cerca de las zonas muy permeables, lo que hace suponer un origen común.

La mineralogía y la paragénesis de los cuerpos son típicos de los Yacimientos de Pb, Zn, Cu, Ag en rocas carbonatadas (skarn). La mineralización se realizó en dos etapas diferentes; la primera, rica en Plata – Plomo-Zinc con calcita y borosilicatos como ganga principal, este tipo de mineralización se puede observar en la Veta Leones, en tanto que donde predominan Cobre y Plata con alto contenido de Cuarzo en la ganga puede observarse en la Mina Santa Isabel.

Se puede decir que los depósitos minerales de Charcas probablemente se originaron a partir de fluidos con sulfuros complejos derivados de un magma profundo. Los minerales fueron transportados hacia arriba en solución, a través de zonas altamente permeables de las fallas regionales y a lo largo de los márgenes del cuerpo intrusivo “El Temeroso”. La precipitación de dichos minerales ocurrió en el orden de estabilidad relativa de los sulfuros complejos, resultado de ellos el zoneamiento presente en el distrito. La edad de la mineralización ha sido determinada en 38.6 millones de años. (Salas, 1988).

2.6 HIDROLOGÍA

2.6.1 Hidrología superficial

El municipio de Charcas se localiza en la región hidrológica de “El Salado”, que ocupa un lugar importante dentro del estado, por el área que abarca (1 0817.92 km²). Pertenece a la Cuenca Presa San José - Los Pilares; y tiene dos subcuencas intermedias que son Presa Los Pilares y Presa San José.

El fuerte desequilibrio entre precipitación y evapotranspiración ocasiona que no existan escurrimientos superficiales de importancia, cuando más arroyos intermitentes (CNA, 2007)

2.6.2 Hidrología subterránea

El cuerpo de agua subterránea que se tiene en la zona de Charcas pertenece al acuífero “Villa de Arista”, este se encuentra alojado en material aluvial y sedimentos lacustres.

El espesor de este acuífero varía desde 50 m en su porción noroccidental a 250 m ó más hacia el sur. Por medio de pruebas de bombeo se ha demostrado que el comportamiento de este acuífero es libre a semiconfinado. La recarga tiene lugar principalmente en el borde occidental del valle, la extensión de esta zona de recarga es de aproximadamente 40 km. La descarga tiene lugar por extracción a través del bombeo (CNA, 2007).

Este acuífero proporciona caudales de 10 a 60 L/s por pozo, siendo más frecuentes los de 20 L/s. Los niveles estáticos varían desde los 15 hasta los 85 mts, por lo cual se considera al acuífero como sobreexplotado. La evolución de estos niveles oscila entre los +2 mts./año a -1.5 mts./año. Los valores de transmisividad varían de $0.36 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ a $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, con predominio de valores entre 2.5 y $4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; sin embargo, se considera que la mayor parte de los pozos no son totalmente penetrantes, por lo que los valores de la transmisividad para el acuífero probablemente sean más altos (CNA, 2007).

Acerca de los usos del agua subterránea puede decirse que de 523 aprovechamientos activos, 373 de ellos, es decir el 71%, se destina al uso agrícola; esta cifra incluye 352 pozos, 20 norias, 1 manantial y una galería filtrante; 94 aprovechamientos activos se aprovechan para uso doméstico abrevadero (18% del total), cifra compuesta por 87 norias y 7 pozos profundos; otras 40 obras de captación de agua subterránea (8% del total) son operadas para uso público-urbano, de los cuales 35 son pozos profundos y 5 son norias. Solamente 9 aprovechamientos subterráneos (2% del total) son explotadas para fines pecuarios, y de éstos 4 son pozos perforados y 5 más excavados. Finalmente, para el uso industrial se explota el acuífero a través de 6 obras perforadas (1% del total); estos pozos incluyen 3 pozos profundos situados al norte de “El Temeroso” que abastecen a la planta de beneficio de la Unidad

Minera Charcas, los 3 restantes dan servicio a emparadoras de productos agrícolas (CNA, 2007).

2.7 Edafología

En la Figura 5 se presenta parte de la carta edafológica Charcas (INEGI, 1978), correspondiente a la zona que ocupa el área de estudio, donde los tipos de suelos predominantes son litosol eutrítico (Ie) y fluvisol calcárico (Jk). Estos suelos están poco desarrollados y no presentan el perfil típico de un suelo. De acuerdo a la información del INEGI (1978) bajo estos suelos a menos de 50 cm de profundidad yacen horizontes petrocálcicos.

Observaciones de campo indican que el espesor de los suelos varía desde 20 hasta un máximo de 60 cm. Bajo estos suelos incipientes yacen rocas calcáreas, lo que es congruente con la información obtenida de la carta de INEGI (1978).

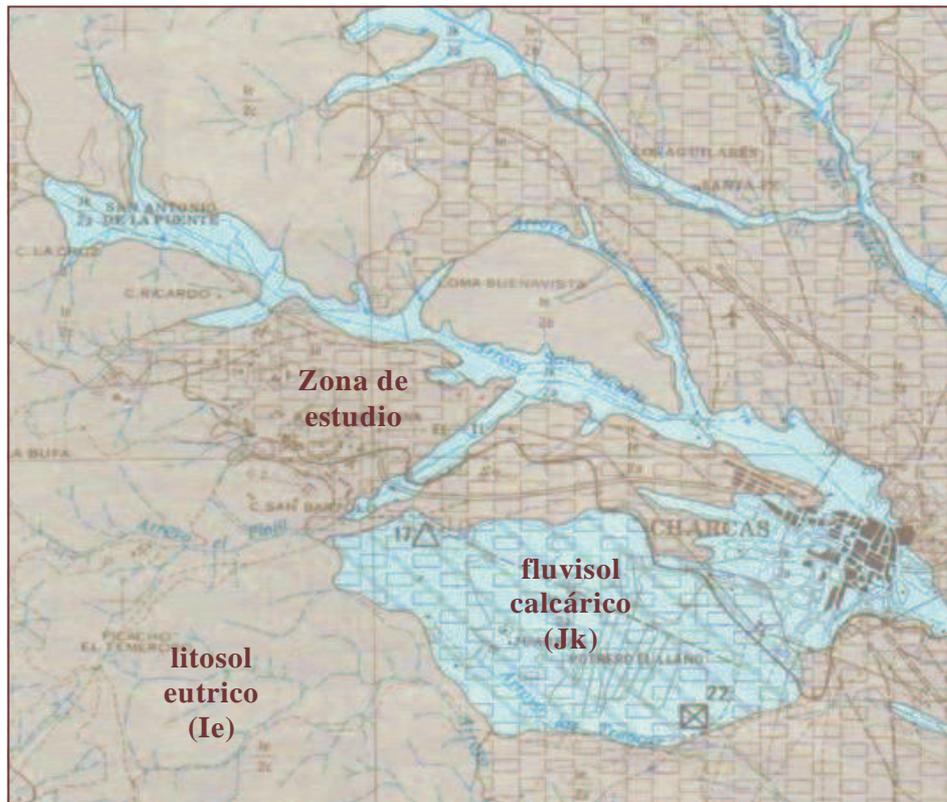


Figura 5. Mapa edafológico de la zona de estudio. Tomado de la carta edafológica Charcas.

Escala 1:50 000. (INEGI, 1978).

III. REVISION DOCUMENTAL

3.1 Generalidades

México es un país con abundantes recursos minerales (Fig 6), lo que ha marcado su tradición minera. Entre los principales tipos de yacimientos que se han explotado están: yacimientos epitermales (Taxco, Guanajuato, Pachuca, Zacatecas, Santa Bárbara, etc.), yacimientos tipo skarn (Charcas, Zimapán, La Paz, Concepción del Oro, etc), yacimientos del tipo sulfuros masivos vulcanogenéticos (Tizapa, Rey de Plata, etc), yacimientos tipo pórfido cuprífero (La Caridad, Cananea, etc).

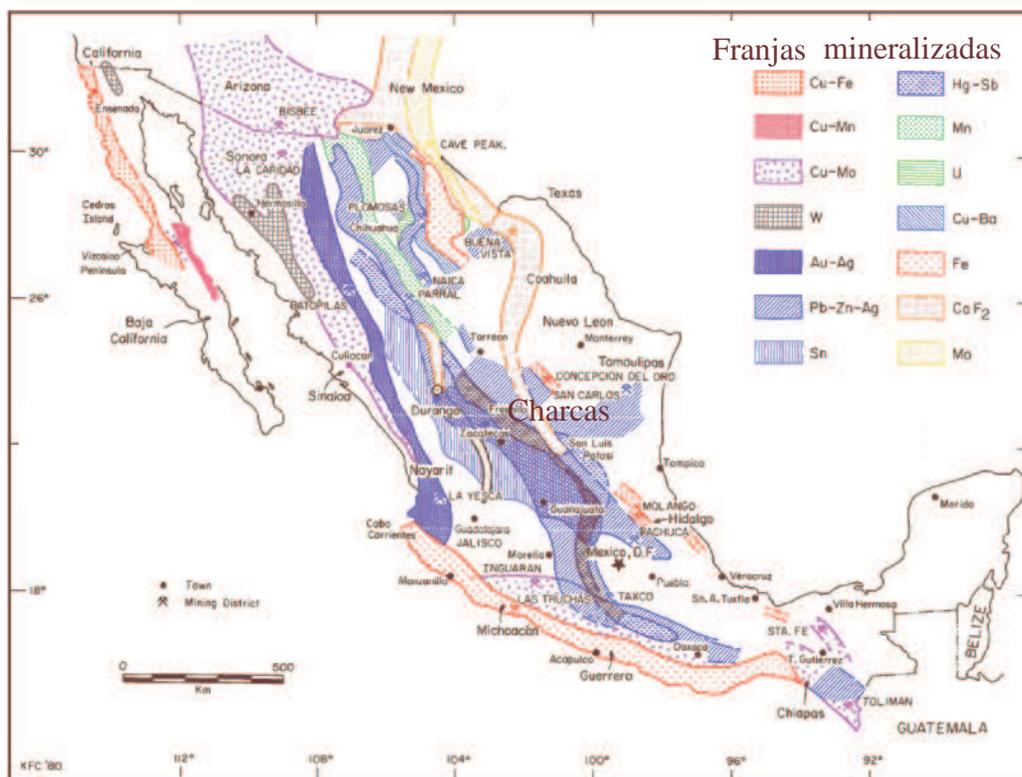


Figura 6. Distribución de las franjas mineralizadas en México. (Clark et al. 1982)

En estos diferentes tipos de yacimientos ocurren tanto los minerales económicos como los no económicos y con el fin de separarlos son sometidos a diferentes procesos físicos y químicos. El avance de la tecnología en la industria minera mundial, propició la introducción en México de procesos metalúrgicos como la flotación y la cianuración a inicios del siglo XX, lo que ha permitido explotar mayores volúmenes de mineral con valor comercial, a la vez

que propició la generación de mayor cantidad residuos, entre los que destacan los denominados “jales”.

Los jales de procesos de concentración de minerales de plomo, plata, zinc y cobre, generalmente contienen sulfuros metálicos residuales como la pirita (FeS_2), pirrotita ($(\text{Fe}_{1-x}\text{S})$), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS) que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Romero *et al.* 2007).

El principal problema ambiental asociado a los jales se relaciona con la dispersión de los mismos hacia su entorno. En las zonas lluviosas, esta problemática ambiental está relacionada con la generación de drenaje ácido y su dispersión a través de los escurrimientos superficiales (dispersión hídrica); mientras que en las zonas áridas se relaciona con la dispersión provocada por el viento (dispersión eólica).

El drenaje ácido se genera por la oxidación de los sulfuros metálicos y son soluciones que se caracterizan por tener valores bajos de pH y altas concentraciones de EPT disueltos (Johnson *et al.* 2000; Lin 1997; Moncur *et al.* 2005; Roussel *et al.* 2000) que al transportarse, pueden convertirse en un problema ambiental severo al contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas (Armienta *et al.* 2001; Bain *et al.* 2000; Jung 2001).

Para que ocurra la oxidación en los jales, es necesario que contengan sulfuros metálicos reactivos, y que existan las condiciones climáticas apropiadas (aire y agua o atmósfera húmeda). Cuando ocurre la oxidación de los sulfuros metálicos, los jales presentan una coloración amarilla, café o rojo.

Sin embargo, no siempre la oxidación de los sulfuros metálicos produce drenaje ácido, ya que la tendencia de los jales para generarlo es una función del balance entre los minerales productores de ácido (sulfuros metálicos) y los minerales con capacidad de neutralización (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos). En general, cuando la capacidad de neutralización excede al

potencial de generación de ácido, se consumirá toda la acidez generada y las soluciones que drenen del depósito de jales tendrán un pH cercano al neutro

La oxidación es generalmente muy limitada durante la operación de la presa de jales por lo que los minerales en los jales permanecen visiblemente inalterados y presentan una coloración gris.

Actualmente no existe una estimación confiable acerca del tonelaje de jales distribuidos en el territorio de la República Mexicana. Ramírez (2001), estima que en México existen poco más de 80 almacenamientos de residuos mineros (presas de jales) en operación localizados en el norte y centro del país. Sin embargo no existe un inventario de la cantidad y situación de las presas de jales inactivas.

Históricamente, los jales generados fueron depositados en los alrededores de las minas en sitios topográficamente bajos sin ninguna consideración ambiental, convirtiéndose en focos de potencial contaminación para la región. Sin embargo, con la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003¹ el 13 de septiembre de 2004, las empresas mineras están obligadas a depositar sus jales en presas diseñadas para reducir el riesgo para el medio ambiente.

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. Sin embargo, se han realizado pocos estudios para conocer el grado de contaminación asociado a su operación. En Zimapán, Hidalgo, se han efectuado investigaciones acerca del origen del arsénico en el agua subterránea (Armienta et al., 1997) y del potencial mutágeno de esta agua contaminada (Gómez-Arroyo et al., 1997). En San Luis Potosí se han determinado las concentraciones de As y metales pesados en

¹ 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 postoperación de presas de jales

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, 1998a). En el distrito minero de Guanajuato se ha estudiado la presencia de metales pesados en ríos como resultado de la actividad minera (Ridgway et al., 1995). En Taxco, Guerrero se ha estudiado el fenómeno de drenaje ácido en jales y su impacto en el entorno (Romero et al, 2007).

3.2 Presas de Jales

3.2.1 Elementos constitutivos de una presa de jales

Una presa de jales es una obra de ingeniería civil y se construye con el fin de almacenar los desechos mineros. Esta obra consta de de cuatro elementos constitutivos que son:

1.- Cortina contenedora (dique): es el elemento que constituye una barrera contra el desplazamiento de la masa de jales hacia áreas adyacentes, por lo que constituye el componente más importante del sistema de depósito vinculado con la disposición de la seguridad. Para su construcción se pueden usar jales u otro material; y los métodos de construcción son: aguas arriba, aguas abajo y línea central.

2.- Vaso de almacenamiento: es la cavidad donde se van almacenar los jales en forma de pulpa; para esto se pueden usar fosas existentes en la topografía o valles; sin embargo también pueden construirse fuera de estos elementos topográficos.

3.- Sistema decantador drenante: es un sistema de tuberías de concreto reforzado con o sin perforaciones, de sección cuadrada o circular. La función principal de este sistema es el de recuperar el agua para poder volver a utilizarla.

4.- Vertedor de excedencias: es un sistema de túneles o canales que permite desalojar escurrimientos normales y extremos; puede alojarse en roca firme, para evitar colapsos o derrumbes. Se debe de prever que esta obra no requiera

mantenimiento una vez abandonada la presa, esto para evitar gastos innecesarios. (Acosta y Espinosa, 2001).

3.2.2 Métodos de almacenamiento de jales

Se usan distintas clasificaciones de presas de jales para diferentes propósitos. La clasificación más conocida esta basada en tres métodos convencionales de almacenamientos para jales que son: aguas arriba, aguas abajo y eje central.

Método de aguas arriba: este método es el más antiguo, común y simple de construcción, se usa cuando el riesgo de sismos es muy bajo y los diques no van a ser muy altos. Consiste en ir colocando hacia aguas arriba diques de jales u otros materiales para formar la cortina contenedora.

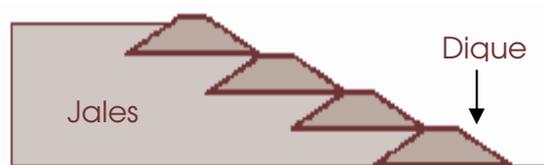


Figura 7. Método de construcción de una presa de jales denominado "aguas arriba"

Método de aguas abajo: este método solo se usa en regiones con alta actividad sísmica. Primero se construye un dique inicial pero con dirección aguas abajo, y se va elevando conforme se va requiriendo; este aumento de nivel requiere de mayor cantidad de material, por lo que es menos utilizado que el método de aguas arriba; para la formación de los diques que conformarán la cortina contenedora se pueden usar jales u otro material.



Figura 8. Método de construcción de una presa de jales denominado "aguas abajo"

Método del eje central: este método es una variación del de aguas arriba, en donde la presa se levanta verticalmente con la línea central de incremento coincidiendo con el aumento de la altura de la presa. Con este método se pueden desarrollar presas mas altas que con los dos anteriores, pues consiste

en mantener una línea central a lo largo de los diques que puede fungir como sistema decantador drenante. Para la formación de los diques pueden usarse jales o cualquier otro material (Ramírez, 2001).



Figura 9. Método de construcción de una presa de jales denominado "línea central"

3.2.3 Problemas de inestabilidad

Un aspecto importante en la evaluación del riesgo ambiental de un depósito de jales, son las condiciones de almacenamiento, principalmente las relacionadas con el diseño y la construcción de la presa, ya que esta determina la estabilidad de la instalación.

Entre algunos de los problemas de inestabilidad de las presas de jales se encuentran los siguientes:

Licuefacción: es la repentina y gran disminución de la resistencia al esfuerzo cortante, causada por el colapso de la estructura de los jales, producido por choque o por pequeñas deformaciones, asociado con un incremento repentino pero temporal de la presión de poro.

Los materiales sueltos, saturados, con partículas del tamaño de arenas están sujetas a una pérdida repentina de resistencia al corte, o licuación, cuando están expuestos a un evento sísmico. Los jales, debido a su método de almacenamiento generalmente suelto y a su naturaleza no cohesiva, frecuentemente son propensos a licuación (Ramírez, 2001).

Deslizamiento del talud: cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones próximas a su frontera se deslicen hacia abajo; el fenómeno más intenso cerca de la superficie inclinada del talud a causa de la falta de presión normal confinante que allí existe.

Pueden ocurrir en los taludes movimientos bruscos que afectan masas considerables de jales, con superficies de falla, que penetran profundamente en su cuerpo.

Erosión pluvial: la inestabilidad por erosión es de tipo superficial provocada por arrastres de agua en taludes. Para el caso de erosión pluvial pueden ocurrir diferentes formas: por derrames, infiltración o por erosión de la superficie.

Derrame por la cresta: ocurre cuando el nivel del estanque rebasa el nivel del dique y el agua fluye por encima del mismo. El material por lo general se erosiona y forma un arroyuelo cuyo tamaño dependerá del volumen del derrame y de que tan erosionable sea el material.

Infiltración: cuando el drenaje en la base del dique es insuficiente, el agua de infiltración sale en la base del dique, creando una zona húmeda y débil, a menudo acompañada de erosión, lo que conduce al fracturamiento de los diques exteriores.

Erosión de la superficie: la cara exterior de una presa de jales presenta un área considerable de captación para las precipitaciones pluviales y los escurrimientos resultantes tienden a formar arroyuelos en las caras expuestas de los diques.

Erosión eólica: la forma de actuar del viento sobre una ladera se puede concebir por medio del arrastre de partículas finas no consolidadas de la ladera, originando un debilitamiento en las paredes de la presa ocasionando un plano de falla. La erosión por el viento puede ser un problema significativo en donde existan grandes áreas expuestas de material de grano fino como debajo de una presa de jales o en áreas de playa del depósito.

Tubificación: es el movimiento de partículas de jales como resultado de fuerzas no equilibradas de infiltración, producido por la infiltración por la infiltración del agua, que da por resultado canales de erosión.

El flujo de la infiltración se concentra en una vía preferencial que produce la erosión interna y la formación de tubos o túneles que pueden originar la destrucción del dique (Ramírez, 2001).

3.2.4 Sedimentología en presas de jales

Los jales depositados en las presas presentan características físicas de depósito y granulometría particulares.

El proceso más importante que afecta la estratigrafía de estas zonas es la clasificación hidráulica del tamaño de grano que ocurre después de la descarga de los jales. También existen dos zonas deposicionales distintas: una zona subaérea y una zona lacustre que se presenta donde aun existe agua en la presa de jales, los procesos de sedimentación son diferentes en las dos zonas antes mencionadas.

La zona de playa subaérea está caracterizada por sedimentos fluviales de alta energía que son depositados como en las descargas de los arroyos y meandros. La clasificación deposicional de los sedimentos ocurre a lo largo de bancos y estratos de arroyo, gradualmente se incrementa la elevación del arroyo para desarrollar nuevas estructuras. Este ambiente deposicional es análogo al de descarga de arroyo. Las estructuras sedimentarias son estratos lenticulares o sinuosos y pueden llegar a exhibir estratificación cruzada; pero en esta zona es muy común encontrar laminaciones dado que el tamaño de grano es muy fino, y el tamaño del grano más grueso no es retenido en esta zona de alta energía.

En la descarga del arroyo y en la zona de jales subaérea se presenta un ambiente de baja energía donde se depositan partículas con tamaños muy finos. Los sedimentos depositados en esta zona son similares a los depositados en un ambiente lacustre. Cerca de la zona de costas se pueden observar estructuras deltaicas: como estratificación cruzada en una escala mayor y estructuras provocadas por la acción de olas ya que estas partículas presentan una muy buena clasificación, produciendo playas de arenas que están virtualmente libres de fracciones finas que presentan principalmente laminaciones bien desarrolladas (Robertson, 1994).

Cerca de los jales en el punto de descarga se encuentran compuestos libres de lodo bien clasificados, arenas de tamaño a fino a medio y más alejado de este

punto se encuentran sedimentos ricos en lodo, con un factor de disposición similar al de la zona lacustre (Robertson, 1994).

Generalmente el material depositado presenta una distribución bimodal vertical, un estrato arcilloso y húmedo en jales recientes, de baja porosidad y permeabilidad y uno más arenoso y más poroso, y de mayor permeabilidad. En depósitos de presas recientes, las condiciones de drenaje y la ubicación del terreno definen dos tipos de zonas, terrazas bien drenadas y zonas inundadas mal drenadas, donde se acumula el agua que transportó el material o la que escurre de las laderas.

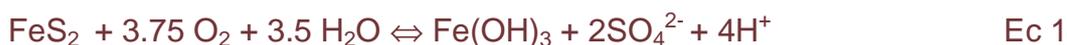
3.3 Procesos geoquímicos que tienen lugar en los jales de sulfuros metálicos.

3.3.1 Oxidación de sulfuros metálicos

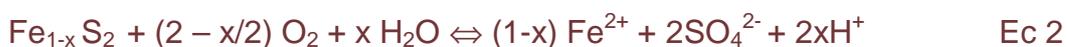
Los sulfuros metálicos en los jales se pueden oxidar al estar expuestos a los fenómenos de intemperismo (interacción con oxígeno y agua). Los minerales se oxidan con mayor dificultad que los compuestos amorfos y los más importantes asociados a la generación de acidez son la pirita y pirrotita.

Diferentes autores han reportado las reacciones de oxidación de los principales sulfuros metálicos que se encuentran en los jales (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 algunos sulfuros metálicos:

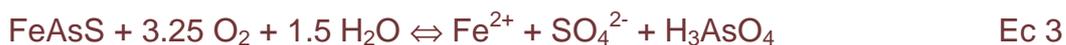
Pirita (FeS_2)



Pirrotita (Fe_{1-x}S)



Arsenopirita (FeAsS)



Galena (PbS)



Esfalerita (ZnS)



Calcopirita (CuFeS₂)



De acuerdo a las reacciones planteadas en las ecuaciones anteriores se puede decir que la problemática ambiental derivada de la oxidación de los sulfuros metálicos está asociada a la liberación al ambiente de sulfatos (SO_4^{2-}), protones (H^+), arseniatos ($\text{H}_n\text{AsO}_4^{3-n}$) y de los principales metales pesados (Fe^{2+} , Al, Cu^{2+} , Zn^{2+} y Cd^{2+}), que forman parte de la composición de los mismos sulfuros metálicos y de otros minerales que se disuelven bajo las condiciones ácidas (aluminosilicatos); lo que da origen al denominado drenaje ácido. La composición química del drenaje ácido depende de la mineralogía del tipo de yacimiento del cual provienen los jales (Seal y Hammarstrom, 2003).

El drenaje ácido es considerado el principal problema ambiental de la actividad minera. La calidad del drenaje ácido en las presas de jales es controlada por las características geológicas de los depósitos minerales, la mineralogía, el proceso de beneficio del yacimiento, y las condiciones climáticas (Seal y Hammarstrom, 2003).

Productos de la oxidación de los sulfuros metálicos

El proceso de oxidación de los sulfuros genera la precipitación de minerales secundarios de Fe entre los que destacan los oxihidróxidos y los sulfatos.

Por ejemplo la jarosita tiende a formarse en ambientes de pH bajo (1.5- 3) y altas concentraciones de sulfatos (> 3000 mg/L), la schwertmannita en acidez

moderada (pH de 3 a 4) y sulfatos moderados (1000 a 3000 mg/L) y la ferrihidrita en ambientes con pH neutro (>5).

Los oxihidróxidos de Fe son los minerales secundarios más comúnmente encontrados en los ambientes oxidados de los desechos mineros. Pueden componerse de Fe (II), Fe (II) + Fe (III) o solo de Fe (III) (Dold, 2002).

Jarosita → Goethita



Schwertmannita → Goethita



La formación de oxihidróxidos de Fe es importante desde el punto de vista ambiental ya que juegan un papel determinante en los procesos de retención de los EPT debido a los fenómenos de sorción (Goldberg 1986; Fuller et al. 1993; Bowel 1994; Lin 1997; Foster et al. 1998; McGregor et al. 1998, Romero et al. 2007).

Los hidróxidos de Fe pueden sorber metales traza, removerlos de la solución, pero también liberarlos al disolverse. La depositación de hidróxidos de Fe en condiciones anóxicas puede llevar a su destrucción por reducción de Fe, lo que libera a los metales sorbidos (Seal y Hammarstrom, 2003).

3.3.2 Procesos de Neutralización

La oxidación de los sulfuros metálicos, en los jales, no siempre genera drenaje ácido (DA), ya que la tendencia de los jales para generar DA es una función del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores potenciales de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos).

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina "neutralización". En general, cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales (potencial

de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirán todos los protones y el agua que drene del depósito tendrá un pH cercano al neutro.

De acuerdo con Jambor (1994), cuando los H^+ son liberados por la oxidación de sulfuros en contacto con carbonatos, hidróxidos y otras bases se presentan reacciones amortiguadoras de pH. Los principales mecanismos de las reacciones de acido- neutralización, en los jales son:

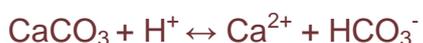
- A) Disolución de carbonatos
- B) Disolución de hidróxidos
- C) Alteración de aluminosilicatos

Disolución de *carbonatos*

La disolución de carbonatos libera cationes alcalinos y metálicos como Ca, Mg, Fe y Mn. Estos cationes participan en la formación de sólidos secundarios incluyendo hidróxidos simples, que posteriormente pueden disolverse y contribuir a la neutralización del drenaje ácido formado en los jales (Jambor, 1994; Dold, 2002).

Las reacciones que involucran la disolución de carbonatos en los jales pueden mantener las condiciones de pH cercanas a las neutras y prevenir la excesiva liberación y el transporte de metales solubles.

Estas reacciones comienzan de acuerdo al siguientes proceso; esto en general para la calcita:



La disolución de la calcita ($CaCO_3$) consume la acidez (H^+) liberada por la oxidación de la pirita y produce la liberación de Ca^{2+} , que en presencia de los sulfatos (SO_4^{2-}), también liberados por la oxidación de la pirita, deriva en la precipitación del yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) a través de la siguiente reacción:



La disolución de la calcita se efectúa rápidamente; manteniendo condiciones cercanas al equilibrio y el pH de agua de poro entre 6.5 y 7.5. Esta disolución incrementa la cantidad de carbonatos en solución, así como el potencial de neutralización de la solución (Jambor 1994; Dold 2002).

El orden propuesto por Jambor (1994) para la disolución de los carbonatos dentro de una presa de jales, es el siguiente:

Calcita>Dolomita>Ankerita>Siderita

La siderita bajo condiciones de pH ácido puede actuar como neutralizador; la disolución de la siderita esta dada por la siguiente reacción:



Disolución de *Hidróxidos*

Como resultado de la neutralización e incremento en el pH, existe la precipitación de oxihidróxidos metálicos como gibbsita amorfa, ferrihidrita, goethita o schwermanita (Jambor 1994; Dold 2002). El ion férrico proviene de las reacciones de oxidación de los sulfuros y el aluminio disuelto proviene de la disolución de los aluminosilicatos.

Como la generación de ácido continua y los carbonatos han sido consumidos, el pH baja abruptamente comenzando la disolución de $\text{Al}(\text{OH})_3$ a un pH de 4.3 a 4.0. Cuando éste es consumido el pH baja aun más, continuando con la disolución del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ con pH menores a 3.5 (Jambor 1994, Dold 2002). Estas reacciones se muestran a continuación:



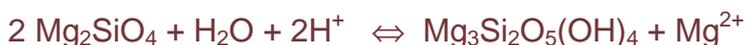
Disolución de *aluminosilicatos*

Bajo condiciones de pH ácido, después de que los carbonatos y los hidróxidos son consumidos, comienza la disolución de los aluminosilicatos (Jambor 1994, Jambor et al. 2003). La disolución de muchos aluminosilicatos consume iones

H⁺ y contribuye con cationes (Ca, Mg, Fe, Na, K, Si y Al) (Jambor 1994; Dold 2002).

Para el caso de las plagioclasas, los patrones de intemperismo son similares a los de los feldspatos y liberan Na y/o Ca. Bajo condiciones de pH ácido las plagioclasas pueden reaccionar para formar caolinita, pero a pH básico pueden formar smectita (Jambor ,1994; Dold ,2002).

La muscovita, piroxenos y anfíboles se alteran a clorita y por decremento de pH la clorita se altera a arcillas tales como la sericita, caolinita o motmorillonita; y estas arcillas juegan un papel muy importante en la retención de EPT. A continuación se presentan algunas de estas reacciones:



olivino

serpentina



anortita

caolinita



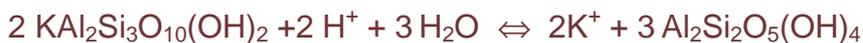
microclina

caolinita



albita

caolinita



muscovita

caolinita

3.3.3 Clasificación mineralógica de los jales

Con el fin de identificar los principales procesos geoquímicos que ocurren en los jales y que diferencian a los minerales que proceden del yacimiento,

respecto a los minerales que precipitan cuando los jales se comienzan a depositar en la presa; Jambor (1994) propone la siguiente clasificación:

Minerales primarios: estos minerales son los que no han sufrido algún cambio químico y provienen del yacimiento mineral que ha pasado por los procesos metalúrgicos de concentración de minerales (minerales de mena y algunos de ganga), estos minerales solo han sido afectados por procesos físicos, para posteriormente ser depositados en la presa sin presentar algún otro cambio.

Minerales secundarios: este tipo de minerales son los que presentan alteraciones físicas o químicas y pueden provenir del yacimiento o formarse dentro de la presa, principalmente por precipitación de los constituyentes derivados de las reacciones de oxidación y neutralización cerca de la superficie de la presa. Estos minerales pueden dividirse en varios grupos: óxidos e hidróxidos, sulfatos, carbonatos y sulfuros secundarios. La cantidad y la composición de los minerales secundarios varía de acuerdo a la composición mineralógica inicial, la morfología de la presa, el grado de oxidación, la infiltración, el grado de evaporación y el tamaño del grano en los jales (Blowes et al. 2003).

Los minerales secundarios típicos son los oxihidroxidos de Fe, tales como: la goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), sulfatos tales como la jarosita, $(\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

3.4 Estudio de jales y valoración de la contaminación de los mismos

3.4.1 Peligrosidad de jales de acuerdo a la experiencia internacional

Considerando que la generación del drenaje ácido es una función del tiempo y del balance entre los minerales sulfurados (productores potenciales de ácido) y los minerales alcalinos (consumidores potenciales de ácido); para la adecuada valoración y/o predicción del comportamiento de los jales con relación al peligro potencial que representan para el ambiente, es necesario realizar pruebas de acuerdo a la estrategia de estudio propuesta por (Lawrence, 1990) pruebas de extracción, pruebas estáticas y pruebas cinéticas.

Pruebas de extracción

Son pruebas de de tipo indicativo y se realizan tanto en jales inalterados (No oxidados) como en jales oxidados para determinar los componentes fácilmente solubles que se pueden dispersar en el ambiente. Por lo tanto para aplicar esta prueba no es necesario considerar si han o no ocurrido procesos de oxidación en los sulfuros metálicos de los jales. La metodología de mayor aceptación para realizar estas pruebas es la: USEPA 1312 (1995a)

Pruebas estáticas

Son pruebas de tipo predictivo, y por lo tanto aplican sólo en jales inalterados (no oxidados) para pronosticar su potencial para la producción de drenaje ácido en el futuro. Los resultados de las pruebas estáticas permiten estimar el balance entre en los minerales potencialmente generadores de acido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra.

El procedimiento más utilizado para estimar el balance entre los minerales productores de acidez y los neutralizadores es el propuesto por (Lawrence, 1997), denominado “Prueba Modificada de Balance Ácido- Base (PM- ABA)”.

El procedimiento de la prueba consiste en determinar en las 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.

Pruebas cinéticas

Son pruebas de tipo predictivo y por lo tanto es conveniente realizarlas en los jales inalterados (no oxidados) para confirmar los resultados de las pruebas estáticas y predecir la calidad del agua de drenaje cuando, en el futuro, los jales estudiados se oxiden.

Las pruebas cinéticas consisten en someter a intemperismo acelerado las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Una de las pruebas cinéticas más utilizadas es la prueba de celdas húmedas, que está diseñada

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, 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.

3.4.2 Peligrosidad de los jales de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-141- SEMARNAT-2003

En la NOM-141 solamente se consideraron las pruebas de extracción y de balance ácido-base para determinar la peligrosidad de los jales, las cuales tienen un fundamento científico muy sólido; pero sin la realización de las pruebas cinéticas, su alcance es muy limitado ya que:

La aplicación de la prueba de balance ácido – base, permite valorar el papel de los carbonatos en el proceso de neutralización y no toma en cuenta la de los otros minerales alcalinos que pueden contribuir a este proceso de neutralización como los aluminosilicatos.

- El límite del balance ácido –base que se indica en la NOM 141- (PN/PA < 1.2) para determinar si los jales son peligrosos por su capacidad de generar drenaje ácido, se tomó de la experiencia internacional y no hay datos que permitan valorar si funciona o no para los jales de México.

En la NOM-141 solamente se especifican las pruebas y análisis que deben realizarse en casos de presas de jales activas o que se planea construir:

Prueba de extracción

Esta prueba tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los 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 CO₂". En el extracto obtenido se cuantifican los metales y metaloides. Si la concentración en el extracto de unos o varios de los elementos listados en la siguiente tabla referente a los constituyentes tóxicos en el extracto de la NOM- 052- SEMARNAT -2005 es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales son peligrosos por su toxicidad (tabla 1).

Tabla 1: 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	5.0
Bario	100.0
Cadmio	1.0
Cromo	5.0
Mercurio	0.2
Plata	5.0
Plomo	5.0
Selenio	1.0

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 aquéllos 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.

El criterio de $PN/PA < 1.2$ para definir que los jales son peligrosos por su capacidad de generación de drenaje ácido fue tomada de la Guía Ambiental del Perú para el manejo de jales. Sin embargo, no se tienen datos en México para poder valorar si esta relación cumple con el objetivo propuesto.

Además de lo establecido en la NOM-141 para poder valorar la peligrosidad de los jales es necesario cuantificar la concentración total de los elementos potencialmente tóxicos (EPT); ya que:

- Proporciona información acerca de la presencia de los EPT que contienen los jales evaluados.
- Junto con los datos de las concentraciones solubles de EPT (obtenidos en la prueba de extracción) permite valorar su geodisponibilidad y su grado de movilidad.

En el caso de los jales inactivos “No oxidados”, la aplicación de las pruebas de balance ácido- base, es adecuada ya que cumplen con su objetivo; pero en el caso de los jales inactivos “oxidados”, donde ya ocurrieron los procesos de oxidación y neutralización, para determinar si hay posibilidad de generación de drenaje ácido basta con medir el pH en los jales y constatar que es ácido. Adicionalmente, pruebas simples de campo para identificar presencia de carbonatos (reacción positiva al HCl) permiten determinar si éstos se agotaron o no durante el proceso de neutralización. En el caso de que en los jales oxidados aún haya carbonatos, se puede interpretar como una garantía de que en estos jales no habrá posibilidad de generación de drenaje ácido en el futuro, ya que la oxidación de los posibles sulfuros, que quedaron, sería neutralizada por la disolución de los carbonatos existentes (Romero, 2007).

IV. METODOLOGÍA

4.1 Muestreo

4.1.1 Estrategia de muestreo

El muestreo se realizó entre los días 22 - 26 marzo de 2007. La cantidad y ubicación de las muestras se definió con el fin de cumplir los objetivos propuestos. Se colectaron un total de 69 muestras de jales distribuidas de la siguiente manera:

- Muestreo representativo de jales superficiales antiguos (visiblemente alterados) y recientes (visiblemente no alterados)

Objetivo: valorar la peligrosidad de los jales que están almacenados en la presa.

Cantidad de muestras: 48 muestras, distribuidos en el “vaso” y “talud” de la presa. Con estas 48 muestras simples se formaron 12 muestras compuestas.

- Muestras simples subsuperficiales (en perfiles) jales recientes y antiguos.

Objetivo: valorar la migración vertical de contaminantes

Cantidad de muestras: 20 muestras simples. (Perfiles de 1 m de profundidad, cada perfil compuesto por 4 muestras simples).

- Muestreo de la descarga actual de jales antes de llegar a la presa (zona de descarga).

Objetivo: valorar la peligrosidad de los jales que actualmente se están produciendo.

Cantidad de muestras: 1 muestra simple.

- Muestreo del mineral del frente de explotación

Objetivo: identificar los minerales primarios y secundarios propios del yacimiento y compararla con los minerales primarios y secundarios de la presa de jales.

Cantidad de muestras: 8 ejemplares de roca (muestra de mano)

4.1.2 Formación de muestras compuestas de jales

Con el fin de obtener los criterios necesarios para formar muestras compuestas de la presa de jales, en el campo se determinaron pH, conductividad eléctrica (CE), textura, color, reactividad al HCl y grado de compactación en la presa de jales.

De acuerdo a los parámetros determinados “in situ” y a las observaciones realizadas al momento de tomar las muestras, la presa de jales de la Unidad Minera Charcas (UMCh) se puede dividir en:

Presa activa “1”: en esta zona se están descargando los jales que se están generando actualmente. Estos jales son recientes y de color gris (Fig 10). Tanto los jales del “vaso” como del “talud” están expuestos. Adicionalmente, vale la pena destacar que en gran parte del “vaso” abarca lo que se denomina laguna de jales (zona de la presa de jales que se encuentra inundada).

Presa inactiva “2”: en esta zona los jales presentan diferentes grados de oxidación y son en general de color café. Estos jales están localizados hacia el este de la presa activa “1”. Tanto los jales del “talud” como los del “vaso” están parcialmente cubiertos con material de relleno y con vegetación (Fig 10).

Presa inactiva “3”: en esta zona los jales presentan un alto grado de oxidación y son de color rojizo. Estos jales están localizados al sureste de la presa activa (Fig 10). Tanto los jales del “talud” como los del “vaso” están expuestos. Sobre

la superficie de estos jales oxidados se observan jales grises inalterados que provienen de la presa activa "1".



Figura 10. Aspectos generales de la presa de jales de la Unidad Minera Charcas (UMCh)

Para obtener muestras representativas la presa de la UMCh se dividió en cuadrantes tanto en el “vaso” como en el “talud” (Tabla 2, Fig 11) y se agruparon para formar 11 muestras compuestas considerando características comunes como color, grado de compacidad, valores de pH, conductividad eléctrica y reactividad al HCl.

- a)** En la parte del “vaso” se colectaron un total de treinta muestras simples distribuidas en 8 cuadrantes para formar las respectivas muestras compuestas (JCH-I a JCH-VII).
- En la presa activa “1”, donde los jales son de color gris (Fig 11) se formaron 4 muestras compuestas (JCH-I a JCH-IV). Adicionalmente se tomó una muestra de la descarga de los jales que se están generando actualmente.
 - En la presas inactiva “2”, donde los jales son de color café claro (Fig 11), se formaron 2 muestras compuestas (JCH-VI y JCH-VII).
 - En la presa inactiva “3”, donde los jales son de color café-rojizo (Fig 11) se formaron 2 muestras compuestas (JCH VA y JCH VB).
- b)** En la parte del “talud” se colectaron 18 muestras simples distribuidas en 4 cuadrantes para formar las respectivas muestras compuestas. De estas cuatro muestras compuestas, tres corresponden (JCH-VIII, JCH-IX y JCH-XI) al “talud de la presa activa “1” y una muestra corresponde al “talud” de la presa inactiva “2” (J-X). (Fig 11).

Tabla 2: Relación de muestras simples y compuestas de la Unidad Minera Charcas (UMCh)

Cuadrante		Color	Cuadrante		Color
Muestra compuesta	Muestras simple		Muestra compuesta	Muestras simple	
JCH-I	JCH1	gris	JCH-VII	JCH26	café
	JCH2	gris		JCH27	café
	JCH3	gris		JCH28	café
	JCH4	gris		JCH29	café
JCH5	gris	JCH30		café	
JCH-II	JCH6	gris	JCH-VIII	JCH31	gris
	JCH7	gris		JCH32	gris
JCH-III	JCH8	gris		JCH33	gris
	JCH9	gris		JCH34	gris
	JCH10	gris	JCH-IX	JCH35	gris
	JCH11	gris		JCH36	gris
JCH-IV	JCH12	gris		JCH37	gris
	JCH13	gris		JCH38	gris
	JCH14	gris	JCH-X	JCH39	café
	JCH15	gris		JCH40	café
JCH-V- A	JCH16	gris		JCH41	café
	JCH17	gris		JCH42	café
	JCH18	gris	JCH43	café	
	JCH19	gris	JCH-XI	JCH44	gris
JCH-V-B	JCH20	rojo		JCH45	gris
JCH-VI	JCH21	café		JCH46	gris
	JCH22	café		JCH47	gris
	JCH23	café		JCH48	gris
	JCH24	café	Descarga	gris	
	JCH25	café			

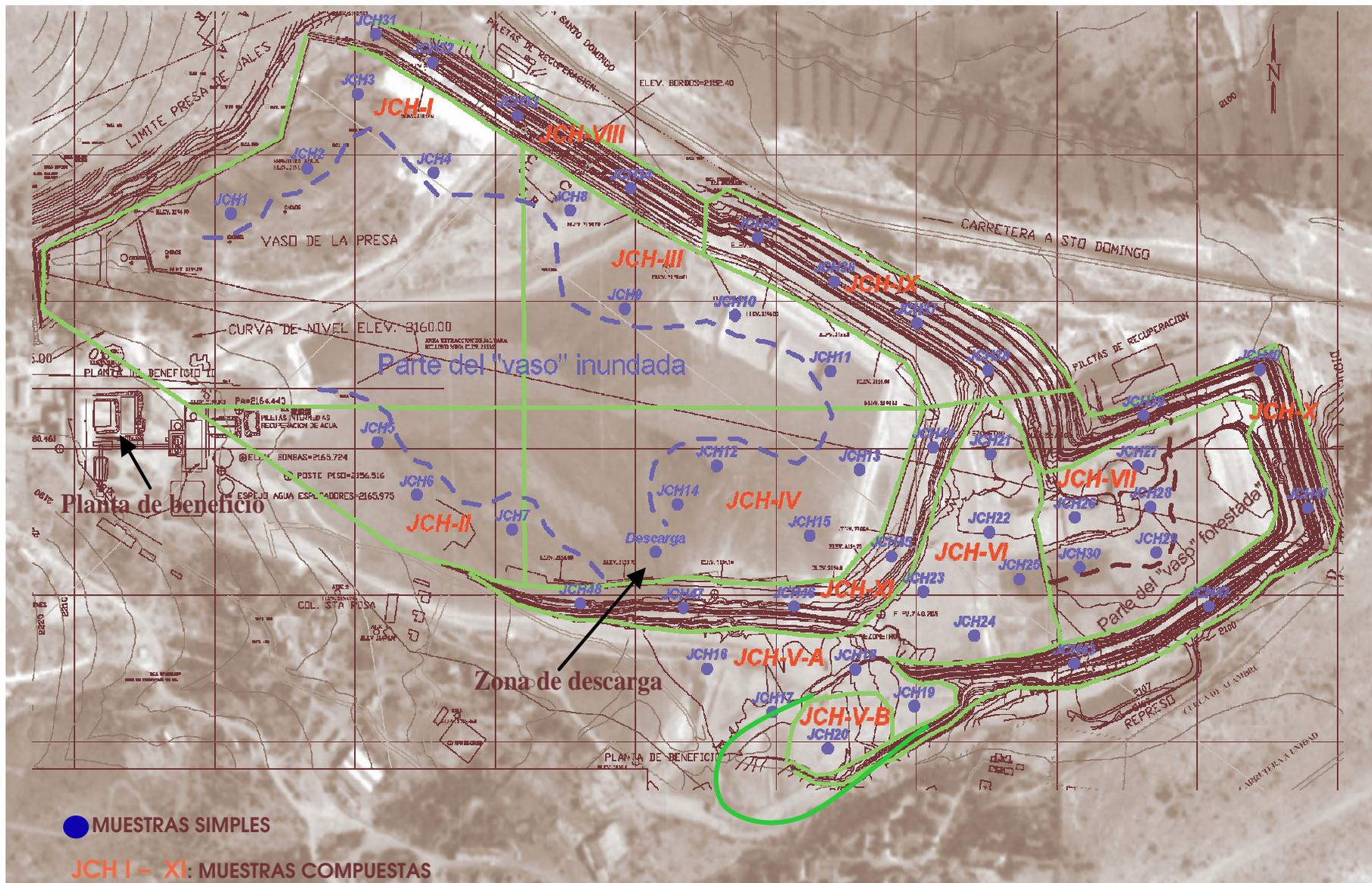


Figura 11. Distribución de muestras simples y compuestas de jales superficiales



Figura 12. Fotografías del muestreo de los sitios de las diferentes partes de la presa de jales.

4.1.3 Muestreo subsuperficial de los jales (perfiles)

El muestreo subsuperficial se realizó en cinco perfiles de 1 metro de profundidad (Fig 13) excavados con un equipo de perforación manual (hand auger). Se colectaron un total de 20 muestras simples (4 muestras de 25 cm de espesor en cada pozo):

- Cuatro muestras en un perfil (ZJ 01) en el “vaso” de la presa inactiva “3”
- Cuatro muestras en un perfil (ZJ 02) en el “vaso” de la presa activa “1”
- Cuatro muestras en un perfil (ZJ 03) en el “talud” de la presa activa “1”
- Cuatro muestras en un perfil (ZJ 04) en el “vaso” de la presa inactiva “2”
- Cuatro muestras en un perfil (ZJ 05) en el “talud” de la presa inactiva “2”.



Figura 13. Muestreo de jales mediante perfiles

4.1.4 Muestreo en la zona de descarga

El punto de descarga se localiza en la zona de jales recientes. En esta muestra se espera identificar a los minerales primarios que contienen los jales tal y como llegan a la presa.

4.1.5 Muestreo del mineral en el frente de explotación (cabeza)

Con el fin de identificar los minerales primarios y secundarios procedentes del yacimiento, se colectaron muestras de ejemplares antes de que entren al proceso de molienda y beneficio.

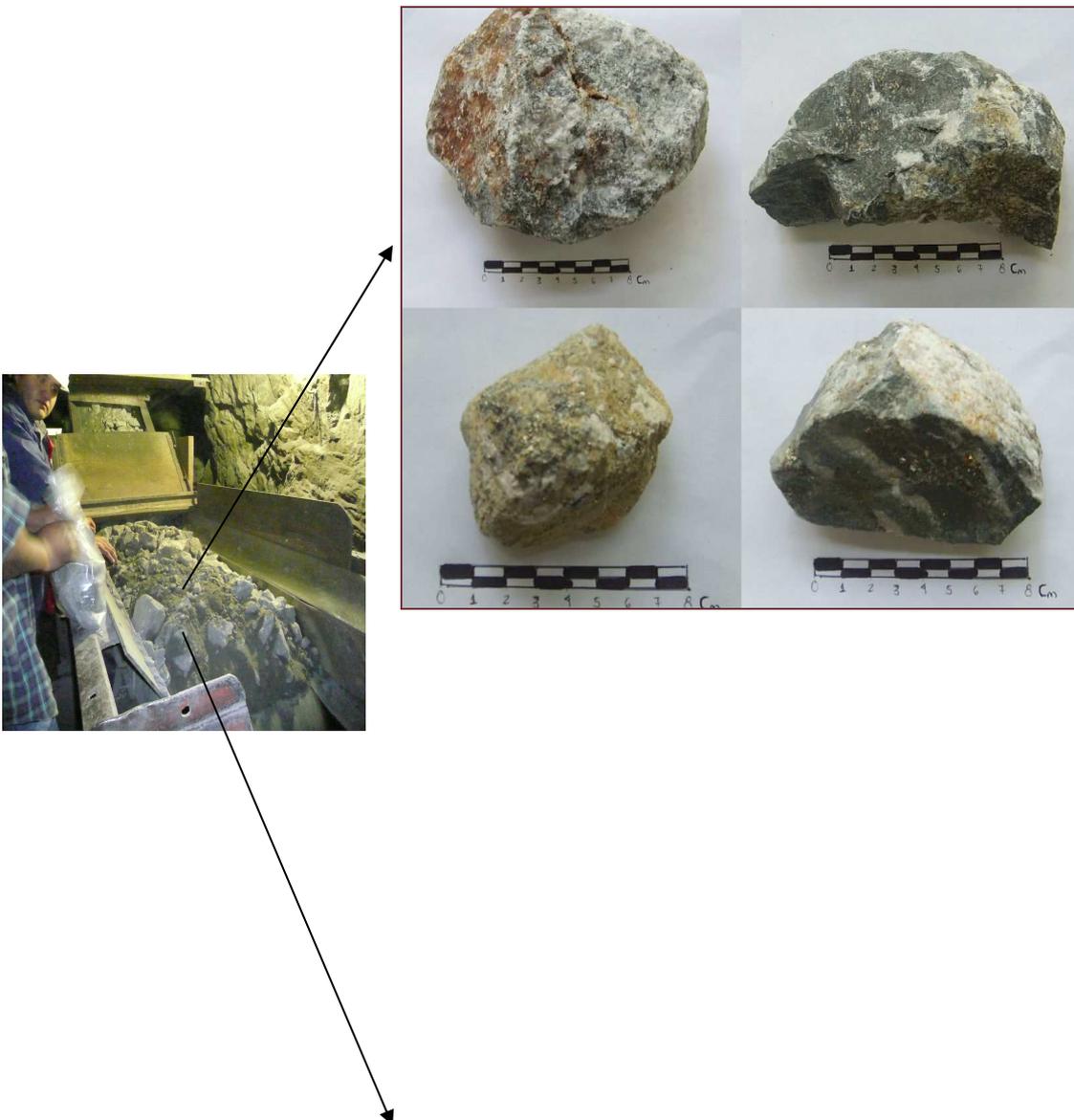




Figura 14. Ejemplares de rocas del yacimiento de la UMCh (muestras de mano).

4.2 Pruebas y análisis de laboratorio

4.2.1 Análisis de laboratorio

Las pruebas y análisis de laboratorio se realizaron en los siguientes laboratorios de la Universidad Nacional Autónoma de México: Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA) del Instituto de Geografía, Laboratorio de Difracción y Fluorescencia de Rayos X de la Facultad de Química, Laboratorio de Petrología del Instituto de Geofísica y Laboratorio de Petrografía de la Facultad de Ingeniería.

4.2.2 Preparación de muestras para análisis de laboratorio

Las muestras de jales fueron secadas a temperatura ambiente, se disgregaron, se tamizaron con malla de aproximadamente 2 mm de diámetro, se homogenizaron y se tomaron las respectivas partes para los análisis químicos y físicos.

4.2.3 Determinación de pH y Conductividad eléctrica (CE)

Para determinar el pH y la conductividad eléctrica (CE) se prepararon suspensiones de las muestras homogenizadas en una relación sólido:agua de 1 : 5. En el caso del pH, las suspensiones se agitaron durante 15 minutos, de acuerdo al método 9045C de la US-EPA (1995b), y para las lecturas se utilizó un potenciómetro BECKMAN modelo Φ 720. Para la determinación de CE, las suspensiones se agitaron durante 1 hora, de acuerdo al método descrito en SSSA Book Series No. 5 parte III (1996), y para las lecturas se utilizó un conductímetro CORNING 441.

4.2.4 Caracterización química y mineralógica de jales

En todas las muestras de jales se cuantificaron las concentraciones totales de los elementos regulados en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003: arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plata (Ag), plomo (Pb) y selenio (Se). Adicionalmente se determinaron las concentraciones totales de elementos indicadores que caracterizan al yacimiento del cual provienen los jales de estudio: cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn). También se determinaron las concentraciones totales de berilio (Be), níquel (Ni), talio (Tl) y vanadio (V).

Para determinar la concentración total de los EPT, las muestras homogenizadas se molieron en un molino de bolas y fueron digeridas con HNO₃ concentrado en horno de microondas de acuerdo al método 3051 de la US-EPA (1994). Los análisis de concentración total se realizaron con Espectroscopia de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES), siguiendo el procedimiento general descrito en el método 6010b de la US-EPA (1996).

Se identificó la mineralogía de los jales utilizando las técnicas de: Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía óptica, Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS) y Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Considerando que los EPT se concentran en las partículas más finas (Romero et al., 2007) las muestras homogenizadas fueron cribadas con la malla 400 con

el fin de aumentar la posibilidad de identificar los minerales que contiene EPT utilizando las técnicas de DRX y MEB. En 10 muestras concentradas se determinó la composición mineralógica utilizando la técnica de DRX. De las 10 muestras concentradas (diámetro < 40 μm) se seleccionaron 6 (que representan las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales estudiados) para analizarlas por MEB-EDS. En estas 6 muestras se analizaron aproximadamente unas 250 partículas. En estas partículas se detectó la presencia de los EPT de interés, se les tomó microfotografías y se determinó la concentración de los mismos (MEB-EDS).

Para realizar una adecuada interpretación de los datos de DRX se determinó por FRX la concentración total de los elementos mayores: silicio (Si), titanio (Ti), aluminio (Al), calcio (Ca), hierro (Fe), potasio (K), manganeso (Mn), sodio (Na) y fósforo (P). Para realizar los análisis por FRX, las muestras homogenizadas se pulverizaron en un molino de bolas hasta obtener una granulometría menor a 65 μm (malla 230). Los análisis se realizaron mediante la preparación de perlas con una mezcla 50:50 de tetraborato de litio/metaborato de litio.

Y por último se prepararon 7 láminas delgadas pulidas: 4 de la mena (Y-I, II, III y IV), 1 de los jales grises (JCH-II), 1 de jales antiguos de color café (JCH-X) y 1 de jales antiguos de color rojo (JCH-VB). Las láminas se prepararon en Canadá (Petrographics Vancouver) y se analizaron en los laboratorios de Petrografía de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Geología e Instituto de Geofísica.

4.2.5 Criterios de interpretación/discusión

A) Toxicidad: Constituyentes tóxicos solubles

Para valorar la peligrosidad de los jales por su toxicidad se realizó la prueba de extracción siguiendo el procedimiento señalado en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Esta prueba se realizó en las 12 muestras compuestas de los jales del “Vaso” y del “Talud”.

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 (agitador orbital)
- Separar la fase sólida del extracto mediante la centrifugación y filtración con membrana de 0.45 µm
- Determinar la concentración soluble de los EPT normados (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb y Se). También se determinaron las concentraciones solubles de cromo hexavalente (CrVI) y los elementos indicadores como el Fe, Cu y Zn; y las de Be, Ni, Tl y V. Las concentraciones solubles de As se determinaron por Espectroscopia de Absorción Atómica - Generación de hidruros de acuerdo al método de la USEPA (1994c). Las concentraciones solubles de los otros elementos se realizaron por Espectroscopía de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES), siguiendo el procedimiento general descrito en el método 6010b.

B) Reactividad: Capacidad de generación de drenaje ácido

La capacidad de generación de ácido se valoró mediante 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:

$$PA = \% \text{ de azufre como sulfuro } [\%S^{2-}] \times 31.25^1$$

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

²El 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.

V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 pH, conductividad eléctrica, sulfatos y caracterización química

5.1.1 Valores de pH

Los resultados de pH, conductividad eléctrica, sulfatos y concentración total de los elementos potencialmente tóxicos se presentan en la Tabla 3.

En los jales de color gris recientes –de la presa activa “1”- los valores de pH son prácticamente neutros (mínimo 6.5, máximo 8.2, mediana 7.8). Sin embargo, la determinación de los valores de pH en jales de la presa activa “1” no es suficiente para valorar su potencial de generación de drenaje ácido en el futuro; ya que en estos jales no han tenido lugar los fenómenos geoquímicos (oxidación – neutralización) que determinan la generación potencial de drenaje ácido; por lo que se requiere de pruebas adicionales como las de balance ácido-base; que se discuten más adelante.

En el caso de los jales antiguos, donde ya ocurrieron los procesos de oxidación y neutralización, la determinación del pH es suficiente para valorar su potencial para la generación de drenaje ácido. En los jales antiguos de color café claro (presa inactiva “2”) y café- rojizo (presa inactiva “3”) se registraron valores de pH que son prácticamente neutros (mínimo 7.2 , máximo 8.4 , mediana 7.5), lo que indica que en la presa de la Unidad Minera Charcas los jales antiguos de las presas inactivas “2” y “3” No son generadores potenciales de drenaje ácido. Adicionalmente, en estos jales se detectaron carbonatos. La presencia de carbonatos (reacción positiva al HCl) en estos jales oxidados indica que éstos no se agotaron durante el proceso de neutralización; lo que representa una garantía de que en estos jales no habrá posibilidad de generación de drenaje ácido en el futuro, ya que la oxidación de los posibles sulfuros, que quedaron inalterados, sería neutralizada por la disolución de los carbonatos existentes.

5.1.2 Valores de conductividad eléctrica (CE) y sulfatos (SO_4^{2-})

Los valores (mediana) de CE y las concentraciones de SO_4^{2-} son más altos en los jales antiguos (CE = 2170 $\mu\text{S}/\text{cm}$, SO_4^{2-} = 781.3 mg/kg) que en jales recientes (CE = 1513 $\mu\text{S}/\text{cm}$, SO_4^{2-} = 278.5 mg/kg).

En los jales, los valores de CE dependen de la concentración de sulfatos, los cuales tienen dos orígenes (McGregor et al., 1998, Romero et al. 2007):

- i) En los jales inalterados, se debe a la presencia de reactivos residuales (sulfato de cobre y sulfato de zinc), que son sales solubles que se utilizan en el proceso de flotación que generan los jales o bien por la disolución de yeso, que es un mineral de ganga de algunos yacimientos minerales.
- ii) En los jales oxidados, además de la presencia de reactivos residuales, se debe a la liberación de sulfatos debido a la oxidación de los sulfuros metálicos, que generalmente precipita como yeso secundario o sulfato de metales transicionales, que son relativamente solubles; lo cual explica los resultados obtenidos en este estudio.

El hecho de que en los jales antiguos se determinaron los valores más altos de sulfatos, que es la causa de la conductividad eléctrica, indica que la oxidación en los jales va acompañada de la liberación de sulfatos; pero que no necesariamente de la generación de acidez; ya que los valores de pH en estos jales oxidados son prácticamente neutros (pH = 7.2 – 8.4). Por tanto los valores altos de sulfatos implica que muchos sulfuros están en proceso de oxidación.

5.1.3 Concentración total de elementos potencialmente tóxicos en jales superficiales

A) Elementos regulados en la Norma Oficial Mexicana NOM-141

- Para los jales en general (presa activa “1”, presa inactiva “2” y “3”), las concentraciones totales de Hg y Se son inferiores al límite de detección, (tabla 3) lo que indica que estos jales se caracterizan por la ausencia de estos elementos. Además estos jales se caracterizan por las bajas concentraciones de Ag (mediana 23.9 – 37.3 mg/kg), Ba (mediana 12.6 – 24.3mg/kg) y Cr (mediana <LD – 10.3 mg/kg) con relación a las concentraciones naturales de fondo de la región (Instituto de Geología, 2007).
- Las concentraciones totales de los otros elementos normados (As, Cd y Pb), permite diferenciar a los jales antiguos de color café y rojo de la presa inactiva “2” y “3”, de los jales recientes de color gris presa activa “1”. En los jales antiguos de color café y rojo (de la presa inactiva “2 y “3”) las concentraciones de As (mediana 414.6 mg/kg), Cd (mediana 137.0 mg/kg) y Pb (mediana 1549 mg/kg) son mayores que en los jales recientes grises donde: As (mediana 280.6 mg/kg), Cd (mediana 40.1 mg/kg) y Pb (mediana 532 mg/kg) (tabla 3).

Considerando lo anteriormente expuesto, se puede decir que los problemas potenciales ambientales relacionados con los jales de Charcas deben estar asociados con las relativamente altas concentraciones de arsénico, cadmio y plomo como se puede observar en la figura 15.

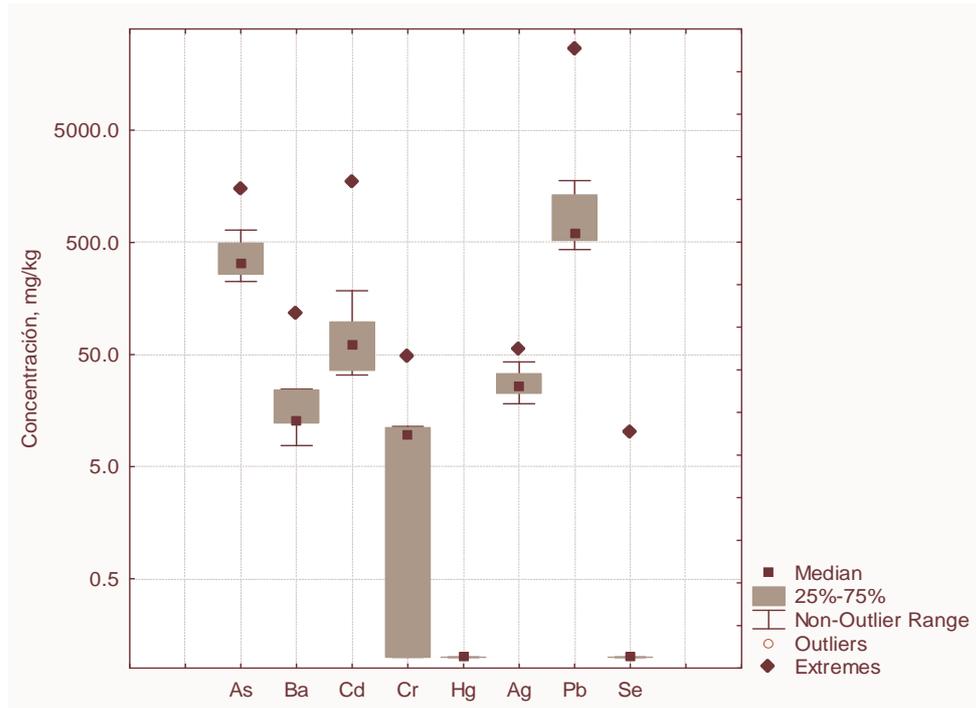


Figura 15. Gráfica de concentraciones de As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se

B) Elementos potencialmente tóxicos No regulados en la NOM-141

Adicional a los elementos potencialmente tóxicos (EPT) regulados en NOM-141, se determinaron las concentraciones de otros EPT como el berilio (Be), talio (Tl), níquel (Ni) y vanadio (V). Los resultados (tabla 3) indican que los jales de estudio en general (presa activa “1”, presa inactiva “2” y “3”) no son fuente de contaminación de Be y Tl, ya que las técnicas de análisis no detectaron su presencia. Las concentraciones de Ni (mediana <LD - 6.7 mg/kg) y V (mediana 10.1 - 18.7 mg/kg) son relativamente bajas en inferiores a las concentraciones naturales de la región (Instituto de Geología, 2007).

C) Elementos indicadores propios de la zona minera de Charcas y no regulados en la normatividad mexicana.

El Cu, Zn y Fe no son regulados en la normatividad mexicana debido a que son elementos comunes. Las concentraciones totales de Cu, Zn y Fe determinadas en los jales de estudio permite diferenciar a los jales antiguos de las presas

inactiva “2” y “3” de los otros. En los jales antiguos (presa inactiva “2” y “3”) las concentraciones de Cu (mediana 1004 mg/kg), Zn (mediana 11940 mg/kg) y Fe (mediana 3.57%) son mayores que en los jales recientes de color gris donde: Cu (mediana 539 mg/kg), Zn (mediana 3196 mg/kg) y Fe (mediana 3.93%); cabe señalar que el valor para el Fe en la presa inactiva “2”, se ve afectado por los valores de Fe de la presa inactiva “3”.

Sin embargo se puede observar un comportamiento casi uniforme para los valores de las concentraciones de Fe, Cu y Zn para los jales de las presa activa “1” e inactiva “2”, en cambio para los valores de concentraciones de estos mismos elementos en la presa inactiva “3”, están muy por encima de la media.

Es importante destacar que las concentraciones totales de Zn en los jales de la presa inactiva “3” pueden ser de interés comercial dado que los valores son muy elevados, sin embargo para esto se necesitaría de una valoración más detallada. (Figura 16).

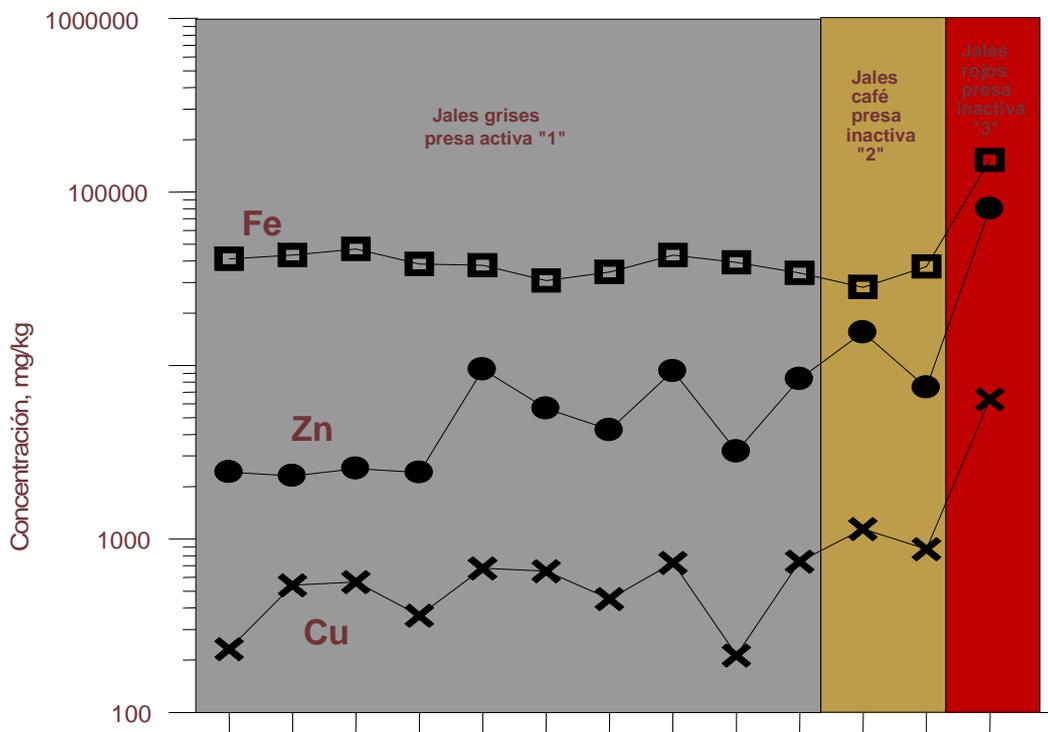


Figura 16. Gráfica de concentraciones de Cu, Zn y Fe

Tabla 3: Parámetros generales y concentración total de elementos potencialmente tóxicos en muestras de jales superficiales compuestas de la Unidad Minera Charcas

Jales recientes de color gris de la presa activa "1"																		
CLAVE	pH	C.E.	SO ₄ ²⁻	As	Ba	Cd	Crtotal	Hg	Ag	Pb	Se	Be	Ni	Tl	V	Zn	Cu	Fe
		μS/m	mg/kg															
J CH I	8.1	1513	327.9	231.5	12.7	33.8	11.4	<LD	18.2	532	<LD	<LD	<LD	<LD	15.2	2425	231	4.12
J CH II	8.1	1264	218.3	260.4	12.3	32.9	<LD	<LD	22.7	546	<LD	<LD	<LD	<LD	9.8	2308	539	4.32
J CH III	7.6	1310	278.5	280.6	10	36.4	<LD	<LD	23.9	507	<LD	<LD	<LD	<LD	10	2545	563	4.69
J CH IV	7.7	1218	217.6	324.5	12.7	34.3	9.4	<LD	22.6	433	<LD	<LD	<LD	<LD	11.7	2417	360	3.84
J CH V A	7.5	2240	540.6	643	24.2	100.6	11.2	<LD	42.9	1461	<LD	<LD	7.5	<LD	20.8	9479	675	3.79
J CH VIII	7.8	1870	328.8	251.8	16.6	60.4	<LD	<LD	26.2	599	<LD	<LD	<LD	<LD	9.7	5644	650	3.09
J CH IX	8.2	1641	328.7	373.4	11.1	47.4	<LD	<LD	24.3	441	<LD	<LD	<LD	<LD	10.1	4251	450	3.46
J CH XI	6.5	939	185.5	534.1	7.7	97.8	<LD	<LD	33.8	780	<LD	<LD	<LD	<LD	7.5	9277	727	4.32
Descarga	8.1	7005	107.3	224.7	12.6	40.1	11.1	<LD	19.6	523	<LD	<LD	<LD	<LD	12.1	3196	213	3.93
Mínimo	6.5	939	107.3	224.7	7.7	32.9	<LD	<LD	18.2	433	<LD	<LD	<LD	<LD	7.5	2308	213	3.09
Máximo	8.2	7005	540.6	643.0	24.2	100.6	11.4	<LD	42.9	1461	<LD	<LD	7.5	<LD	20.8	9479	727	4.69
Mediana	7.8	1513	278.5	280.6	12.6	40.1	<LD		23.9	532			<LD		10.1	3196	539	3.93
Desv. Est.	0.5	1875	123.2	147.1	4.7	27.2	5.7		7.7	322					4.0	2912	189	0.48
Jales antiguos de color café (*) de la presa inactiva "2" y rojo (**) de la presa inactiva "3"																		
CLAVE	pH	C.E.	SO ₄ ²⁻	As	Ba	Cd	Crtotal	Hg	Ag	Pb	Se	Be	Ni	Tl	V	Zn	Cu	Fe
		μS/m	mg/kg															
J CH VI (*)	7.6	2009	785.1	336.4	24.1	88.3	9.8	<LD	28.8	966	<LD	<LD	6.1	<LD	17.1	8356	738	3.41
J CH VII (*)	7.2	2160	412.1	280.6	24.6	185.7	10.9	<LD	41.2	1321	<LD	<LD	6.6	<LD	18.6	15525	1138	2.83
J CH X (*)	7.4	2180	777.4	492.8	22.3	80.8	9.6	<LD	56.4	1777	10.3	<LD	6.8	<LD	18.7	7457	870	3.72
J CH V B (**)	8.4	2220	1910.9	1493.1	115.1	1716.4	48.1	<LD	33.7	26824	<LD	<LD	16.4	<LD	20.8	80072	6376	15.29
Mínimo	7.2	2009	412.1	280.6	22.3	80.8	9.6	<LD	28.8	966	<LD	<LD	6.1	<LD	17.1	7457	783	2.83
Máximo	8.4	2220	1910.9	1493.1	115.1	1716.4	48.1	<LD	56.4	26824	<LD	<LD	16.4	<LD	20.8	80072	6376	15.29
Mediana	7.5	2170	781.3	414.6	24.3	137.0	10.3		37.4	1549			6.7		18.7	11940	1004	3.57
Desv. Est.	0.5	92	650.1	568.7	45.7	800.5	19.0		12.1	12739			4.9		1.5	35000	2735	6.0

<LD: Inferior al límite de detección, mg/kg : As = 4; Ba = 5, Cd = 6, Cr = 11, Hg = 5, Ag = 5, Pb = 30, Se = 4.5, Be = 6, Ni = 4.2, Tl = 1.5; V = 11, Zn = 5, Cu = 3.5, Fe = 10

5.1.4 Análisis del comportamiento de las concentraciones totales de los EPT en los perfiles de 100 cm de profundidad

Los resultados de pH, conductividad eléctrica, sulfatos y concentración total de elementos potencialmente tóxicos en las muestras de jales tomadas en perfiles se presentan en la tabla 4. En general, los resultados obtenidos en estos perfiles confirman los resultados obtenidos en las muestras superficiales; y permiten corroborar que los jales antiguos de la presa inactiva “3” son diferentes a los de las otras partes de la presa jales de la Unidad Minera Charcas. (Tabla 4 y Fig 16 y 17)

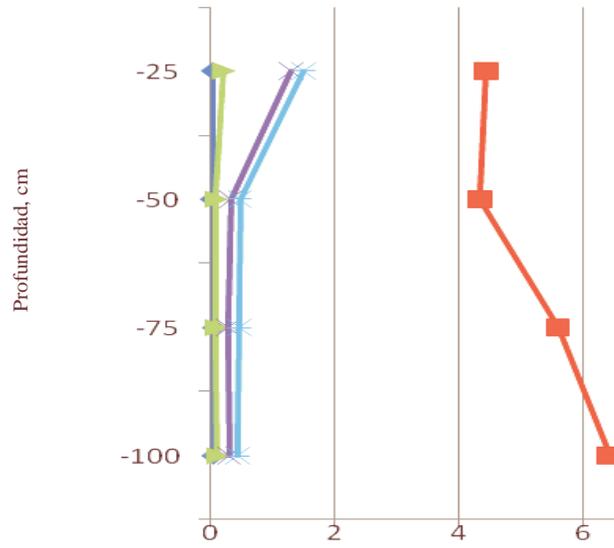
En el perfil ZJ01 del “vaso” de la presa inactiva “1” los valores de pH varían desde 6.6 en la superficie, hasta valores entre 5.8 y 4.1 a medida que aumenta la profundidad; lo que es congruente con el aumento de la concentración de Fe (elemento asociado a la pirita que es el principal mineral cuya oxidación produce acidez). Las concentraciones de Pb aumentan con la profundidad, lo cual indica que éstos se están concentrando en la parte inferior del perfil. En el caso del As y Cd se observa mayores concentraciones en superficie (Fig17), lo que parece indicar su poca movilidad bajo las condiciones ambientales.

En los otros perfiles (ZJ02, ZJ03, ZJ04, ZJ05) los valores de pH se mantienen prácticamente neutros y ligeramente básicos desde la superficie hasta la profundidad estudiada. Esto es congruente con las relativamente bajas concentraciones de Fe (elemento asociado a la pirita que es el principal mineral cuya oxidación produce acidez); lo que indica que estos jales no son buenos candidatos para generar acidez. Las concentraciones totales de As, Cd, Pb son bastante homogéneas desde superficie hasta la profundidad estudiada, lo que indica que están asociados a fases sólidas químicamente estables. (Fig 17)

Tabla 4: Parámetros generales y concentración total de elementos potencialmente tóxicos en muestras de jales tomadas en perfiles de 100 cm de profundidad en Unidad Minera Charcas

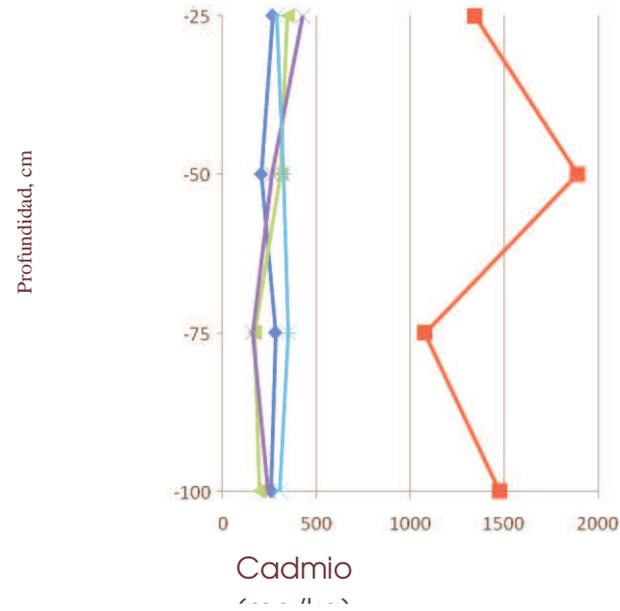
CLAVE	pH	C.E.	SO42-	As	Ba	Cd	Crtotal	Hg	Ag	Se	Be	Ni	Tl	V	Cu	Zn	Fe	Pb	
		uS/cm	mg/kg											%					
ZJ 01	0-25	6.6	2200	1343.5	1342.8	114.1	2478.5	55.6	<LD	79.0	<LD	<LD	15.29	<LD	12.2	0.82	8.09	15.45	2.95
ZJ 01	25-50	5.8	2250	2166.3	1892.6	207.7	2083.4	49.6	<LD	100.9	<LD	<LD	<LD	<LD	21.3	0.75	9.06	20.04	3.87
ZJ 01	50-75	4.5	2375	2159.7	1074.2	166.5	1960.3	56.2	<LD	133.2	<LD	<LD	<LD	<LD	21.3	0.83	9.90	18.67	5.15
ZJ 01	75-100	4.1	2590	1311.5	1474.3	180.4	2030.0	53.1	<LD	50.6	<LD	<LD	<LD	<LD	22.1	0.98	12.86	24.90	6.00
ZJ 02	0-25	7.6	882	156.4	265.1	11.3	25.0	13.3	<LD	18.9	<LD	<LD	<LD	<LD	11.2	0.02	0.15	4.36	0.04
ZJ 02	25-50	9.3	502	69.8	202.9	9.3	26.7	11.2	<LD	19.6	<LD	<LD	<LD	<LD	11.0	0.03	0.15	4.12	0.03
ZJ 02	50-75	7.9	1384	245.9	279.7	17.9	45.6	16.4	<LD	48.4	<LD	<LD	<LD	<LD	16.1	0.03	0.34	4.69	0.06
ZJ 02	75-100	7.9	1264	266.9	256.0	14.0	43.0	13.7	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	13.5	0.03	0.31	4.42	0.05
ZJ 03	0-25	7.3	1860	241.9	343.1	29.3	131.9	15.0	<LD	50.5	<LD	<LD	<LD	<LD	13.6	0.10	1.27	4.36	0.18
ZJ 03	25-50	7.6	1960	471.0	309.0	11.1	62.3	11.6	<LD	24.3	<LD	<LD	<LD	<LD	15.2	0.06	0.63	3.96	0.07
ZJ 03	50-75	7.6	1247	242.5	168.6	8.3	47.3	<LD	<LD	24.0	<LD	<LD	<LD	<LD	7.2	0.05	0.41	2.51	0.04
ZJ 03	75-100	7.7	2003	470.6	193.9	8.8	132.6	9.8	<LD	29.7	<LD	<LD	<LD	<LD	13.8	0.13	1.35	3.74	0.07
ZJ 04	0-25	6.6	2130	1747.8	426.9	23.7	434.3	12.7	<LD	108.5	68.4	<LD	6.61	<LD	16.7	0.66	3.86	3.56	1.09
ZJ 04	25-50	6.6	2320	1318.6	264.5	27.2	320.2	10.9	<LD	52.2	<LD	<LD	7.71	<LD	23.1	0.11	1.38	2.54	0.23
ZJ 04	50-75	7.8	1860	457.0	159.7	19.7	59.2	10.8	<LD	37.6	<LD	<LD	6.92	<LD	24.8	0.07	0.63	2.36	0.19
ZJ 04	75-100	7.8	2004	497.8	242.3	19.1	70.0	12.5	<LD	38.2	<LD	<LD	8.78	<LD	29.9	0.08	0.69	2.98	0.19
ZJ 05	0-25	7.8	1950	691.2	287.4	21.9	79.6	<LD	<LD	69.5	<LD	<LD	8.21	<LD	19.2	0.10	0.81	2.98	0.19
ZJ 05	25-50	7.9	1940	678.0	322.1	23.3	74.3	<LD	<LD	51.1	<LD	<LD	7.01	<LD	19.8	0.06	0.60	4.24	0.15
ZJ 05	50-75	7.9	1699	470.8	348.3	18.5	93.9	<LD	<LD	<LD	9.1	<LD	7.91	<LD	19.6	0.10	0.87	5.16	0.17
ZJ 05	75-100	7.7	2009	1317.2	301.8	27.4	79.9	12.8	<LD	46.4	36.2	<LD	8.09	<LD	28.1	0.06	0.70	4.86	0.13

<LD: Inferior al límite de detección, mg/kg : As = 4; Ba = 5, Cd = 6, Cr = 11, Hg = 5, Ag = 5, Pb = 30, Se = 4.5, Be = 6, Ni = 4.2, Tl = 1.5; V = 11, Zn = 5, Cu = 3.5, Fe = 10



- Perfil ZJ01 en el “vaso” de la presa inactiva “3”
- ◆ Perfil ZJ02 en el “vaso” de la presa activa “1”
- ▲ Perfil ZJ03 en el “talud” de la presa activa “1”
- × Perfil ZJ04 en el “vaso” de la presa inactiva “2”
- * Perfil ZJ05 en el “talud” de la presa inactiva “2”

Profundidad, cm



Profundidad, cm

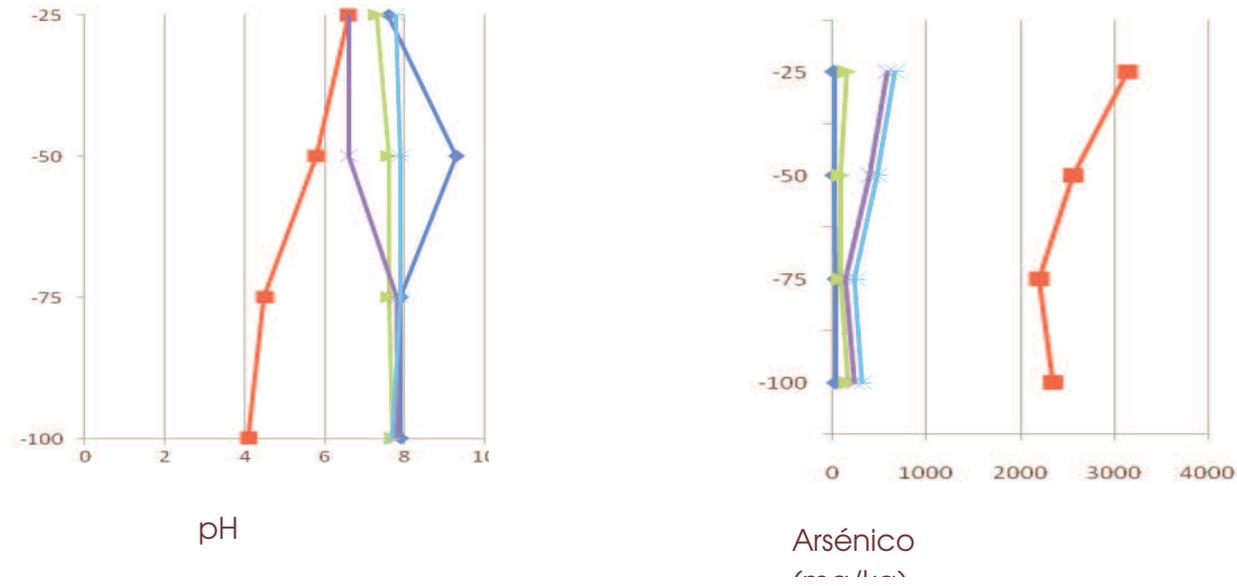


Figura 17. Gráficas de concentraciones de As, Pb y Cd, además de pH para las zanjas en perfiles

5.1.5 Concentración total de elementos mayores

En los jales de la presa de la Unidad Minera Charcas las concentraciones de Fe como Fe_2O_3 (6.088 - 19.618 %) son inferiores a las concentraciones de Ca como CaO (21.844 – 40.567 %). En el caso más conservador, si se asume que todo este Fe está asociado a la pirita (principal sulfuro metálico cuya oxidación genera drenaje ácido) y que todo el Ca está asociado a la calcita (principal mineral neutralizador), se puede inferir que la calcita presente es suficiente para poder neutralizar el drenaje ácido que se genere. Esto se comprobó con el hecho de que los valores de pH de los jales oxidados de color café de las presas inactivas “2” y “3” son neutros: mínimo 7.2, máximo 8.4, mediana 7.5, (-ver tabla 3 de este trabajo-).

Tabla 5: Concentración total de elementos mayores por Fluorescencia de Rayos X.

MUESTRA	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC*	Suma
	%											
JCH I	32.683	0.133	3.955	9.579	0.899	1.658	40.092	0.199	0.254	0.118	18.35	107.92
JCH II	37.467	0.127	3.923	8.662	1.029	1.319	37.384	0.314	0.204	0.142	15.55	106.12
JCH III	32.874	0.116	3.523	10.020	0.881	1.595	40.567	0.127	0.204	0.164	16.99	107.06
JCH IV	33.816	0.111	3.303	8.969	0.752	1.327	39.686	0.120	0.243	0.103	16.90	105.33
JCH VA	33.811	0.164	4.211	13.050	1.289	0.959	28.430	1.051	0.494	0.109	16.70	100.27
JCH VIII	35.680	0.111	3.349	8.163	0.740	1.419	40.102	0.315	0.231	0.096	17.56	107.77
JCH IX	37.070	0.111	3.356	8.419	0.648	1.156	39.554	0.252	0.187	0.068	16.49	107.31
JCH XI	35.700	0.109	3.036	10.392	0.763	1.064	37.193	0.458	0.166	0.093	14.45	103.44
JCH VI	38.921	0.161	4.694	8.168	0.827	1.077	35.686	0.439	0.444	0.085	16.05	106.55
JCH VII	34.321	0.132	4.053	6.088	0.792	1.422	38.679	0.594	0.288	0.163	18.60	105.13
JCH X	37.725	0.135	4.250	8.118	1.066	1.074	35.026	0.294	0.500	0.099	15.30	103.59
JCH VB	29.040	0.135	3.503	19.618	1.139	0.244	21.844	1.971	0.512	0.067	9.33	87.40

5.2 Valoración de la peligrosidad de los jales

5.2.1 Elementos potencialmente tóxicos solubles

Con el fin de valorar la capacidad de generación de elementos potencialmente tóxicos solubles de los jales de la UMCh, se realizó la prueba de extracción señalada en la Norma Oficial Mexicana NOM – 141- SEMARNAT- 2003. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones solubles de EPT regulados en la NOM – 141- SEMARNAT- 2003, son inferiores a los límites permisibles en dicha norma; por lo que se puede decir que estos jales se pueden clasificar como **NO PELIGROSOS** por su contenido de Elementos Potencialmente Tóxicos Solubles.

Tabla 6: Concentración de elementos potencialmente tóxicos solubles en los jales de la Unidad Minera Charcas (elementos normados en la NOM – 141- SEMARNAT- 2003)

CLAVE	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Ag	Pb	Se
	mg/L							
J CH I	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH II	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH III	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH IV	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,02
J CH V A	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH VI	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH VII	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH VIII	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,1
J CH IX	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,05
J CH X	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH XI	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH V B	< L.D.	< L.D.	1.0	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Límites permisibles en mg/L NOM-141-SEMARNAT-2004								
	5	100	1	5	0,2	5	5	1

<LD: inferior al límite de detección, mg/L: As = 0.047, Ba = 0.085, Cd = 0.03, Cr_{total} = 0.015, Hg = 0.05, Ag= 0.05, Pb=0.06, Se=0.015

Para otros elementos potencialmente tóxicos no normados en la NOM-141 (Be, Cu, CrVI, Ni, Tl y V), las concentraciones solubles no fueron detectadas por las técnicas de análisis.

Las bajas concentraciones solubles de los EPT en las muestras de jales de la Unidad Minera de Charcas indican que éstos están en formas de compuestos poco solubles que son químicamente estables y que por lo tanto, bajo las condiciones actuales, no representan un peligro para el ambiente.

Tabla 7: Concentración de elementos potencialmente tóxicos solubles en los jales de la Unidad Minera Charcas (elementos no normados en la NOM – 141- SEMARNAT- 2003)

CLAVE	Be	Cu	Cr VI	Fe	Ni	TI	V	Zn
	mg/L							
J CH I	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH II	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH III	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH IV	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH V A	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH VI	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH VII	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH VIII	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH IX	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH X	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH XI	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
J CH V B	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	10,6
Concentración (mg/L) que puede representar peligro*								
	0,75	5,9	NR	NR	5	0,192	3,71	38,4

<LD: inferior al límite de detección, mg/L: Be = 0.007, Cu = 0.044, CrVI = 0.005, Fe = 0.264, Ni = 0.021, TI = 0.065, V = 0.069, Zn = 0.057. NR: Dato no reportado

*Límites máximos permisibles reportados por Cristina Cortinas en “Procedimiento para calcular los límites máximos permisibles en el lixiviado para determinar la característica de toxicidad de un residuo peligroso. Gestión de residuos peligrosos. UNAM. 2002

5.2.2 Capacidad de generación de drenaje ácido

Para valorar la capacidad de la generación de drenaje ácido en las muestras de jales de la Unidad Minera Charcas, se realizó la prueba balance ácido- base de acuerdo a la metodología señalada en la NOM–141-SEMARNAT-2004.

Para la realización de esta prueba se seleccionaron jales recientes de color gris, donde los procesos de oxidación y neutralización no son evidentes. También se realizó esta prueba en muestras de jales antiguos (donde ya

ocurrieron los procesos de oxidación-neutralización) que tenían un pH con valores neutros.

Tabla 8: Resultados de la prueba balance ácido- base en las muestras de jales de la Unidad Minera Charcas.

Clave	%S _{total}	%S(SO ₄ ²⁻)	%S(S ²⁻)	PA	PN	PN/PA
				kg CaCO ₃ /Ton	kg CaCO ₃ /Ton	
J CH I	1,73	0,011	1,72	53,7	438,57	8,2
J CH II	2,12	0,007	2,12	66,1	352,45	5,3
J CH III	2,52	0,009	2,51	78,4	485,31	6,2
J CH IV	1,87	0,007	1,86	58,3	349,45	6
J CH V A	3,17	0,018	3,16	98,6	453,17	4,6
J CH VI	1,82	0,026	1,8	56,1	366,4	6,5
J CH VII	1,79	0,014	1,78	55,5	515,25	9,3
J CH VIII	2,04	0,011	2,03	63,4	357,53	5,6
J CH IX	1,73	0,011	1,71	53,6	431,59	8,1
J CH X	3,36	0,026	3,33	104,1	359,47	3,5
J CH XI	3,06	0,006	3,06	95,5	448,74	4,7
J CH V B	4,1	0,064	4,04	126,2	297,51	2,4
De acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2004, los jales son peligrosos por su capacidad para generar drenaje ácido cuando PN/PA < 1.2						

Los valores del potencial de neutralización (PN)/ potencial de acidez (PA) varían entre 2.4 - 9.3. (tabla 8)

La comparación de estos resultados con los criterios establecidos en la NOM-141¹ indica que los jales se pueden clasificar como **NO PELIGROSOS** ya que no son generadores potenciales de acidez. La aplicación de los criterios de la NOM-141 permite afirmar que el 100% de los jales de la presa de la Unidad Minera de Charcas No son generadores potenciales de drenaje ácido.

¹ En el numeral 5.2.2 de la NOM-141 se lee textualmente: “Para determinar si los jales son generadores potenciales de ácido, se debe aplicar la prueba modificada de balance ácido base. En caso de que la relación Potencial de Neutralización (PN)/Potencial Acido (PA) sea menor a 1.2, se consideran generadores potenciales de ácido.

Estos resultados son congruentes con el hecho de que en los jales oxidados – donde ya ocurrieron los fenómenos de oxidación y neutralización- los valores de pH son neutros y ligeramente básicos.

Es importante destacar que los valores más bajos de PN/PA corresponden a dos muestras de jales oxidados, lo que indica que el proceso de neutralización ha consumido carbonatos; pero que todavía la capacidad de neutralización es mayor que la capacidad de generación de acidez, lo que constituye una garantía de que no hay posibilidades que en un futuro los jales la Unidad Minera Charcas puedan generar acidez.

5.3 MINERALOGÍA

5.3.1 Jales recientes de color gris -presa activa “1”-

Los resultados del análisis mineralógico general por difracción de rayos X (DRX), en las muestras de jales molidas indican que los jales grises recientes de la presa activa “1” se caracterizan por el predominio en su composición mineralógica de minerales primarios como calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2) y pirita (FeS_2). (Fig 18).

Si se considera que los resultados de los análisis químicos indican que en los jales de la presa activa “1” las concentraciones de Fe (como Fe_2O_3) varían entre (6.088 - 19.618 %); y son inferiores a las concentraciones de Ca (como CaO) que varían entre (21.844 – 40.567 %); y si además se asume que este Fe está asociado, principalmente, a la pirita (principal sulfuro metálico cuya oxidación genera drenaje ácido) y que todo el Ca está asociado, principalmente, a la calcita (principal mineral neutralizador), se puede inferir que la presencia calcita es superior a la presencia de pirita y que además es suficiente para poder neutralizar el drenaje ácido que potencialmente se genere. Esta interpretación se verifica con el hecho de que los resultados de la

prueba de balance ácido – base indica que el potencial de neutralización (298 – 515 kg CaCO_3/Ton) en estos jales recientes es mayor que el potencial de generación de drenaje ácido (54 – 126 kg CaCO_3/Ton). (tabla 8)

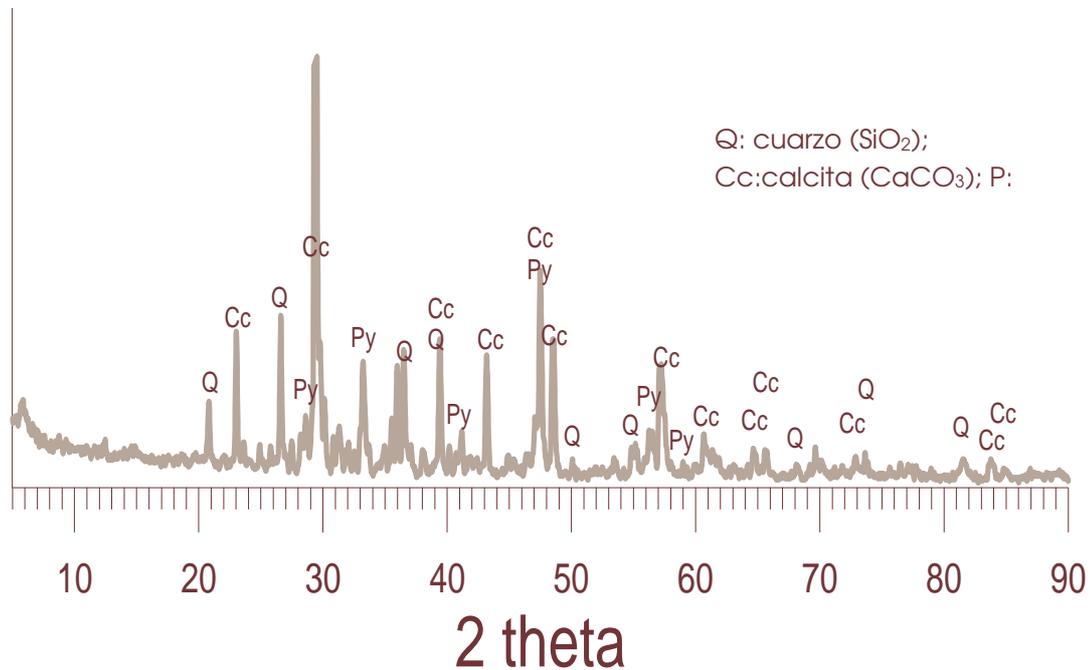


Figura 18. Diffractograma representativo de los jales recientes de color gris de la presa activa "1"

Además de los minerales identificados por DRX, los resultados de microscopía óptica en láminas delgadas pulidas indican la presencia de minerales primarios como esfalerita, galena y calcopirita (Fig. 19). Así mismo, se observó la presencia de minerales secundarios como covelita, bornita (Fig 19) que se encuentran reemplazando a la calcopirita a lo largo de bordes y fracturas, además también se observaron algunos oxihidróxidos de fierro, formando aureolas alrededor de los cristales de pirita. (Fig 20)

La presencia de estos minerales secundarios se interpreta como el producto de la alteración de los sulfuros metálicos en el yacimiento del cual provienen estos jales y no tienen relación con los fenómenos de oxidación que se llevan a cabo en los jales por la acción del agua y aire, lo que derivaría en la generación potencial de drenaje ácido. Este razonamiento es demostrado por la presencia de estos minerales secundarios (covelita, bornita y oxihidróxidos de Fe) en las

láminas delgadas pulidas de muestras del yacimiento mineral que se explota en Charcas (Fig. 19, 20 y 21).

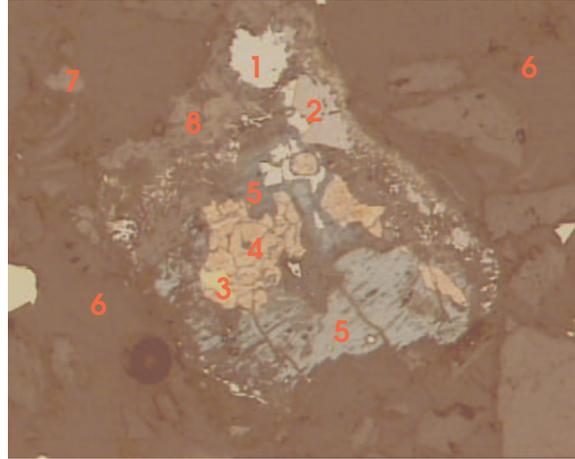


Figura 19. Jales recientes de color gris (muestra JCH-II). Donde se aprecia una partícula mixta formada por galena (1), esfalerita (2), calcopirita (3), bornita (4) y covelita-digenita(5) incluidos en minerales transparentes calcita (6) y cuarzo (7). Se observa un remplazamiento a través de bordes y fracturas de bornita y calcopirita por covelita-digenita, la galena y esfalerita se encuentran en intercrecimiento mutuo; la galena también presenta un borde de alteración a un mineral transparente probablemente anglesita (8). Fotografía tomada con luz paralela.

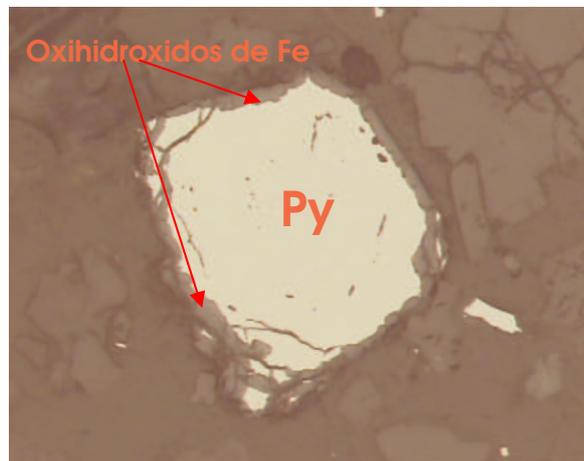


Figura 20. Jales recientes de color gris (muestra JCH- II). Donde se observa una partícula mixta subangulosa de pirita con remplazamiento parcial a través de sus bordes y fracturas por oxihidroxidos de hierro. Fotografía tomada con luz paralela.

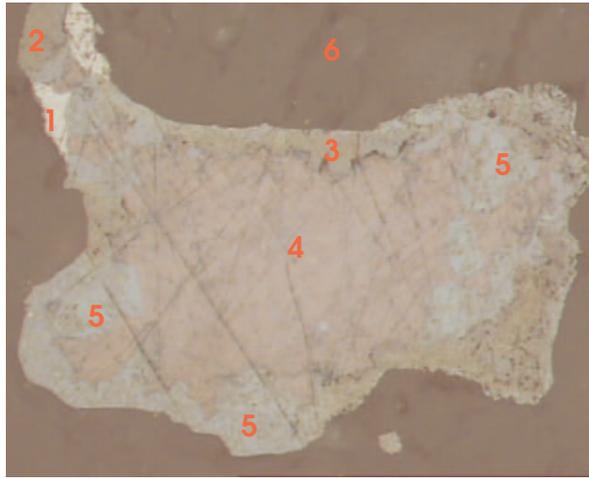


Figura 21. Muestra de yacimiento (Y-II). Donde se aprecia un cristal mixto formados por galena (1), esfalerita (2), calcopirita (3), bornita (4) y covelita-digenita(5) incluidos en minerales transparentes calcita (6). Se observa un remplazamiento a través de bordes y fracturas de bornita y calcopirita por covelita–digenita. Fotografía tomada con luz paralela.

Es importante notar la abundancia de calcita (Fig. 22 y 23) y la presencia de wollastonita en las muestras del yacimiento mineral de Charcas; cuyo destino final es la presa de jales una vez que se lleva a cabo el proceso de beneficio. Estos dos minerales son importantes desde el punto de vista ambiental; ya que su disolución consume la acidez potencial que se pueden generar en los jales por la oxidación de los sulfuros metálicos; y es consecuente con la abundante presencia de la calcita en los jales de la presa activa “1”.

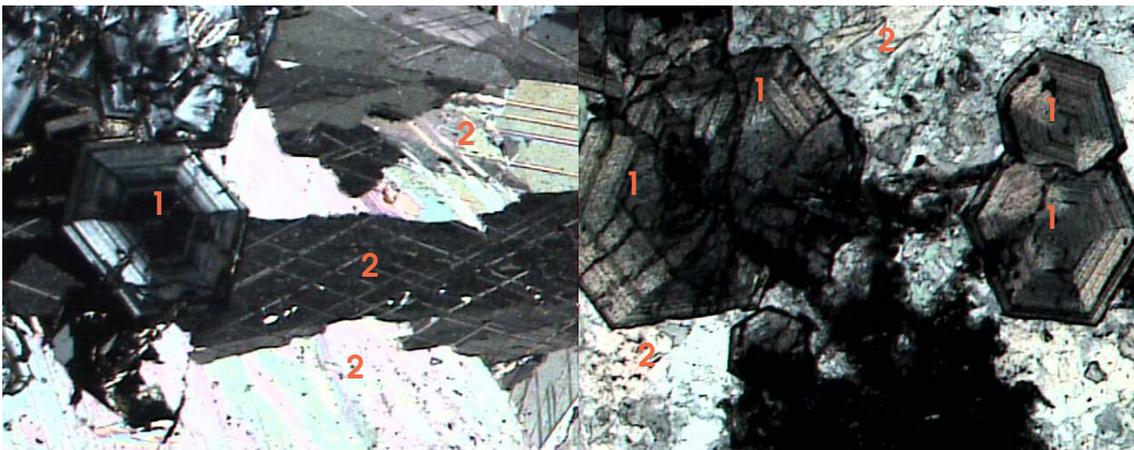


Figura 22. Muestra del yacimiento (Y-I). Donde se aprecia cristales euedrales y zonados de granates (1) incluidos en una matriz granoblástica de calcita (2) que varía de grano fino a grueso. Fotografía tomada con luz transmitida y nicols cruzados.

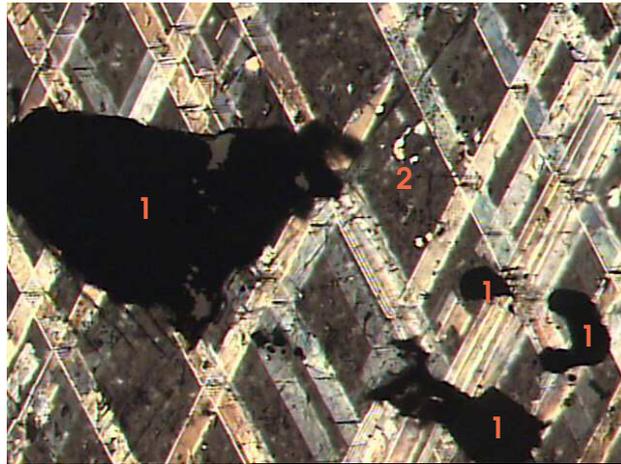


Figura 23. Muestra del yacimiento (Y-II). Donde se muestran cristales mixtos de pirita, esfalerita, galena y calcopirita (minerales opacos 1) que están remplazando a la roca encajonante (caliza 2). Esta fotografía esta tomada con luz transmitida y nicoles cruzados,

5.3.2 Jales antiguos de color café -presa inactiva “2”-

Los resultados del análisis mineralógico general por difracción de rayos X (DRX), en las muestras de jales molidas indican que los jales oxidados de color café de la presa activa “2” se caracterizan por el predominio en su composición mineralógica de minerales primarios como la calcita, pirita y cuarzo (Fig. 24). Sin embargo, se identificó al yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que es el principal mineral secundario que se forma debido a los procesos de oxidación – neutralización que ocurre en los jales (Johnson et al., 2000; McGregor et al., 1998; Romero et al. 2007).

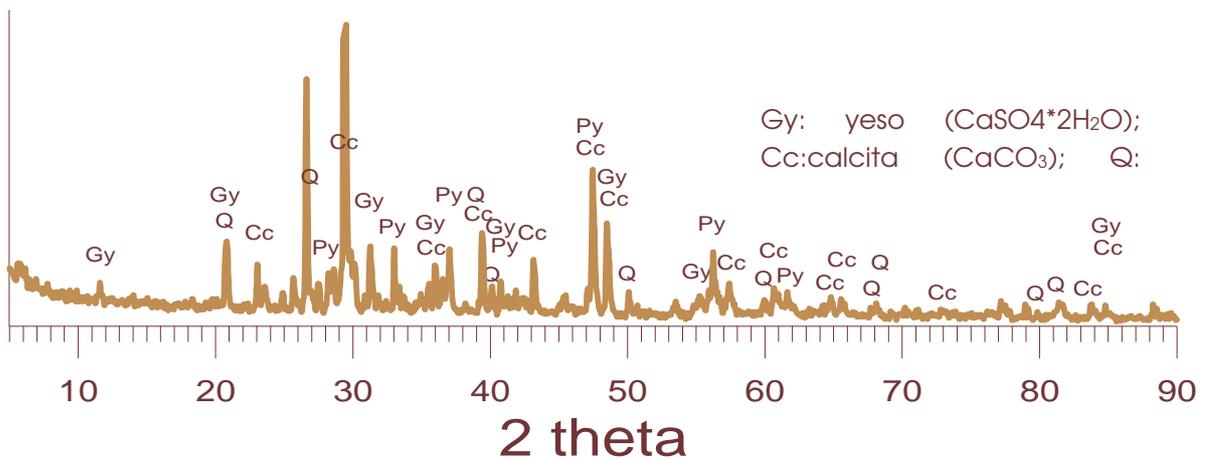


Figura 24. Difractograma representativo de los jales de color café claro de la presa inactiva “2”.

Además de los minerales identificados por DRX, los resultados de microscopía óptica en láminas delgadas pulidas indican la presencia de arsenopirita y minerales secundarios de Fe (Fig. 25 y 26).

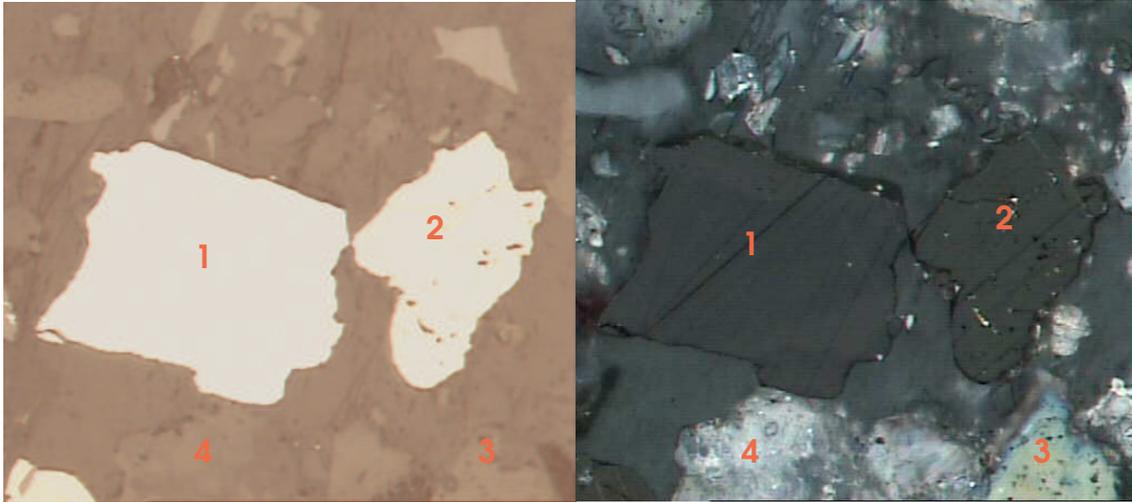


Figura 25. Jales antiguos de color café (muestra JCH- X). Izquierda: Luz paralela fragmentos liberados de cristales de arsenopirita (1), pirita (2) y de minerales transparentes calcita (3) y cuarzo (4). Derecha: Nicoles cruzados; se puede observar el color verde de la anisotropía de la arsenopirita, y las reflexiones internas características de la calcita y el cuarzo.

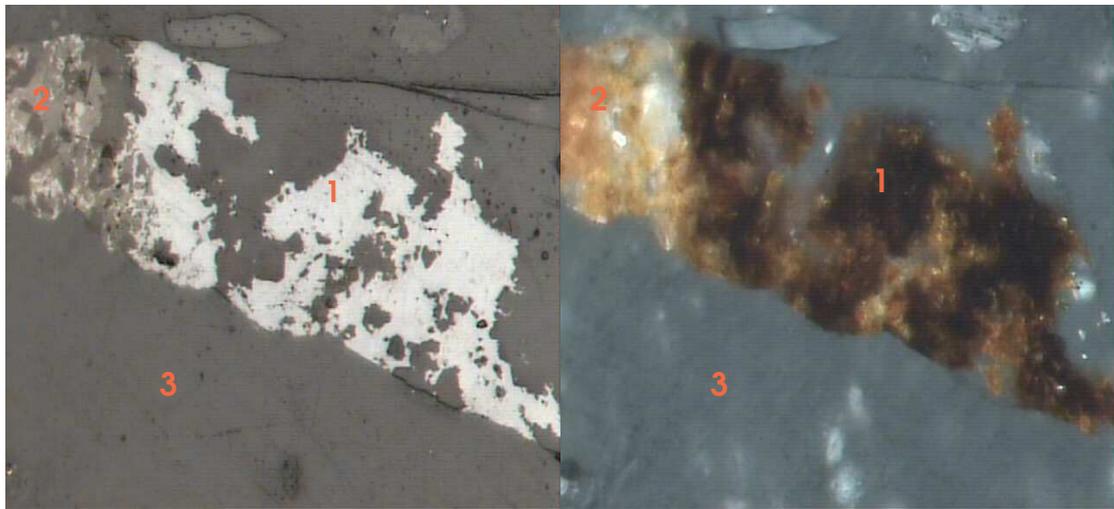


Figura 26. Jales antiguos de color café (muestra JCH- X). Izquierda: Luz paralela partícula mixta de esfalerita (1) y oxihidroxidos de Hierro (2), incluidos en cuarzo (3). Derecha: Nicoles cruzados donde se pueden observar las reflexiones internas de color rojo característico de los oxihidroxidos.

La presencia de arsenopirita (FeAsS) y galena (PbS) explica las relativamente altas concentraciones totales de arsénico (As) y plomo (Pb) en los jales de estudio. Estos elementos son de naturaleza tóxica por lo que son muy importantes desde el punto de vista ambiental, ya que su dispersión al entorno podría representar un riesgo al ambiente.

La identificación de estos minerales que son la fuente de As y Pb (Fig. 27) realizada por microscopía óptica se confirmó a través de los análisis por Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS)

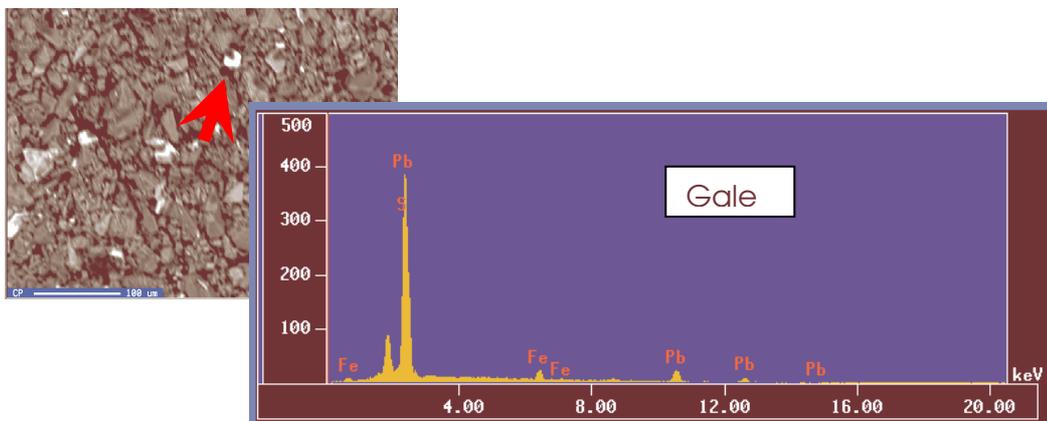
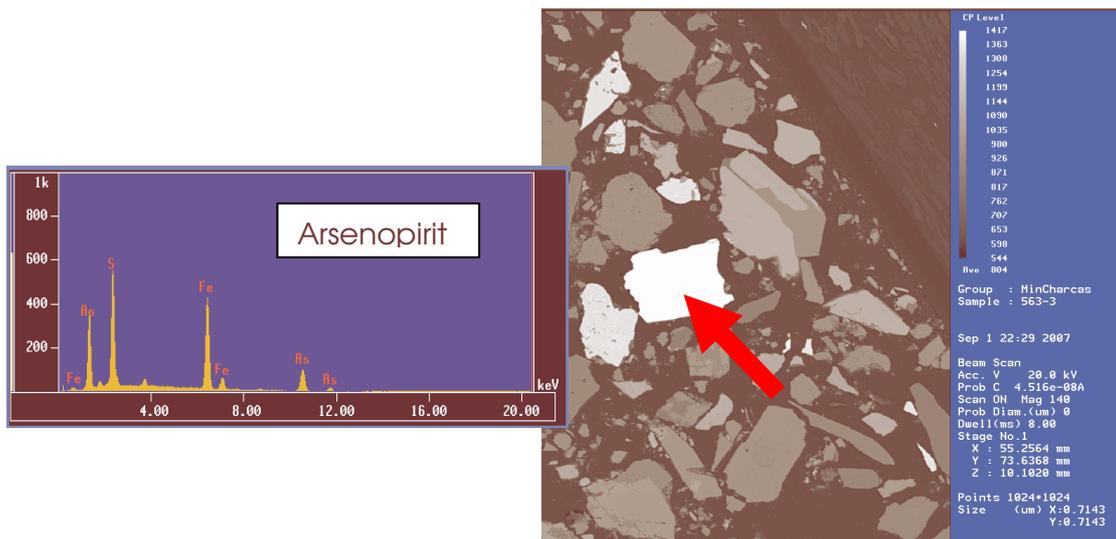


Figura 27. Arsenopirita (FeAsS) y Galena (PbS) identificada por MEB-EDS en la muestra de jales cafés antiguos de la presa inactiva “2”

El hecho de que en estos jales aún existen los minerales primarios (pirita, arsenopirita y calcita) significa que los procesos de oxidación y neutralización no han finalizado y que el grado de oxidación en estos jales no ha sido muy intenso. Sin embargo, es importante destacar que la prueba de balance ácido – base indica que el potencial de neutralización (359 – 515 kg CaCO₃/Ton) en estos jales inalterados es mayor que el potencial de generación de drenaje ácido (56 – 104 kg CaCO₃/Ton), lo que constituye una garantía de que muy probablemente no hay posibilidades que en un futuro los jales la Unidad Minera Charcas puedan generar acidez.

5.3.3 Jales antiguos de color rojo - presa inactiva- “3”

Los resultados del análisis mineralógico general por DRX indican que en los jales oxidados de color rojo de la presa activa “3” predominan los minerales secundarios que se originan durante el proceso de oxidación-neutralización yeso (CaSO₄*2H₂O), jarosita (KFe₃[SO₄]₂(OH)₆) y hematita (Fe₂O₃) (Fig 28) y no se identificaron los minerales primarios como calcita y pirita, lo que significa que se agotaron en los proceso geoquímicos mencionados y que por lo tanto indica un grado de oxidación intenso. Destaca en la mineralogía de estos jales rojos la presencia de wollastonita (CaSiO₃) y celestita (SrSO₄); este ultimo mineral no había sido identificado en los jales de la presa activa “1”, y tampoco en los jales de la presa inactiva “2” .

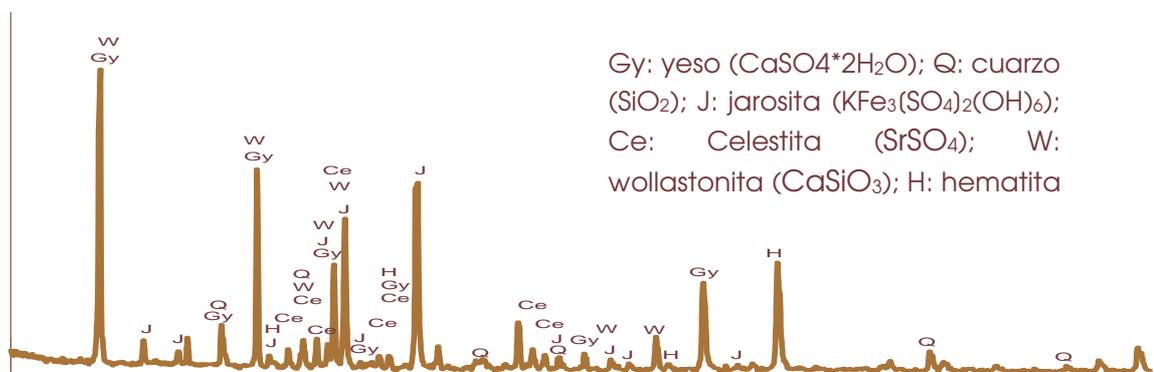




Figura 28. Diffractograma representativos de los jales antiguos de color café- rojizo de la presa inactiva "3".

Además de los minerales identificados por DRX, los resultados de microscopía óptica en láminas delgadas pulidas indican la presencia de oxihidróxidos de Fe y feldespatos alterados (Fig 29 y 30).

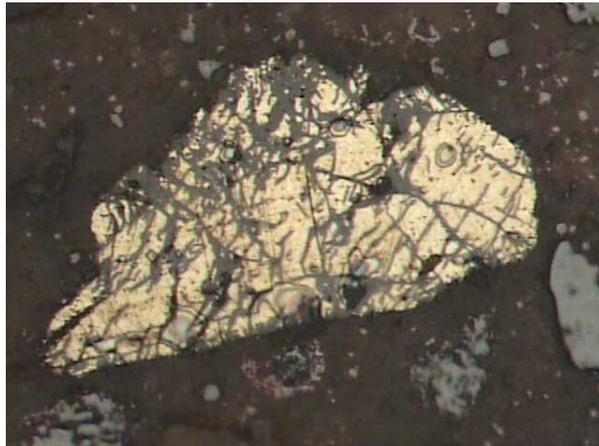


Figura 29. Jales antiguos de color rojo (muestra JCH- VB). Donde se observa una partícula mixta subangulosa de pirita muy fracturada, con remplazamiento parcial por oxihidroxidos de Fe, a través de sus bordes y sobre todo en las fracturas. Fotografía tomada con luz paralela.



Figura 30. Jales antiguos de color rojo (muestra JCH- VB). Campo de la muestra JCH- VB. Fragmento de feldespato alterado parcialmente a minerales arcillosos en sus bordes y fracturas.

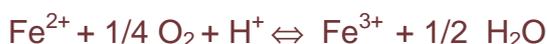
La presencia de wollastonita, que es un mineral alcalino, indica que a pesar de que el grado de oxidación en estos jales es intenso; éstos aún tienen potencial de neutralización. Esta interpretación se verifica con el hecho de que los

resultados de la prueba de balance ácido – base indica que el potencial de neutralización (298 kg CaCO₃/Ton) en estos jales inalterados es mayor que el potencial de generación de drenaje ácido (126 kg CaCO₃/Ton).

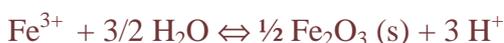
5.4 Procesos geoquímicos identificados en los jales de estudio e importancia de los minerales secundarios que se han formado

La formación de los minerales secundarios identificados en los jales de estudio se puede explicar a través de los siguientes procesos geoquímicos:

1) La oxidación de la pirita (FeS₂) (que fue ampliamente identificada en los jales de estudio) libera acidez (H⁺), sulfatos (SO₄²⁻) y el ion férrico (Fe³⁺) a través de las siguientes reacciones:



2) El Fe³⁺ en presencia de agua precipita en forma de hematita (Fe₂O₃) y otros oxihidróxidos de Fe, a través de las siguientes reacciones:



Estos oxihidróxidos de Fe son los responsables de la coloración café – rojiza en los jales antiguos de la Unidad Minera Charcas y son muy importantes desde el punto de vista ambiental ya que juegan un papel significativo en los procesos de retención de arsénico y metales pesados debido a los fenómenos

de sorción (Goldberg 1986; Fuller et. al. 1993; Bowel 1994; Lin 1997; Foster et al. 1998; McGregor et al. 1998, Romero et al. 2007).

Los análisis por Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS) permitieron identificar que, en los jales de estudio, el arsénico está retenido en partículas de oxihidróxidos de Fe (Fig. 31). Así mismo se identificó, por esta misma técnica, que los oxihidróxidos de Fe están reteniendo Cu, Zn y plomo (Fig. 32), probablemente debido a procesos de sorción.

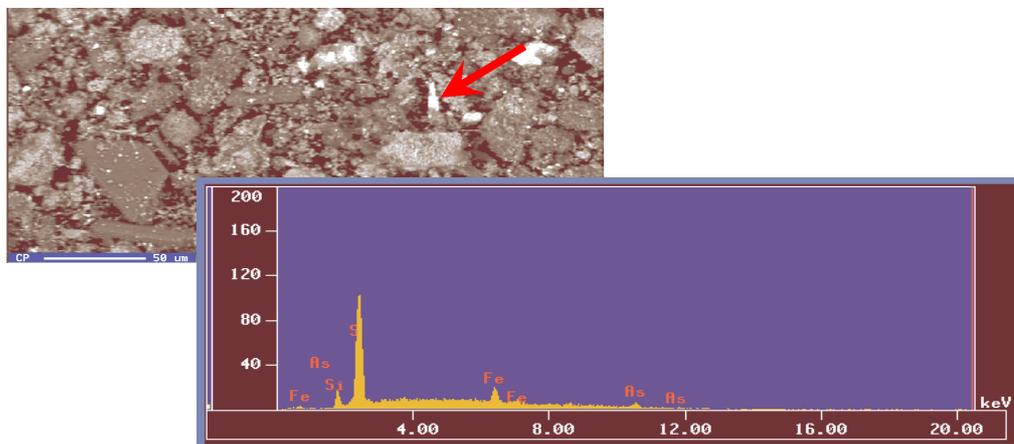


Figura 31. Oxihidróxidos de Fe con trazas de arsénico, retenido por procesos de sorción en jales oxidados de la Unidad Minera Charcas

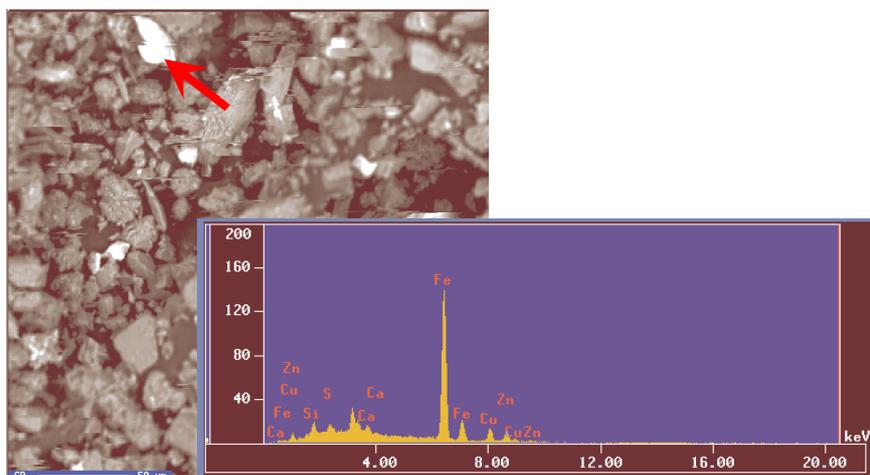


Figura 32. Oxihidróxidos de Fe con trazas de zinc y cobre, retenidos por procesos de sorción en jales oxidados de la Unidad Minera Charcas

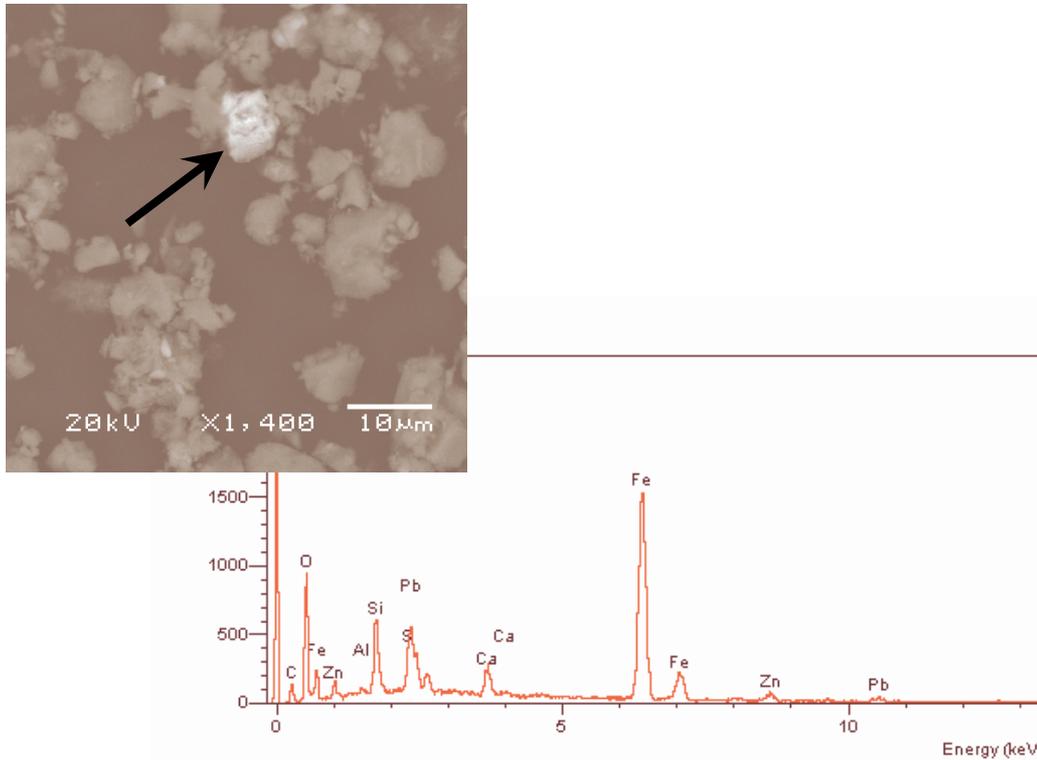


Figura 33. Oxihidróxidos de Fe con trazas de plomo y zinc, retenidos por procesos de sorción en jales oxidados de la Unidad Minera Charcas

3) La disolución de la calcita (CaCO_3) consume la acidez (H^+) liberada por la oxidación de la pirita y produce la liberación de Ca^{2+} , que en presencia de los sulfatos (SO_4^{2-}), también liberados por la oxidación de la pirita, deriva en la precipitación del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a través de la siguiente reacción:



El yeso es mineral indicador de los procesos de oxidación y neutralización que ocurre en los jales. En los jales oxidados de color café y rojo de las presas

inactivas “2” y “3” se identificó la abundante presencia de yeso por DRX y se comprobó por MEB-EDS.

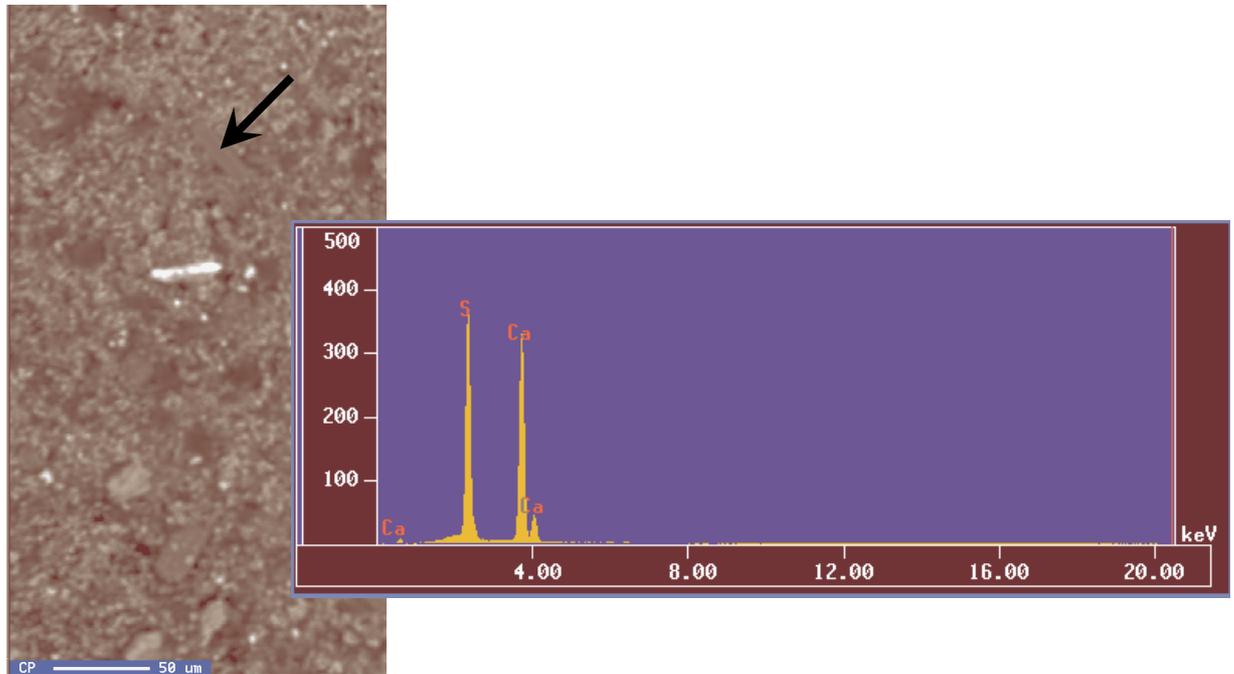
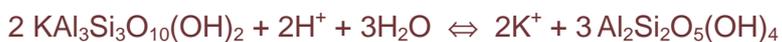


Figura 34. Yeso precipitado en los jales oxidados de la Unidad Minera Charcas

4) La alteración de feldespatos potásicos ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) consume acidez (H^+) y como resultado ocurre la liberación de iones potasio (K^+) a través de la siguiente reacción:



Este fenómeno se pudo comprobar por la identificación de cristales de feldespatos alterados por microscopía óptica en las láminas pulidas de los jales antiguos rojos de la presa inactiva “3” (Fig 30).

Los iones K^+ en presencia de Fe^{3+} y SO_4^{2-} (liberados por la oxidación de la pirita) precipitan como jarosita – K ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) a través de la siguiente reacción:



La jarosita fue identificado pro DRX en la muestras de los oxidados de Charcas. La presencia de la jarosita es importante desde el punto de vista ambiental, ya que es uno de los controles más importantes en la movilidad de metales pesados como Zn y Cu (Lin 1997; McGregor et al. 1998; Romero et. al. 2007).

VI. CONCLUSIONES

6.1 Zonificación de la presa de jales

- Presa activa "1": los jales son de color gris y están visiblemente inalterados. En esta parte de la presa se están descargando los jales que se están generando actualmente.
- Presa inactiva "2": los jales un bajo grado de oxidación y son de color café claro. Tanto los jales del talud como los del vaso están parcialmente cubiertos con material de relleno y con vegetación.
- Presa inactiva "3": los jales están intensamente oxidados y son de color rojo. Sobre la superficie de estos jales oxidados se observan jales grises inalterados que provienen de la presa activa "1".

6.2 Composición química

- En todas las muestras de jales, las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos regulados en la NOM – 141 – SEMARNAT – 2003 como la plata (Ag), bario (Ba) y cromo (Cr) son bajas; y las de mercurio (Hg) y selenio (Se) están por debajo del límite de detección.
- Las concentraciones totales de los otros elementos normados (arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb)) permite diferenciar a los jales oxidados de la presa inactiva "3" de los demás; las concentraciones de As (1493 mg/kg), Cd (1716 mg/kg) y Pb (26824 mg/kg) son mayores que los jales de la presa activa "1" y la presa inactiva "2" (As= 225 – 643 mg/kg, Cd= 33 – 186 mg/kg y Pb= 433 – 1777 mg/kg).

6.3 Composición mineralógica

- Los jales inalterados y grises (presa activa “1”) se caracterizan por el predominio en su composición de minerales primarios tales como: calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), pirita (FeS_2), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS).
- En los jales oxidados de la presa inactiva “2” se identificaron minerales primarios tales como: calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), pirita (FeS_2). Y en menor proporción relativa se identificó yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – principal mineral secundario que se forma debido a procesos de oxidación-neutralización-, lo que indica que los procesos de oxidación – neutralización en estos jales son poco intensos.
- En los jales oxidados de la presa inactiva “3” predominan los minerales secundarios como: yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), $(\text{KFe}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6)$ y hematita (Fe_2O_3), y se identificaron en mucho menor proporción minerales tales como calcita y pirita, lo que significa que estos jales presentan un alto grado de oxidación, destaca en la mineralogía de estos jales la presencia de wollastonita (CaSiO_3), que al ser un mineral alcalino indica que estos jales aún tienen potencial de neutralización.

6.4 Peligrosidad

- Por su capacidad para la generación de drenaje ácido los jales de la Unidad Minera Charcas se clasifican como NO PELIGROSOS ya que no son generadores de acidez.
 - a) En todas las muestras los valores de pH son cercanos al neutro y ligeramente básicos, lo que indica que actualmente no hay generación de acidez.
 - b) Las pruebas de pronóstico de balance ácido- base indican que en estos jales no hay posibilidad de generación de drenaje ácido en el futuro, ya que la relación de potencial de neutralización y potencial de acidez (PN/PA) varía entre 2.4 y 9.3, con un valor promedio de 5.9; lo

que significa que la cantidad de minerales con poder de neutralización es mucho mayor que los minerales con poder de generación de acidez.

- Por su toxicidad los jales de la Unidad Minera Charcas se clasifican como NO PELIGROSOS; ya que las concentraciones solubles de los constituyentes tóxicos son inferiores a las concentraciones máximas permisibles (solubles) que hacen a los jales peligrosos de acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Las muy bajas concentraciones solubles de los EPT se deben a que éstos están en formas de compuestos químicamente muy estables, en los jales grises en forma de sulfuros metálicos y en los jales oxidados están retenidos por procesos de sorción en oxihidróxidos de Fe y arcillas.

RECOMENDACIONES

A pesar de que los jales de la Unidad Minera Charcas no son peligrosos desde el punto de vista de su toxicidad y su capacidad de generación de drenaje ácido; se recomienda dada la naturaleza de dispersión eólica de los mismos, evaluar su el medio abiótico aledaño a la presa de jales, primeramente los suelos, posteriormente el subsuelo y por ultimo las aguas subterráneas.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, G.A., Espinosa, N.I., 2001, Hidrologic risk on Tailings dams design. Seminario: Almacenamiento de Residuos Mineros en México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pp 33 – 38.

Ávila, J.G., 2002, Investigación de Suelos en la Zona Impactada por la Actividad Minera en el Ejido “Emiliano Zapata”, municipio de Charcas, San Luis Potosí. Informe para la Titulación en la Modalidad de Trabajo Profesional. Facultad de Minas, Metalurgia y Geología. Universidad de Guanajuato. pp. 1-16

Armienta, M.A., Rodríguez, R. and Cruz, O. 1997a. Arsenic content in hair of people exposed to natural arsenic polluted groundwater at Zimapán, México, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 59, pp.583–589.

Armienta, M.A., Rodríguez, R., Aguayo, A., Ceniceros, N. and Villaseñor, G. 1997b. Arsenic contamination of groundwater at Zimapán, México, Hydrogeology Journal, Vol. 5, pp.39–46.

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. Environmental Geology, Vol 40(4-5), pp. 571-581.

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. Journal of Contaminant Hydrology, Vol 41(1-2), pp. 23-47.

Barrera, M.O., 2001, Geoquímica de Metales Pesados en los Jales El Fraile Municipio de Taxco. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica. UNAM. pp. 59

Blowes, D. W., C.J. Ptacek, J. Jurjover, 2003, Mill Tailings: Hidrogeology and Geochemistry in Enviromental Aspects of Mine Waste, Ed. J.L. Jambor, D.W. Blowes and A.I.M. Ritche, Short Course Series, Vol. 31, Mineralogical Association of Canada, Vancouver British Columbia, Series Editor Robert Raeside, pp. 96 – 116.

Bowell, R.J. 1994. Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. *Applied Geochemistry*, Vol. 9, pp.279–286.

Carrillo, A. and Drever, J.I., 1998a. Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio – El Triunfo mining area, Baja California, México. *Environmental Geology*, Vol. 35, pp.251–257.

Comisión Nacional del Agua. 2007. www.cna.gob.mx

Costello, C., 2003. Acid mine drainage: Innovative treatment technologies. Washington. D.C., United States Environmental Protection Agency, Technology Innovation Office, pp. 52.

Cruz, P. M. J., 1987, Resultados Actuales en la Evaluación Geológica Minera de la Reserva Minera Nacional Charcas, Municipio de Charcas, San Luis Potosí, Informe Técnico, COREMI, pp. 1- 17

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

Faure, G. 1980. Principles and applications of Inorganic Geochemistry. Macmillan Publishing Company, Canada.

Foster, A.L., Brown Jr., G.E., Tingle, T.N. and Parks, G.A. 1998. Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. *American Mineralogist*. Vol. 83, pp. 553–568.

Fuller CC, Davis JA, Waychunas GA (1993) Surface chemistry of ferrihydrite: Part2. Kinetics of arsenate adsorption and coprecipitation. *Geochim Cosmochim Acta* 57:2271-2282.

Goldberg, S. 1986. Chemical modeling of arsenate adsorption on aluminium and iron oxide minerals. *Soil Sci Soc Am J* 50:1154 -1157

Gómez-Arroyo, S., Armienta, M.A., Cortés-Eslava, J. and Villalobos-Pietrini, R. 1997. Sister chromatid exchanges in *Vicia Faba* induced by arsenic-

contaminated drinking water from Zimapan, Hidalgo, Mexico. Mut. Res., Vol. 394, pp.1–7.

Gutiérrez, M.R., Romero, F.M., González, G.H., 2007. Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol 24, Núm. 2. pp. 170-184.

Industrial Minera México. S.A (IMMSA), 2007. La aplicación de Técnicas como Guía para la Incrementación de Nuevos Cuerpos en el Distrito Minero de Charcas. S.L.P.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1978. Carta Geológica “Charcas”, Escala 1:50 000.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1978. Carta Edafológica “Charcas”, Escala 1:50 000.

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005, Enciclopedia de los Municipios de México, Charcas, Gobierno del estado de San Luis Potosí. pp. 1-21

Jambor, J.L and D. W. Blowes, 1994, Short Course Handbook in Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Wastes, Mineralogical Association of Canada, Chapter 3,4,9 y 10, pp. 58 -292.

Jambor J.L, 2003, Mine- Waste Mineralogy and Mineralogical Perspectives of Acid- Base Accounting, in Environmental Aspects of Mine Waste, Ed J. L. Jambor, D.W.Blowes and A.I.M. Rutchie, Short Course Series, Vol. 31, Mineralogical Association of Canada, Vancouver British Columbia, Series Editor Robert Raeside, pp. 117 - 146.

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. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 41, pp. 49–80.

Jung, M.C., 2001. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Applied Geochemistry*. 16(11-12), pp 1369-1375.

Jurgeit, M., 2005, Geology and Minerals from the Zn-Pb-Cu-Ag Mine of Charcas, San Luis Potosi, Mexico, *Mineralien Welt, Boletín* 5, pp. 54- 62

Lawrence, R.W., 1990, Prediction of the behaviour of mining and processing wastes in the environment, in *Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Waste. Proceedings*, May 30- June 1, Berkeley, California. Littleton, Colorado, USA, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers and Society for Mining Metallurgy and Exploration, Inc., pp. 115-121.

Lawrence RW, Wang Y.1997. Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage, In: *Fourth International Conference on acid rock drainage*. Vancouver, BC. Canada

Lin, Z., 1997, Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. *Science of the Total Environment*, 198(1), pp 13-31.

McGregor, R.G., Blowes, D.W., Jambor, J.L. and Robertson, W.D. 1998. The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canada. *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol. 33, pp. 247–271.

Megaw P. K., Ruiz J. R., Titley S.R., 1988, High Temperature, Carbonate - Hosted Ag- Pb-Zn (Cu) Deposits of Northern Mexico, *Economic Geology*. 83, pp. 1856- 1885

Méndez, R. M., 2001. Fraccionamiento de Arsénico en Jales de Zimapán, Hidalgo, Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica, UNAM, pp. 64.

Méndez, M. C., and Armienta M. A., 2003, Arsenic Phase Distribution in Zimapan Mine Tailings, México, *Geofísica Internacional*, Vol. 42, Num. 1, pp.131 - 140.

Mendoza, E.A., Armienta, M.A., Ayora, C., Soler, A., Ramos, E.R. 2006. Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol 23. Núm 1, pp. 75- 83.

Moncour, M.C., C.J. Ptacek, D. W. Blowes and J.L Jambor, 2005, Release, Transport and Attenuation of Metals Form and Old Tailings Impoundment, *Applied Geochemistry*, Vol. 20, Num. 3, pp. 639 – 659

Moreira, F. R., 1985, Estudio Geologico- Minero de semidetalle – detalle del prospecto el pájaro municipio de Charcas, San Luis Potosí, Informe Técnico, COREMI, pp. 1-32.

Nieto, A.F., Alaniz, S.A., Camprubi, A., La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario*. Tomo LVII, Núm. 3, 2005, pp. 285-318

Nordstrom D.K. 1982, Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Minerals. In: Kittrick, A., Fanning, D.S., Hossner, L.R (Eds) *Acid Sulphate Weathering*, *Soild Sci. Soc. Am Spec. Pub.* 10, pp. 37- 56.

Pedraza, M.J. F., 1994, Sinopsis Histórica del municipio de Charcas del Estado de San Luis Potosí, Centro de Desarrollo Municipal, pp. 1-14

Ramos, Y. R. A. 2004, Caracterización Geoquímica de Depósitos de Jales del Distrito de Guanajuato. Tesis de Doctorado. Instituto de Geología, UNAM, pp. 221.

Ramos, Y. R. A., Siebe, C. D. G., 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 23, Núm. 1. pp. 54- 74

Ramírez, E.R., 2001. Tailings Dams in Mexico. Seminario: Almacenamiento de Residuos Mineros en México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pp 111- 114.

Ramírez, M.R., 2001. Geotechnical risk in Stability of Tailing Dams. Seminario: Almacenamiento de Residuos Mineros en México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pp 39-66.

Robertson, W.D. 1994. 'The physical hydrology of mill-tailings impoundments', in Blowes, D.W. and Jambor, J.L. (Eds.): *The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*, Mineralogical Association of Canada, Nepean, pp.1–17.

Romero, F. M., 2004, Procesos Geoquímicos que Controlan la Movilidad de Metales y Metaloides en Jales de Sulfuros Metálicos: "El Fraile", Taxco-Guerreo, Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM, pp.155

Romero, F.M; Armienta, M.A; González, G.H., 2007. Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry*. 22. pp109-127.

Romero, F.M., Armienta, M.A., Villaseñor, M.G., González, J.L., 2006, Mineralogical constraints on the mobility of arsenic in tailings from Zimapán, Hidalgo, México. *International Journal of Environment and Pollution*, Vol 26 (1/2/3), pp. 23-40

Rose A. W., Herbert E. H. and John S. W., 1190, *Geochemistry in Mineral Exploration*, Academic Press.

Roussel, C., Néel, C. and Bril, H. 2000. Minerals controlling arsenic and lead solubility in an abandoned gold mine tailings. *The Science of the Total Environment*. 263, pp.209–219.

Salas G. M, 1988, Geología Económica de México. Fondo de Cultura Económica, México, pp. 361- 368.

Seal, Robert R. II and Jane M. Hammarstrom, 2003. Geoenvironmental Models of Mineral Deposits: Examples From Massive Sulfide and Gold Deposits in Environmental Aspects of Mine Waste, Ed J. L. Jambor, D.W.Blowes and A.I.M. Rutchie, Short Course Series, Vol. 31, Mineralogical Association of Canada, Vancouver British Columbia, Series Editor Robert Raeside, pp.11 – 50

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2004, Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y pos-operación de presas de jales. México, D.F., Diario Oficial de la Federación.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2005. Norma Oficial Mexicana NOM-052-2005, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993. México.

Tristan, G.M., Torres, H. J.R., 1994, Geología de la Sierra de Charcas, Estado de San Luis Potosí, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol 11, Num 2, pp. 117 – 138.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). 1994. Method 3051: Microwave assisted acid digestion/sludges, soils, *in* SW- 846, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods: United States Environmental Protection Agency, pp. 5.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). 1995. Method 9045C: Solid and waste pH, *in* SW-846, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods: United States Environmental Protection Agency, pp. 5.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). 1995. Method 1312. Synthetic Precipitation Leaching Procedures. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods: United States Environmental Protection Agency, pp 5.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). 1996. Method 6010b: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, SW-846.. United States Environmental Protection Agency, pp 5.

Vaughan, D. J., Wogelius R. A., 2000, Environmental Mineralogy, European Mineralogical Union Notes in Mineralogy, Vol 2, pp 255- 284.

Zaragoza, M. A., 2001, Mineralogía Comparativa de tres presas de jales en Zimapán Hidalgo, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. pp 43.