



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Procesos de atenuación natural que
disminuyen los peligros de los jales
inactivos de las presas Los Remedios y
Hacienda de Atlistac en Tehuilotepic,
Guerrero**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Leonardo Minchaca Arreola

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Francisco Martín Romero



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

AGRADECIMIENTOS

¿Podría generar una serie de agradecimientos repletos de sentimentalismo?

Claro que soy capaz de hacerlo, sin embargo la carencia de sarcasmo y bromas en ello romperían con mi esencia, y a pesar que son los agradecimientos de una Tesis, los cuales teóricamente deben ser serios, considero indispensable y conveniente usarlos para expresar mi gratitud con ese estilo que me ha caracterizado por algunos años.

En primer lugar debo agradecer a esos dos personajes que me han mantenido a pesar de mi actitud zángana, que han creído en mí y que han inflado ligeramente mi ego en el transcurrir de los años, mis padres.

- Gracias José Ramón Minchaca Campos por preocuparte en mis momentos de desvelo, aguantar mis exaltaciones, por darme esos consejos que aceptaba parcialmente por que como sabes la terquedad fluye por mis venas, gracias por tu sonrisa, tus caras ridículas, tu cariño y tu paciencia.
- A Cristina Arreola Maya, agradezco ese apoyo en el transcurso de mi vida escolar, tus desvelos a mi lado porque “al niño se le olvido que la maqueta era para mañana”, gracias por ser súper mamá por mucho tiempo aunque después saliera el reclamo con toques de mártir; te doy las gracias por tu sinceridad, por saber escuchar, por las horas que te preocupaste en educarme, darme soporte y ese amor incondicional.

También agradezco a mis hermanos por imposición, quise decir de sangre Eduardo y Gerardo Minchaca, quienes gracias a su forma de ser me han ayudado a forjarme un carácter peculiar y han sido un impulso importante en mi titulación, ya que sin su continuo acoso y burlas no me hubiese motivado para concluir este trabajo con el propósito parcial que dejasen de fastidiar; además agradezco su confianza, aunque sabemos que entre nosotros no la expresamos tan abiertamente.

En un tono más solemne agradezco ampliamente a mis profesores de la Facultad de Ingeniería por haberme brindado una educación de excelencia y por ser parte fundamental de mi formación como profesional.

Mi eterna gratitud a mi asesor el Dr. Francisco Martín Romero y a la Dra. Rosa María Prol Ledesma por su gran apoyo, consejos, paciencia, tiempo y corajes invertidos en la realización de este trabajo.

Muchas gracias a mis sinodales, M. I. José E. Santos Jallath, M. Guadalupe Ordaz y al M. C. José de Jesús Huevo Casillas, por su tiempo y valiosas observaciones para la correcta realización de este trabajo. A la Dra. Teresa Pi Puig por la ayuda en los análisis de Difracción de Rayos X y al personal del laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, en especial a la QFB y amiga Fabiola Vega García por el apoyo en la realización de análisis de ICP y Cromatografía.

En el transcurso de estos años de Educación superior he conocido a mucha gente que ha influido en mi vida a ellos les otorgo una especial mención ya que se han convertido en mi familia por elección, gratitud eterna a:

- La banda pesada: Ricardo Hernández (Picardin), German Soto (Germen), Yair Morales (Chachis), Juan Morales (Juana), Humberto (Joules), Arturo Acosta (R2), Andrés Salinas (Toallin), Niuni (Niunilda), Manuel (Mago), Edgar (Chente), Jorge Cirio (Play) y Arely. Quienes me enseñaron la diferencia entre amigos briagos y familia etflica por selección, con quienes hay tantas memorias que no las recuerdo todas (un castigo-premio por tanta parranda), con quienes aprendí que un amigo-hermano no es el que te cuida es el que te “carga más pila” con lo que te duele, a fin de cuentas lo toleras porque confías ampliamente en él.
- La banda minera que devino en “la vieja guardia”: Manuel Becerril (Becerro), Francisco Samperio (El bien peinado), Paola Burguete, David Ruiz (Barbas), Israel (Newman), Lewis Maldonado (Sr. Louis), Elías Granados (Tropicú-Primitivo), Crescencio Martínez (Chencho-Perro del mal), Viridiana Herrera, Luis Chacón, Sayuri y Crisóforo (El famosísimo Choforo). Con quien compartí el amor por la minería, estudios, aprendizaje,

molestias, burlas y tributo al dios Baco en prácticas, playa y en la Ciudad aunque no siempre terminábamos de la manera más decorosa posible.

- Los Inge-babies: Cesar Cortés (Es-coria), Elías (Coruco), Alejandro Roman (Guácaras), Luis Madrigal (Rock), Ian Cervantes (Miñero), Alejandro Santos (Tonny), Rocío López, Samuel (Samo-Sinclair), Aquiles (Para que poner apodo), Marco Bautista (Rufo), David (Pibe) y José Fernández (Botitas). Ellos que maldicen el día que me conocieron pero que me aprecian aunque sea en secreto.
- La banda de Geociencias: Cristina, José Luis, Orlando, Luis Justo, Diana Calipse, Diana Acevedo y Sandra Briceño. Quienes fingían enseñarme Geología y un poco de Geofísica mientras que yo simulaba que la aprendía.
- La banda roja: Ana Laura, Orestes, Itzel, Eduardo, Alejandra, Luna, Carmen, Daniel, Adrián, Esmeralda y Jesús. Quienes me enseñaron que la ingeniería es del pueblo y para el pueblo, además de mostrarme un lado social de esta carrera y un camino hippie-autónomo de la vida.
- A todos esos amigos, familiares y cuates que han compartido conmigo estos instantes de vida universitaria, en particular a la Sra. Mónica y al Sr. Rogelio que me han apoyado notablemente a pesar de las dudas justificadas y a Avril quien me animo a continuar con este trabajo

Para terminar podría citar a algunos de esos grandes autores que saben expresar con unas cuantas palabras el ajiaco de emociones que invaden al ser humano, pero para que hacerlo, mejor solo concluir con un “Que chévere ha estado este viaje” y aun nos faltan muchas cosas por hacer, disfrutar y experimentar.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	4
II. JALES DE ESTUDIO: REMEDIOS Y HACIENDA DE ATLISTAC	7
2.1 LOCALIZACIÓN	7
2.2 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS E HISTÓRICAS DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO.	11
2.2.1 <i>Fisiografía del Distrito Minero de Taxco.....</i>	<i>11</i>
2.2.2 <i>Aspectos históricos del Distrito Minero de Taxco (DMT).....</i>	<i>11</i>
2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO-MINERO DEL DISTRITO MINERO DE TAXCO (DMT).....	13
2.3.2 <i>Síntesis Geológica</i>	<i>13</i>
2.3.3 <i>Características de los Depósitos Minerales del DMT.....</i>	<i>14</i>
2.4 ESTUDIOS AMBIÉNTALES DE RESIDUOS MINEROS EN EL DISTRITO MINERO DE TAXCO.....	15
III. ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN EL CAMPO DE ESTUDIO DE JALES MINEROS	19
3.1 PROCESOS GEOQUÍMICOS QUE OCURREN EN LOS DEPÓSITOS DE JALES DE SULFUROS METÁLICOS.....	19
3.1.1 <i>Oxidación Sulfuros Metálicos</i>	<i>19</i>
3.1.2 <i>Neutralización</i>	<i>21</i>
3.1.3 <i>Etapas del desarrollo del Drenaje Ácido (DA)</i>	<i>23</i>
3.1.4 <i>Precipitación y sorción de EPT liberados durante la oxidación de los sulfuros metálicos.</i>	<i>24</i>
3.2 PRUEBAS UTILIZADAS PARA VALORAR Y PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE LOS JALES CON RELACIÓN AL PELIGRO POTENCIAL QUE REPRESENTAN PARA EL AMBIENTE.....	26
3.2.1 <i>Pruebas de extracción.....</i>	<i>26</i>
3.2.2 <i>Pruebas estáticas.....</i>	<i>26</i>
3.3 PELIGROSIDAD DE JALES CON BASE EN LA NORMATIVIDAD MEXICANA	28
3.3.1 <i>Pruebas para determinar la peligrosidad en presas de jales activas o que se planea construir</i>	<i>29</i>
3.3.2 <i>Pruebas para determinar la peligrosidad en presas de jales inactivos y oxidados (abandonados)</i>	<i>30</i>
IV. METODOLOGÍA: ACTIVIDADES DE CAMPO Y PRUEBAS DE LABORATORIO.....	31
4.1 MUESTREO	31
4.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	36
4.2.1 <i>Determinación de parámetros generales (pH y Conductividad).....</i>	<i>36</i>
4.2.2 <i>Concentraciones Totales de Elementos Mayores (EM) y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT).....</i>	<i>36</i>
4.2.3 <i>Geodisponibilidad de EPT y EM en lixiviados artificiales.....</i>	<i>37</i>
4.2.4 <i>Evaluación de la Capacidad de generación de Drenaje Ácido (DA).....</i>	<i>38</i>
4.2.5 <i>Análisis mineralógico de los residuos por Difracción de Rayos X (DRX).....</i>	<i>38</i>
4.2.6 <i>Análisis de fases sólidas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....</i>	<i>38</i>
V. RESULTADOS.....	40
5.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS JALES HACIENDA DE ATLISTAC Y REMEDIOS.....	40
5.1.1 <i>Jales del depósito Atlistac</i>	<i>40</i>
5.1.2 <i>Jales del depósito Los Remedios</i>	<i>41</i>
5.1.3 <i>Comparación de los valores de pH y CE entre los jales estudiados y jales de otros depósitos estudiados</i>	<i>41</i>
5.2 CONCENTRACIONES TOTALES DE LOS ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (EPT).....	44
5.2.1 <i>Presa Hacienda de Atlistac</i>	<i>44</i>
5.2.2 <i>Presa de Los Remedios</i>	<i>53</i>
5.3 CONCENTRACIÓN GEODISPONIBLE DE EPT ASOCIADOS A LOS SULFUROS METÁLICOS.....	61

5.4 CÁLCULO DEL POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN NETO (PNN) EN LOS JALES NEUTROS DE LOS DEPÓSITOS DE HACIENDA DE ATLISTAC Y LOS REMEDIOS.....	64
5.5 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS JALES DE LOS DEPÓSITOS ATLISTAC Y LOS REMEDIOS.	64
5.6 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO ACOPLADA CON ESPECTROMETRÍA DE RAYOS X POR ENERGÍA DISPERSA (MEB-EDS).....	68
5.6.1 <i>Jales del depósito Atlistac</i>	68
5.6.2 <i>Jales del depósito de Remedios</i>	80
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	90
BIBLIOGRAFÍA.....	92

RESUMEN

En el transcurso de este trabajo de Tesis se efectuaron una serie de estudios geoquímicos y mineralógicos de dos depósitos de jales muy antiguos, en el Distrito Minero de Taxco. El depósito de jales “Atlistac” estuvo en operación entre mediados del siglo XVIII y principios del siglo XIX, y el depósito “Los Remedios” estuvo en funcionamiento durante la primera mitad del siglo XX.

El Distrito Minero de Taxco se caracteriza por poseer yacimientos minerales de tipo veta, skarn, relleno de cavidades, mantos y brechas. La mineralización de estos yacimientos es Au, Ag, Pb, Zn y Cu (SGM, 2011). Según estudios realizados por Industrial Minera México en 1997 los metales explotados provienen de las rocas vulcanosedimentarias pre-cretácicas (Esquisto Taxco/Rocaverde Taxco Viejo), en las cuales se encontraban diseminados los metales que fueron lixiviados por fluidos hidrotermales de temperaturas oscilantes entre 220 y 260 °C.

La larga historia de explotación minera en Taxco, que según documentos históricos inició 1522, derivó en la generación residuos de granulometría fina denominados “jales”, depositados en varias presas inactivas; que se localizan en las riberas de los ríos Cacalotenango y Taxco

De acuerdo a información pública, entre los depósitos de jales más estudiados en Taxco han sido los denominados “El Fraile”, “Guerrero” “Foster”, “La Concha”, “La Guadalupana” y “Pedregal”. Los primeros tres depósitos estuvieron en operación entre 1950 y 1975; mientras que de los otros tres no hay información al respecto; pero se cree que son más antiguos; dado el avanzado estado de erosión hídrica en “La Concha” y “La Guadalupana” y la presencia de infraestructura deportiva en el “El Pedregal”.

No hay información de que los dos depósitos más antiguos de la región de Taxco hayan sido estudiados; por lo que se realizó la siguiente investigación en los jales de estos depósitos antiguos, para lo cual se realizó el muestreo de estos jales. En el caso del depósito “Atlistac” se colectaron 26 muestras mientras que “Los Remedios” se recolectaron 33 muestras entre muestras superficiales y de cuatro perfiles.

En los depósitos estudiados hay jales que, al interactuar con el agua de lluvia, pueden ser generadores de drenaje ácido y jales que pueden producir drenaje neutro. Esta afirmación se base en los resultados de pH y conductividad eléctrica (CE) determinados en los jales de estudio. El pH de los jales de “Atlistac” varía entre 3.0 y 8.0 con una CE entre 1.0 y 3.0 (mS), mientras que los jales del depósito de los Remedios tiene un pH entre 2.0 y 7.0, con valores de CE entre 1.0 y 11.0 (mS). Estos comportamientos no se diferencian sustancialmente de lo que ha sido reportado en jales oxidados más recientes como los de “El Fraile”, “Guerrero” y “Foster”, lo que probablemente se deba a: (i) la heterogeneidad de los yacimientos explotados y (ii) la formación de capas de minerales secundarios que gobiernan la migración de los agentes oxidantes en el sentido vertical de los depósitos de jales, y que además determinan la movilidad de los diferentes constituyentes en los jales.

Los jales de “Atlistac” se caracterizan por las respectivamente altas concentraciones de EPT, que varían entre 2873.96-6791.94 ppm para Pb, 326.81-606.45 ppm para As, 116.11-398.47 ppm para Cu, 11.35-17.51 % para Fe y 5162.9-14261.98 ppm para Zn. En los jales del depósito “Los Remedios” se determinaron concentraciones totales de Pb que oscilan entre 2411.66 y 13313.95 ppm, de As entre 660.75 y 1280.50 ppm, de Cu entre 142.6 y 539.81 ppm, de Fe entre 13.95 y 29.86 % y de Zn entre 671.85 y 4071.83 ppm.

Es notable el menor contenido de las concentraciones promedio de As; pero mayor contenido de Fe en los jales de los depósitos más antiguos, que son objeto de este estudio, con relación a lo reportado en los jales más recientes de “El Fraile”, “Guerrero” y “Foster”.

Las mayores concentraciones geo-disponibles de los EPT de interés se determinaron en los jales ácidos, lo que permite concluir que el drenaje ácido que se pueda formar en estos jales se caracterizaría por la presencia de estos contaminantes en forma soluble. Sin embargo, en muestras de jales, prácticamente neutros, se determinaron valores relativamente altos de concentración geodisponible de Zn y Cd, lo que permite concluir que el drenaje neutro, que pudiera generar, se caracterizaría por la presencia de estos metales, lo que podría representar un riesgo para el ambiente.

En los jales con valores de pH prácticamente neutro se realizó la prueba de balance ácido-base con el fin de valorar su potencial para generar drenaje ácido a futuro. Los resultados indican

que los jales neutros de “Atlistac”, si podrían generar acidez en el futuro, ya que los valores del potencial de acidez (PA) son mayores que el potencial de neutralización (PN) y lo tanto la relación PN/PA para los jales de “Atlistac” varían entre 0 y 0.87 con una media de 0.08ⁱ. Por otro lado, valores de PN/PA de 1.46 en la única muestra con un pH neutro del depósito Los Remedios, indica que no serán generadores de acidez.

Los análisis mineralógicos por DRX y el microanálisis por MEB-EDS indican la presencia de Jarosita, con trazas de Pb y Zn, lo que permite especular que este mineral secundario de Fe es un control eficiente de la movilidad del plomo. Por MEB-EDS se identificaron partículas Zn-Cu, lo que permite inferir la presencia de oxi-hidróxidos de Zn y Cu y por lo tanto especular acerca de la precipitación de oxi-hidróxidos de Zn y Cu como un mecanismo de control de la movilidad de estos metales pesados.

Finalmente, es importante resaltar la presencia de fluorita en algunas muestras; y trazas de Mo y Mn asociados a los minerales secundarios de Fe, lo que indica que en estudios futuros es necesario incluir el análisis de fluoruros, manganeso y molibdeno, aunque no estén regulados en la normatividad ambiental mexicana.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las tantas definiciones de economía es la de orientación subjetivista de Lionel Robbins quien afirma que: *“La economía es la ciencia que se encarga del estudio de la satisfacción de las necesidades humanas mediante bienes que, siendo escasos, tienen usos alternativos entre los cuales hay que optar”* (Robbins, 1932).

Algunos de esos bienes escasos los podemos encontrar en minería, tal es el caso del oro, plata, cobre, zinc, plomo, etc. Sin embargo, la obtención de estos metales ha derivado en la generación de residuos cuyo manejo inadecuado ha derivado en problemas ambientales severos.

Estos residuos mineros generalmente contienen cantidades variables de pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$) y arsenopirita (FeAsS); y cantidades residuales de galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2). Estos minerales son la principal fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, entre otros (Romero y Gutiérrez-Ruíz, 2010).

Uno de los problemas ambientales más relevantes de los residuos mineros está asociado a la generación del denominado drenaje ácido de minas (DAM) que consiste en lixiviados ácidos ($\text{pH} < 3$) con elevadas concentraciones de sulfatos y, generalmente, enriquecidos en metales y metaloides en forma de iones disueltos (Corrales-Pérez y Romero, 2013, Romero et al., 2007; Dold, 2014).

La dispersión del DAM puede tener un impacto negativo y significativo en la calidad del agua, sedimentos y suelos (Balistrieri et al., 2008, Romero y Gutiérrez-Ruíz, 2010; Romero et al., 2007). Sin embargo, la generación del DAM está condicionada por la conjugación de la presencia de minerales productores de acidez (sulfuros metálicos, principalmente pirita) y minerales neutralizadores (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos) y el tiempo de exposición a los agentes del intemperismo (agua y aire) y condiciones climáticas (Romero et al., 2008; Romero y Gutiérrez-Ruíz, 2010; Lottermost, 2010).

Cuando los minerales neutralizadores consumen toda la acidez generada por la oxidación de los sulfuros metálicos, los lixiviados que drenen del depósito de residuos tendrán un pH cercano al neutro. Sin embargo, cuando la cantidad de minerales neutralizadores es menor que la cantidad de minerales que generan DAM, no es posible el consumo de toda la acidez producida, y los lixiviados que drenen del depósito de jales serán ácidos y enriquecidos, generalmente, en metales pesados y arsénico.

Producto de los procesos de oxidación de los sulfuros metálicos, principalmente pirita -y la subsecuente generación de acidez-, y la neutralización, se promueve la precipitación de minerales secundarios.

Entre los principales minerales secundarios reportados en estos ambientes (Roussel et al, 2000; Hammarstrometal, 2005;ValenteyLealGomes, 2009) se incluyen: oxihidróxidos de Fe (goetita, lepidocrocita, akaganeita, maghemita y ferrihidrita), hidroxisulfatos (jarosita, plumbojarosita, beudantite y argentojarosite), sulfatos (yeso, barita, anglesita, basanita, melanterita, goslarita, hexahidrita, siderotil, rozenite y copiapita), carbonatos (cerusita, smithsonita), arseniatos (escorodita) y minerales de arcilla (caolinita, esmectita etc.). Entre estos grupos de minerales, los sulfatos, oxihidróxidos de Fe e y hidroxisulfatos merecen especial atención debido a su comportamiento geoquímico.

Los minerales del grupo de los sulfatos son un control eficiente de la acidez y de la retención de los contaminantes durante los períodos secos (Seal II et al., 2002), aunque, debido a su alta solubilidad, se disuelven fácilmente durante las épocas de lluvia con la subsecuente liberación de protones (acidez) y metales al entorno. Sin embargo, los minerales secundarios asociados a los oxihidróxidos de Fe e hidroxisulfatos juegan un papel importante en la retención del arsénico y metales pesados y son considerados como las principales fases sólidas que controlan la movilidad de los elementos potencialmente (EPT) en jales mineros (Dold y Fontboté., 2001; Levy et al, 1997; Moncur et al, 2005). La estabilidad de estos minerales aumenta con el tiempo, por lo que se presume que a medida que aumenta el tiempo de exposición de los jales, disminuye el riesgo de dispersión de los EPT asociados.

Se puede afirmar que además de la composición mineralógica y química de los residuos mineros, y de las condiciones climáticas; el tiempo de exposición de los mismos a los agentes del

intemperismo (agua y aire) juega un papel fundamental en la ocurrencia e intensidad de los fenómenos geoquímicos (oxidación, neutralización, disolución, precipitación y sorción) que determinan la generación de drenaje ácido que es la medida de su peligrosidad al entorno.

La presente investigación tiene como objeto los dos depósitos de residuos mineros más antiguos del distrito minero de Taxco (generados entre 1750 y 1810), y que a la fecha no han sido estudiados, con el fin de valorar su peligrosidad y estudiar los procesos geoquímicos que gobiernan la liberación y retención de los elementos potencialmente tóxicos y compararlos con los que ocurren en los depósitos de residuos mineros inactivos, que han tenido menos tiempo de interacción con los agentes del intemperismo y que han sido estudiados intensamente por diferentes autores como son los residuos asociados a los depósitos de jales El Fraile, La Concha, Guerrero y Foster, que fueron generados entre 1940 a 1976, aproximadamente (Armienta et al., 2003; Armienta et al., 2004; Talavera-Mendoza et al., 2005; Talavera Mendoza et al., 2006; Romero et al., 2007; Romero et al., 2008).

II. JALES DE ESTUDIO: REMEDIOS Y HACIENDA DE ATLISTAC

2.1 Localización

Los residuos mineros que son objeto de este estudio corresponden a jales de las zonas de Remedios y de la hacienda Atlistac; que se encuentran a unos 4.0 Km y 4.5 Km al SE, respectivamente, de la cabeza municipal Taxco de Alarcón (Figura 1.1).

Estos depósito de jales se caracterizan por su antigüedad e inactividad, presentan una coloración café – amarilla con la presencia de sales de eflorescencia de color blanco (Figura 1.1), lo que evidencia un estado de oxidación avanzada.

La ruinas encontradas en Atlistac (Figura 1.2) permite suponer que estos jales son los residuos mineros documentados más antiguos del distrito minero de Taxco (DMT) y que hasta ahora no habían sido estudiados, a diferencia de los depósitos de jales El Fraile, La Concha, Guerrero y El Solar, que fueron generados entre 1940 a 1976, aproximadamente (Armienta et al., 2003; Armienta et a., 2004; Talavera-Mendoza et al., 2005; Talavera Mendoza et al., 2006; Romero et al., 2007; Romero et al., 2008). Por la placa de entrada en Atlistac (Figura 1.3) se presume que los jales de este sitio corresponden al denominado periodo de Bonanza que se dio entre 1747–1802 (COREMI, 1999).

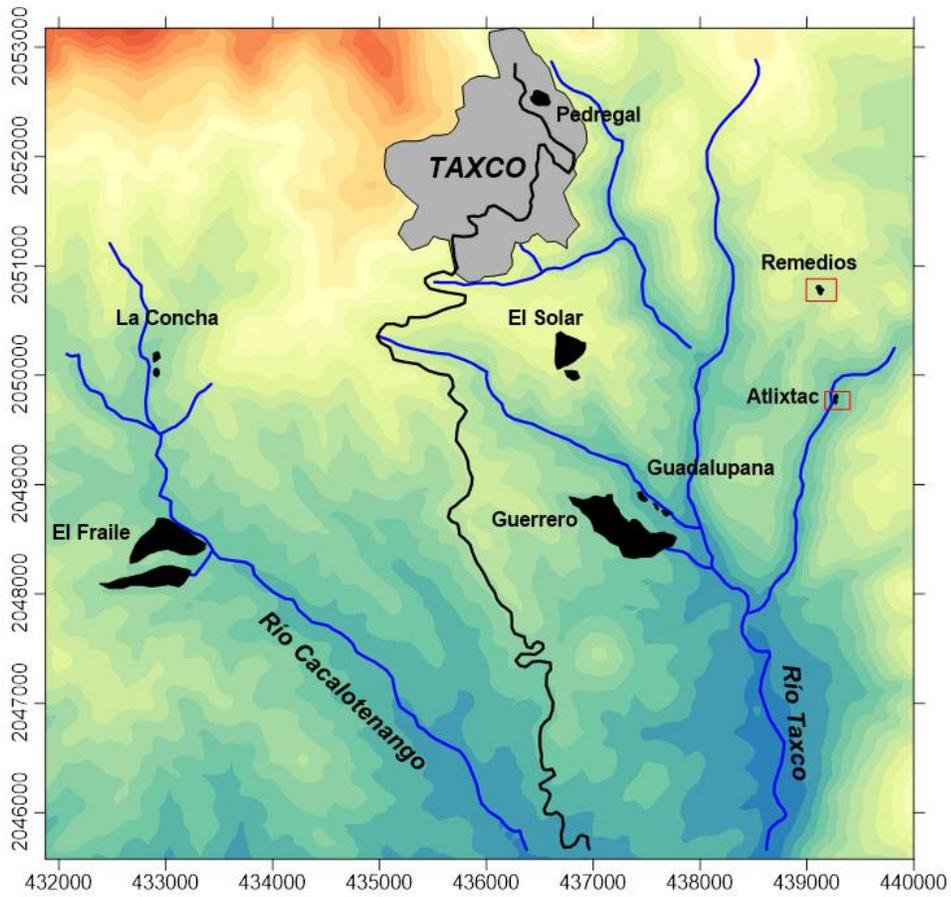


Figura 1.1. Ubicación y presentación de los depósitos de jales estudiados.



Figura 1.2. Ruinas de la Hacienda de beneficio de Atlistac.

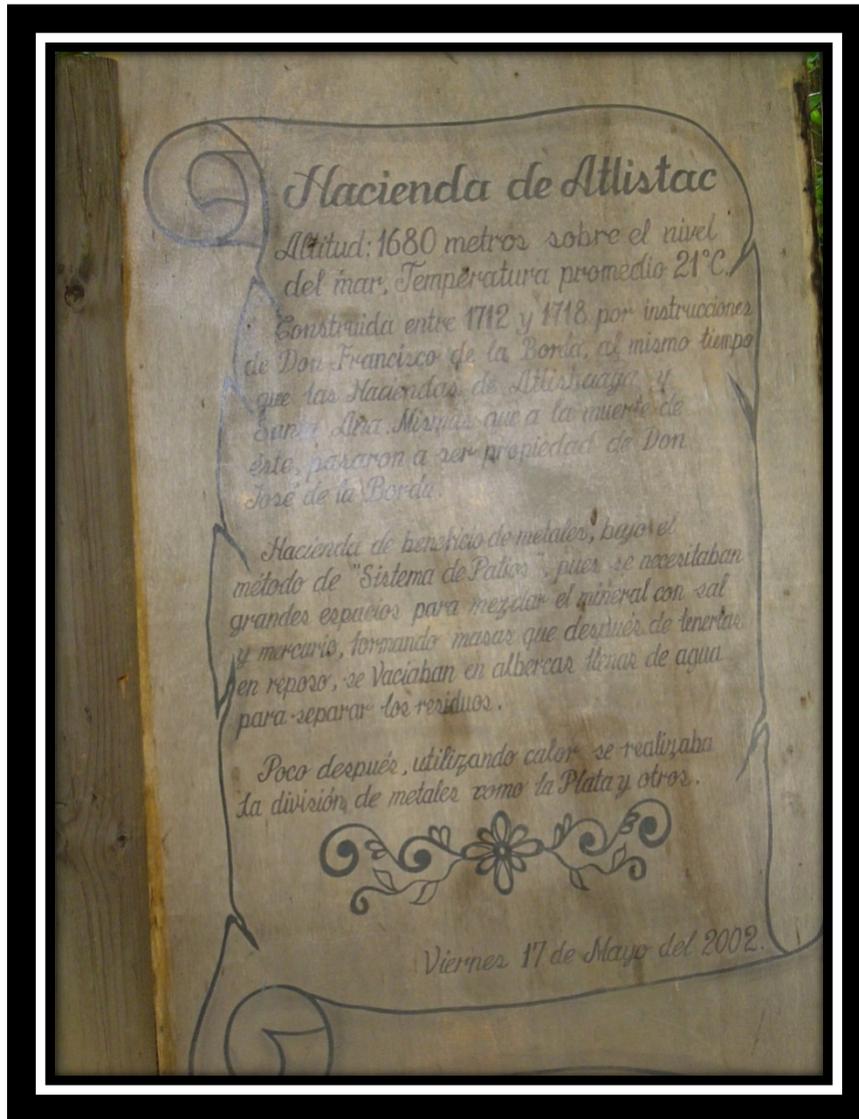


Figura 1.3 Placa de Referencia de la Hacienda de Atlistac.

2.2 Características fisiográficas e históricas de las áreas de estudio.

2.2.1 Fisiografía del Distrito Minero de Taxco

Los depósitos a estudiar en el Distrito Minero de Taxco (DMT) se pueden ubicar en la zona cercana al Lineamiento Xochula, a una elevación promedio de 1700 m.s.n.m. La orografía presenta tres tipos de relieve, los cuales se clasifican en: Zonas accidentadas, semiplanas y planas. A un costado de la presa de Atlistac y Los Remedios se observa un arroyo de flujo intermitente, lo cual podría influir en el transporte de material de los jales y por lo tanto de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). El clima predominante de la zona es templado subhúmedo con lluvias en verano (INAFED, 2010), la temperatura de la zona oscila entre 12 y 26 °C, la precipitación anual promedio es aproximadamente de 1000 mm, con importantes variaciones que van desde 800 mm hasta 1500 mm (INEGI, 2009).

2.2.2 Aspectos históricos del Distrito Minero de Taxco (DMT).

El DMT se caracteriza por ser uno de los centros mineros más antiguos de América Latina, ya que sus minas de platas son productoras desde la época precolombina, en la actualidad la mayoría de ellas se encuentran inactivas.

La Tabla 1 muestra los principales eventos que permitieron la consolidación de Taxco como una región minera de gran interés.

Tabla 1. Eventos históricos del DMT

1428-1468	Depósitos de oro y plata comienzan a explotarse a pequeña escala.
1521	Rodrigo de Castañeda bajo las órdenes de Hernán Cortés penetra, reconoce y toma el control del sector minero de Taxco.
1522	Se abre la primera mina de América llamada “El Socavón del Río, del Rey o de Cortés” en Tehuilontepec (DMT).
1528	Se establece en Tetelcingo (Cerro pequeño en náhuatl) el primer campamento minero.
1557	Bartolomé de Medina inventó el sistema de amalgamación lo que impulsó a las haciendas de beneficio a tratar los minerales de plata con azogue, permitiendo el desarrollo de la minería.
1570	Tetelcingo, Cantarranas y Tenango forman el Real de Minas de Taxco produciendo el primer auge minero.
1712-1718	Construcción de la Hacienda de Beneficio de Atlistac.
1742	Don José de la Borda inicia la explotación de las minas: “El pedregal”, “El Coyote”, “San Ignacio” y “Cerro perdido”.
1748-1762	Se explotan los yacimientos más ricos de plata en México, con leyes de 168 kilogramos de plata por tonelada, ubicados en “La Borda”, “La lajuela” y “El Yoamigo”.
1802	Las actividades mineras disminuyen gradualmente al cerrar la Noria de San Felipe.
1811	El DMT queda paralizado al ser tomado por José María Morelos.
1920	La actividad minera es reactivada gracias a la explotación de menas de sulfuros de plomo, zinc y cobre, con plata y oro. Esto fue posible gracias a la cianuración como sistema de beneficio.
1920	Instalación de la primera planta de beneficio de flotación selectiva, iniciando la explotación moderna de las minas.
1942	Llegada de American Smelting and Refining Company (ASARCO, Actualmente Minera México) adquiriendo los principales fundos de la zona y beneficiando gracias a su planta de flotación del Fraile.
1965-1974	ASARCO incrementa la capacidad de su planta de beneficio.
1976	Inauguración de la Unidad Taxco que comunicaba subterráneamente sus minas con el fin de concentrar el mineral en el tiro “El Solar”. Inicia las operaciones de una nueva planta de beneficio con capacidad de 2, 200 toneladas por día (tpd).
1979-1981	Incremento de la producción de 2,200 tpd a 3,300 tpd.
2007	Minera México informa el cierre definitivo de la Unidad Minera de Taxco.

Fuente: Elaboración propia con información de COREMI, 1999 y de Grupo México 2011.

2.3 Contexto Geológico-Minero del Distrito Minero de Taxco (DMT)

2.3.2 Síntesis Geológica

En este Distrito Minero las unidades estratigráficas que afloran son de rocas cretácicas, las cuales descansan sobre la unidad más antigua (Esquisto Taxco/Roca Verde Taxco Viejo) constituida de rocas metamórficas (pizarras y esquistos) cuya edad no ha sido establecida.

Las calizas y dolomitas de la Formación Morelos, así como los sedimentos de la Formación Mexcala (Capas intercaladas de arenisca, lutita y limonita calcárea), cubren a las unidades anteriores debido a una cabalgadura.

Gracias a su base de composición calcárea y a su cima arcillosa la Formación Mexcala es una posible guía de mineralización de vetas y mantos de reemplazamiento. La Formación Balsas cubre en discordancia estas formaciones que son cortadas por diquestratos (riolíticos y doleríticos) y por diques. Al norte de Taxco afloran rocas volcánicas (Riolita Tizapotla), tobas y lajares (Para mayor información consultar la Carta Geológica E14-A68).

Los estratos encajonantes de los depósitos minerales de la zona son:

- Esquisto Taxco y Formación Mexcala para los vetas de relleno de fisuras y brechas, donde el rasgo común es la silificación.
- Esquisto Taxco, Formación Morelos y Formación Mexcala para las vetas de reemplazamiento, donde la principal característica es presentar una ganga silícea en las vetas del esquisto y la lutita, mientras que en las vetas de las calizas se observa predominantemente una ganga de carbonatos.
- Contacto Caliza-Lutita para los mantos que son considerados de reemplazamiento, los cuales se podrían considerar económicamente rentables pues a pesar de leyes bajas de plomo y zinc contienen leyes considerables de plata. La presencia de magnetita y hematita en estos mantos es un rasgo clásico (COREMI, 1999)

2.3.3 Características de los Depósitos Minerales del DMT.

El Distrito Minero de Taxco se caracteriza por poseer yacimientos minerales de tipo veta, skarn, relleno de cavidades, mantos y brechas. La mineralización de estos yacimientos es Au, Ag, Pb, Zn y Cu (SGM, 2011).

Los principales mantos se encuentran se encuentran cerca del tiro del Solar (Minera México) a esta zona corresponde la antigua mina Babilona.

Respecto a las vetas se pueden identificar aproximadamente 50 con variaciones en sus rumbos que van desde los 10° hasta los 60° NW, además que generalmente son cortadas por fallas no mineralizadas de rumbo NE-SW. Entre los aspectos que se pueden destacar de las vetas de este distrito minero es el de tener una longitud promedio de 500 a 700 m, con una potencia de 1 a 3 m y una profundidad próxima a los 400 m.

Los clavos que se forman en las lutitas, esquistos y calizas alcanzan una longitud de 600 m y una altura de 200 m.

Según estudios realizados por Industrial Minera México en 1997, los metales explotados provienen de las rocas vulcanosedimentarias pre cretácicas (Esquisto Taxco/Rocaverde Taxco Viejo), en las cuales se encontraban diseminados los metales que fueron lixiviados por fluidos hidrotermales de temperaturas oscilantes entre 220 y 260 °C.

La edad de la mineralización es probablemente Oligoceno, lo que se puede deducir gracias a que el sello del sistema hidrotermal está formado por rocas impermeables como las Riolitas (Tizapotla del Norte), diques pre minerales en las fallas y las facies lutíticas de la Formación Mexcala (COREMI, 1999), cabe mencionar que todas pertenecen a la edad mencionada (Carta Geológico Minera del SGM E14-A68).

2.4 Estudios ambientales de residuos mineros en el distrito Minero de Taxco

Desde finales de la década de 1990, se han realizado estudios en jales y sedimentos en el distrito Minero de Taxco. Diferentes autores han estudiado los jales almacenados en las denominadas presas de jales “El Fraile” y “La Concha” (Armienta et al. 2003, Talavera et al. 2005 y Romero et al. 2006), que se construyeron en las riberas del río Cacalotango, al sureste de la ciudad de Taxco. Adicionalmente, Talavera et al. (2005) reporta datos de concentración total de elementos potencialmente tóxicos en muestras superficiales de jales almacenados en los depósitos localizados al sur de la ciudad de Taxco. Por otro lado, se han estudiado los sedimentos del río Cacalotango y los de un afluente del río Taxco, en cuyas riberas se depositaron los jales de la mina Guadalupana.

Los estudios realizados por Armienta et al. (2003), Talavera et al. (2005) y Romero et al. (2006) indican que en los jales antiguos y oxidados de la región minera de Taxco, los lixiviados obtenidos en el laboratorio presentan valores de pH muy variables que van desde ácidos (pH = 1.5 - 4.4) hasta cercanos al neutro (6.3 – 8.4), lo que sugiere la existencia de jales potenciales generadores de drenaje ácido (DA), que de acuerdo a la normatividad mexicana (NOM NOM-141-SEMARNAT-2003) serían clasificados como *PELIGROSOS* y jales que no generan DA, que serían clasificados como *NO PELIGROSOS*.

En la tabla A se puede observar la composición química de los jales superficiales y oxidados de la región minera de Taxco, reportada por Talavera et al. (2005), y en la Tabla B se puede observar la composición química de los jales superficiales oxidados y hasta 2.0 m de profundidad donde los jales están inalterados (Romero et al. 2006).

Por otro lado, los resultados de la composición química de los extractos acuosos en los jales oxidados indican que en los lixiviados neutros, las concentraciones solubles de los EPT, en general, son muy bajas (Tabla C). Sin embargo, en los lixiviados ácidos las concentraciones de los EPT solubles varían en un amplio intervalo, lo que sugiere la ocurrencia de distintos procesos geoquímicos que están controlando la movilidad de estos EPT.

Los análisis geoquímicos y mineralógicos a detalle realizados en la presa “El Fraile” indican que en los jales con alto potencial de generación de acidez (Romero 2006), los procesos de oxidación, generación de acidez y liberación de EPT han sido atenuados naturalmente, lo que ha mitigado el potencial impacto ambiental que representan para el entorno:

a) La capa de jales oxidados se inicia en la superficie de la presas, tiene un espesor limitado de 1 – 1.20 m, lo que se explica por la formación de capas compactas (ricas en Fe-oxihidróxidos y yeso) que ocurren a unos 50 cm de profundidad a partir de la superficie y que actúan como una barrera que limita el avance de los agentes oxidantes hacia las partes inferiores de la presa de jales.

b) Se identificó un enriquecimiento en las concentraciones de EPT en estas capas compactas, lo que sugiere que están actuando como una zona donde se acumulan los EPT liberados en la superficie de la presa de jales; lo que se debe a la precipitación de minerales secundarios (beudantita) y a la sorción en los oxihidróxidos de Fe.

Aunque los jales peligrosos tienen un alto potencial para la generación de drenaje ácido, éstos yacen sobre unidades impermeables de la Formación Mexcala y Esquisto de Taxco, lo que protege a los cuerpos de agua subterráneas de una eventual contaminación (Talavera et al. 2005). Sin embargo, representan un riesgo de contaminación para los cuerpos de agua superficial debido a las posibles escorrentías que se forman en épocas de lluvia.

Los estudios realizados en los sedimentos de los ríos de la zona de estudio indican que las concentraciones de EPT evaluados (Fe, Cu, Zn, Pb y As), en las cercanías de las presas de jales, son relativamente altas lo que evidencia la afectación de los mismos por la dispersión hídrica de los jales. Sin embargo, estos mismos estudios reportan resultados de pruebas de extracción secuencial que muestran a estos elementos asociados a compuestos químicos estables, por lo que presentan una movilidad y disponibilidad muy limitada, por lo que se infiere que no representan un riesgo al ambiente bajo las condiciones ambientales actuales.

a) Espinoza E. (2003) reporta que en los sedimentos del afluente del río Taxco el Zn está principalmente asociado a carbonatos, óxidos de Fe-Mn y fase residual (sulfuros); y que el Pb está asociado a los óxidos de Fe-Mn y fase residual (sulfuros).

Dotor (2006) reporta que en los sedimentos del río Cacalotenago y la parte sur del río Taxco (a la altura del poblado Taxco El Viejo), el Zn y el Pb están asociados principalmente a carbonatos; y el Cu, Fe y As están asociados, principalmente, a la fase residual.

Para el caso del Zn y Pb que están asociados a carbonatos, la disminución del pH podría influir en la movilidad de estos elementos al ambiente.

Estadígrafo	Ag	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	V	Zn	As
Jales "EFT" (El Fraile)									
Media	30.5	39.5	225.2	5.5	940.1	3676.7	17.3	3118.0	1324.0
Mínimo	18.9	2.0	107.0	3.4	68.0	1070.0	4.0	380.0	420.0
Máximo	44.7	181.0	420.0	8.4	5070.0	6620.0	49.0	10000.0	2970.0
Jales "LCT" (La Concha)									
Media	50.1	431.7	763.4	10.3	4609.2	21700.0	4.5	8178.2	3034.5
Mínimo	34.1	8.0	71.8	6.0	57.0	10100.0	2.0	780.0	1140.0
Máximo	66.3	780.0	1320.0	12.3	7950.0	43700.0	13.0	10000.0	11800.0
Jales "EST" (Guerrero)									
Media	34.8	56.6	200.4	8.6	1565.1	1850.0	23.1	4183.8	1368.9
Mínimo	18.0	8.0	118.0	4.3	176.0	840.0	5.0	1200.0	440.0
Máximo	63.5	171.0	460.0	16.1	4360.0	5850.0	51.0	10000.0	2360.0
Jales "Groll" (Guadalupana)									
Media	27.5	9.0	316.1	10.6	1483.3	6258.3	23.0	5291.7	493.3
Mínimo	9.5	1.0	76.8	6.4	300.0	3150.0	7.0	2380.0	220.0
Máximo	52.1	22.0	440.0	19.4	3970.0	10000.0	34.0	8290.0	700.0
Jales "Gro I" (Foster)									
Media	40.7	20.2	113.4	8.5	709.7	1413.3	6.3	2198.3	1881.7
Mínimo	29.8	1.0	72.3	7.0	98.2	780.0	2.0	600.0	800.0
Máximo	55.4	78.0	180.0	10.6	1240.0	2280.0	11.0	7830.0	3800.0
Jales "LJT" (Pedregal)									
Media	36.0	136.6	520.1	10.1	5800.4	13557.1	41.0	7835.7	1528.3
Mínimo	18.8	32.0	76.5	2.5	18.6	3680.0	13.0	3560.0	277.0
Máximo	74.2	320.0	1220.0	25.1	13800.0	32700.0	127.0	10000.0	5210.0

Nota: El nombre de los jales entre comillas "EST" es el que utiliza Talavera en su mapa de ubicación, y el nombre entre paréntesis (Guerrero) es el que se maneja en este documento

Tabla A Concentración total de elementos potencialmente tóxicos en jales superficiales y oxidados de la región minera de Taxco (Fuente: Talavera et al. 2005).

EPT mg/kg	Zona de Oxidación		Zona de Transición		Zona de jales inalterados	
	Intervalo	Media ± S.D.	Intervalo	Media ± S.D.	Intervalo	Media ± S.D.
Zn	1300 - 27700	6079 ± 7373	4050 - 20950	15800 ± 6769	16200 - 32700	25267 ± 6168
Pb	1692 - 5940	3610 ± 1310	1872 - 4189	2978 ± 1074	1891 - 3470	2958 ± 554
Cu	83 - 486	199 ± 118	193 - 613	334 ± 164	257 - 501	340 ± 92
As	570 - 3379	1838 ± 803	668 - 1542	1323 ± 368	879 - 1898	1380 ± 338
Cd	2.5 - 104	33.1 ± 36.7	111 - 287	181.3 ± 89	97 - 384	186 ± 117

Tabla B. Concentración total de elementos potencialmente tóxicos en jales "El Fraile" en superficie (jales oxidados) y en profundidad (jales inalterados) (Fuente: Romero et al. 2006)

Composición química (mg/L) de lixiviados en jales oxidados de "El Fraile"

Lixiviados neutros: pH = 7.4 - 7.9 (*)							
	Sulfatos	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	As
Mínimo	ND	<0.025	0.048	< 0.025	<0.025	<0.025	<0.010
Máximo	ND	<0.025	7.29	1.13	<0.025	0.038	0.746

Lixiviados neutros: pH = 6.3 - 6.7 (**)							
	Sulfatos	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	As
Mínimo	465	1	1.6	ND	0.45	0.06	0.002
Máximo	1372	1.85	8	ND	0.73	0.09	0.005

Lixiviados ácidos: pH = 2.4 - 4.4 (*)							
	Sulfatos	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	As
Mínimo	ND	<0.025	2.7	0.04	<0.025	0.065	<0.010
Máximo	ND	1105	397	19.2	0.363	63	0.573

Lixiviados ácidos: pH = 1.9 - 4.4 (***)							
	Sulfatos	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	As
Mínimo	1534	1.5	36.7	0.4	< 0.01	0.5	0.01
Máximo	10086	2586	2435	30.6	0.6	38.2	164

Composición química (mg/L) de lixiviados en jales oxidados de "La Concha"

Lixiviados neutros: pH = 7.0 - 8.4 (*)							
	Sulfatos	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	As
Mínimo	ND	<0.025	<0.025	<0.005	<0.025	<0.025	<0.010
Máximo	ND	0.067	6.99	0.239	<0.025	0.283	<0.010

Lixiviados ácidos: pH = 1.5 - 2.9 (*)							
	Sulfatos	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	As
Mínimo	ND	<0.025	152	1.68	<0.025	<0.025	<0.010
Máximo	ND	842	393	11.8	0.655	11.2	1.79

(*) Tomado de Talavera et al. 2005; (**) Tomado de Romero (2003); (***) tomado de Romero et al. (2006)

Tabla C. Composición química de los lixiviados en jales oxidados de "El Fraile" y "La Concha"

III. ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN EL CAMPO DE ESTUDIO DE JALES MINEROS

3.1 Procesos geoquímicos que ocurren en los depósitos de jales de sulfuros metálicos.

3.1.1 Oxidación Sulfuros Metálicos

México posee una considerable diversidad de yacimientos como son: Depósitos de cobre porfídico y molibdeno (*stockwork*), de cobre en lechos rojos; además de depósitos de mercurio, manganeso, antimonio y tierras raras. Mientras que el oro y la plata se han hallado en depósitos de veta de relleno de fisuras epitermales, en depósitos mesotermales y en diseminados de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas. En el país también se localizan depósitos de uranio en areniscas, así como depósitos vulcanogénicos de hierro y uranio; también depósitos de sulfuros masivos así como yacimientos polimetálicos tipo Skarn, chimeneas brechadas, mantos y vetas (Clark et. al 2008).

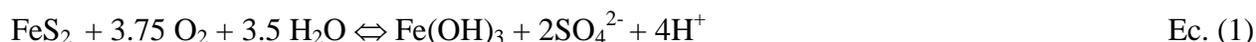
Sin embargo, la obtención de los metales después de la extracción del mineral del yacimiento no es simple, puesto que debe realizarse la concentración de los minerales de importancia económica a través de procesos físicos y químicos, de los cuales se generan los residuos denominados jales. Debido al proceso de reducción de partícula, los jales cuentan con una mayor superficie de reacción, por lo que los oxidantes los afectarán con mayor facilidad.

Los jales que tienen una cantidad importante de sulfuros metálicos, al interactuar con oxígeno y agua tienden a oxidarse, sin embargo los minerales se oxidan con mayor dificultad que los compuestos amorfos, razón por la que debe transcurrir un periodo de exposición considerable para que los sulfuros asociados a la generación de acidez, como la pirita y la pirrotita, se oxiden.

Las reacciones de oxidación de los principales sulfuros metálicos encontrados en los jales han sido reportadas por diferentes autores, (Faure 1980, Bain et al. 2000, Jennings et al. 2000, Armienta et al. 2001, Costello et al. 2003).

Pirita (FeS₂)

$$\log k = 211.1$$

**Pirrotita (Fe_{1-x}S)**

$$\log k = 92.6$$

**Arsenopirita (FeAsS)**

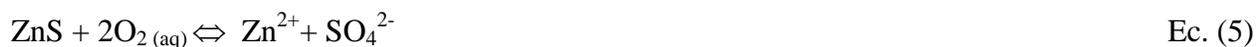
$$\log k = 198.7$$

**Galena (PbS)**

$$\log k = 121.1$$

**Esfalerita (ZnS)**

$$\log k = 166.1$$

**Calcopirita (CuFeS₂)**

$$\log k = 124.5$$



El Drenaje Ácido (DA), es una solución con pH ácido generado por la liberación de protones (H⁺) durante la reacción de oxidación de sulfuros metálicos (principalmente oxidación de la pirita) por los agentes oxidantes, donde los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) están a menudo disueltos en altas concentraciones (USEPA 1994a, Johnson et al. 2000, Bain et al. 2000, Roussel et al. 2000). Uno de los catalizadores de este fenómeno es la presencia de microorganismos (USEPA 1994a).

La oxidación de los sulfuros metálicos que aún se encuentran en los jales después del beneficio depende de varios factores entre los que se puede destacar el tiempo pues ocurre lentamente, razón por la que es poco común encontrar drenaje ácido en el periodo de operación de la mina. El DA usualmente aparece años después de su acumulación. Otro aspecto a considerar es la porosidad la cual permite la difusión del oxígeno atmosférico hasta ciertas

profundidades del depósito. Gracias a la formación de capas de baja permeabilidad que impiden el transporte vertical de agentes oxidantes hacia las zonas inferiores de “las presas de jales”, se ha establecido que el espesor de la zona de oxidación oscila entre los 50-200 cm. (Blowes et al. 1990, Lin 1997, Johnson et al. 2000, Holmstrom et al. 2001, Ljungberg et al. 2001, McGregor et al. 2002).

La problemática ambiental de los jales se basa en el hecho de que al ser oxidados los sulfuros metálicos de estos, liberan al ambiente sulfatos (SO_4^{2-}), protones (H^+), metales pesados (Fe, Pb, Cu, Zn), arseniatos ($\text{H}_n\text{AsO}_4^{3-n}$) y elementos que son considerados impurezas de los sulfuros como lo son: Co, Ni, Cd, Tl, Se, etc. Esto puede observarse en las reacciones planteadas anteriormente (1-6).

Durante la oxidación de los sulfuros metálicos se pueden liberar elementos que en altas concentraciones pueden ser tóxicos (S, Fe, Cu, Zn, Co, Ni y Se) además de otros elementos que según reportes son considerados de naturaleza tóxica como el As, Pb, Cd y Tl (Manaham, 1989). Pero el sólo hecho de poseer una naturaleza tóxica no implica que pueda producir daños a la salud, a un ecosistema o al ambiente, para esto se debe contemplar su capacidad para difundirse en el ambiente modificando la calidad del aire, suelo y agua, así como el entrar en contacto con los organismos.

Para que un elemento químico pueda ocasionar un daño a los seres vivos es necesario que estén en forma biodisponible. La biodisponibilidad está en función de la solubilidad de las diferentes fases minerales que contienen los elementos de interés (Davis et al. 1995), de igual manera se debe remarcar que la toxicidad de EPT es variada para el mismo elemento lo que depende de la especie mineralógica y de la química puesto que se considera el estado de oxidación (Helawell, 1988).

3.1.2 Neutralización

Aunque la tendencia al Drenaje ácido se liga a la oxidación de los sulfuros metálicos, no siempre se presenta en los jales, puesto que su generación está en función del balance existente entre los minerales productores potenciales de DA y los minerales potenciales consumidores de ácido (Carbonatos, Hidróxidos y Aluminosilicatos).

La neutralización es el proceso a través del cual el ácido se consume, puede ocurrir esencialmente por la alteración y disolución de algunos minerales. En conclusión cuando el potencial de generación de ácido es inferior a la capacidad consumidora de ácido (potencial de neutralización), los protones (H^+) son consumidos haciendo posible que el agua drenada del depósito no presente un pH ácido.

A. Disolución de minerales

Al disolverse minerales consumidores de protones (H^+), como lo son los carbonatos entre los que podemos destacar a la calcita ($CaCO_3$) por ser el más importante, las soluciones ácidas tienden a neutralizarse llegando a un pH entre 6.0 y 8.0.

Además de los minerales carbonatados que contribuyen a la neutralización como es el caso de la calcita, la aragonita ($CaCO_3$), la dolomita ($CaMg (CO_3)_2$) y la magnesita ($MgCO_3$) (Lin 1997 y Morin et al., 2001), existen otros minerales que consumen protones (H^+), estos son: gibsitita ($Al(OH)_3$), goetita ($\alpha FeOOH$), ferrihidrita ($Fe(OH)_3$) y brucita ($Mg(OH)_2$) (Morin et al., 2001).

El resultado de la neutralización entre la calcita y los productos de la oxidación de la pirita (H^+ y SO_4^{2-}) es la precipitación de sulfato de calcio (Ecuación 7).

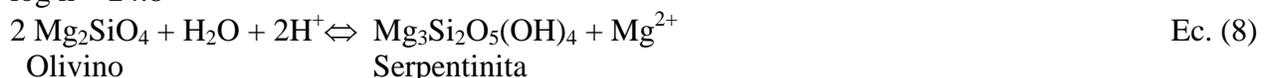
$$\log k = 14.1$$

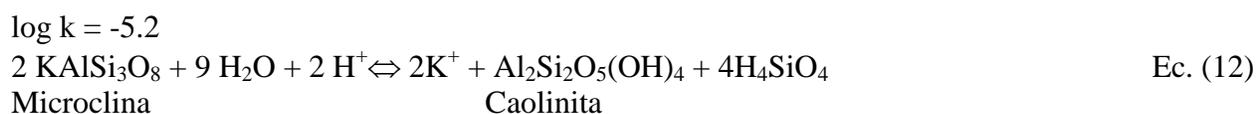
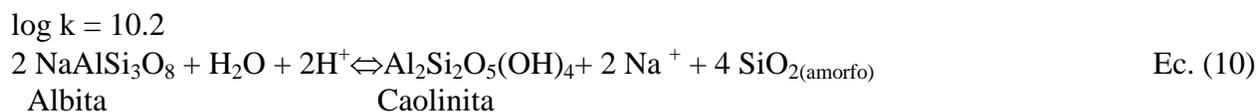
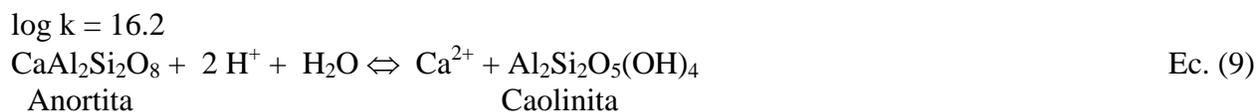


B. Alteración de Minerales

Al alterarse los aluminosilicatos también consumen protones (H^+). De acuerdo a los valores de las constantes de equilibrio, se puede concluir que los aluminosilicatos de Mg y Ca tienen mayor posibilidad de alterarse que los aluminosilicatos de K y Na. Las arcillas (montmorillonita, illita, caolinita), las cuales desempeñan un rol importante en la retención de EPT, son indicadores de la alteración de los minerales aluminosilicatados durante la neutralización.

$$\log k = 24.8$$





3.1.3. Etapas del desarrollo del Drenaje Ácido (DA)

A) Etapa inicial: En esta etapa son predominantes las reacciones donde los sulfuros metálicos se oxidan por la presencia de O_2 liberando sulfatos (SO_4^{2-}) y protones (H^+) los que pueden ser neutralizados, manteniendo condiciones neutras ($\text{pH} \geq 7$) por la disolución y alteración de minerales carbonatados, hidróxidos y aluminosilicatos. Estas reacciones promueven la precipitación de minerales secundarios que ayudan a impedir la movilidad de los EPT liberados en la oxidación (Romero, 2004).

B) Etapa intermedia: Continúa la generación de DA, los minerales de potencial neutralizador se vuelven inaccesibles o se agotan, lo que provoca que el pH disminuya (3.5-4.5) y que las bacterias de tipo “*Metallogenium*” puedan ser catalizadoras de la oxidación (Walsh et al., 1972). Esto permite condiciones favorables para el desarrollo de bacterias del género *Thiobacillus*. En general podemos apreciar la simultaneidad de reacciones de oxidación biológica y química.

C) Etapa final: Una mayor liberación de protones provoca una disminución de $\text{pH} < 3.5$, bajo estas circunstancias microorganismos como: *Thiobacillus*, *ferrooxidans* y *thiooxidans* se convierten en catalizadores de la oxidación (USEPA 1994) por lo que se determina que en esta etapa predominan las reacciones biológicas. De la oxidación química de sulfuros de hierro obtenemos hierro ferroso (Fe^{2+}) que se transforma en hierro férrico (Fe^{3+}) al oxidarse

biológicamente convirtiéndose en el oxidante principal, remplazando al O_2 . Esta oxidación es hasta seis veces más rápida que la oxidación química (Evangelou et al., 1995).

3.1.4 Precipitación y sorción de EPT liberados durante la oxidación de los sulfuros metálicos.

La sorción y el proceso de precipitación son primordiales en el control de movilidad de MMPT en las presas de jales.

- a) La movilidad del cobre está limitada por la precipitación de covelita (CuS) (Lin, 1997, McGregor et al., 1998 y Johnson et al. 2000). Además se reporta que la coprecipitación o adsorción de jarosita y goetita también controlan la movilidad del cobre (McGregor et al., 1998).
- b) La movilidad del Fe y sulfatos liberados en la oxidación es controlada por la precipitación de: Goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), Lepidocrocita ($\beta\text{-FeOOH}$), Ferrihidrita $Fe(OH)_3$, Jarosita ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) y Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Blowes et al., 1990. Lin 1997 y Bain et al. 2000).
- c) La coprecipitación en jarosita y goetita así como la adsorción son controles para la movilidad del Zinc (McGregor et al., 1998).
- d) La movilidad del plomo puede estar limitada por la formación de minerales secundarios insolubles en ambientes ácidos como: la anglesita ($PbSO_4$) y la beaundantita ($PbFe_3(AsO_4)(SO_4)(OH)_6$), y en ambientes alcalinos por la formación de minerales como: la cerusita cuya fórmula química es $PbCO_3$ (Lin, 1997 y Roussel et al., 2000). Mientras que en jales oxidados la movilidad del Pb también es controlada por la coprecipitación de la jarosita (Gieré et al. 2003).
- e) Múltiples estudios han reportado que la sorción en superficies minerales como arcillas, calcitas y oxihidroxidos de hierro, es un importante control en la movilidad de arseniatos (Frost et al., 1977, Goldberg et al., 1988, Bowel 1994, Van Der Hoek et al. 1994,

Manning et al., 1997, Foster et al. 1998, McGregor et al. 1998, Goldberg and Johnston 2001, Goldberg 2002 y Romero, 2004).

- f) Se ha observado y demostrado que en jales ácidos la movilidad del arsénico está limitada por la precipitación de la beaundantita “ $\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ ” (Roussel et al., 2000 y Gieré et al., 2003).

La precipitación de minerales secundarios (principalmente de Fe) no permite el avance del frente de oxidación hacia las partes inferiores del depósito de jales, actuando como el principal control de la dispersión de EPT al ser una zona de acumulación formada de capas compactadas, además de proporcionar una estabilidad física considerable al depósito de residuos.

- a) **Capas cementadas (*hardpans*):** Estas restringen el movimiento de Metales y Metaloides Potencialmente Tóxicos a través del depósito, comportándose como una zona de acumulación la cual está formada por yeso y fases sólidas de Fe. El espesor de estas puede ser variado; por ejemplo se reporta la formación de una capa cementada y compactada con un espesor de 20 cm. a una profundidad de 20-40 cm. en jales de este tipo en Ontario, Canadá (McGregor et al., 2002). Mientras que en Quebec y New Brunswick fueron publicados reportes donde estas capas se ubican a 25 cm de profundidad con un espesor de 10 – 15 y de 1 – 5 cm respectivamente (Blowes et al. 1990).
- b) **Capas compactadas de los jales de sulfuros metálicos,** formadas por fases de Fe sólidas precipitadas, que rellenan poros intergranulares cementando la matriz de los jales, fueron reportadas en Suecia (Lin, 1997). Estas capas presentan un espesor de 50 cm aproximadamente, se sitúan a una profundidad de 30 cm, además de retener los metales pesados actúan como una barrera que limita la difusión de O_2 (agente oxidante).

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

Gracias a la estrategia propuesta a inicios de la década de los noventa se pueden realizar diversas pruebas de carácter indicativo y predictivo, a fin de valorar y predecir el posible peligro y amenazas ambientales potenciales de los jales (Lawrence, 1990).

3.2.1 Pruebas de extracción

Estas pruebas indicativas tienen el objetivo de determinar cuáles son los componentes fácilmente solubles que se pueden dispersar en el ambiente, por lo que se realizan tanto en jales no oxidados (inalterados) como en jales oxidados.

Las metodologías de mayor aceptación para esta prueba son: USEPA 1312¹ y la prueba modificada de la ASTM D3987-85². Esta prueba consiste en:

- Mezclar la muestra de jales con un ácido débil o con agua meteórica (Proporción 1:20).
- Mantener los sólidos en suspensión agitando la mezcla (18 a 24 horas).
- Medir el pH final de la solución (Representa la capacidad amortiguadora del material).
- Medición de CE, Eh, sulfatos y EPT solubles del extracto final.

La peligrosidad de los jales por su toxicidad es determinada cuando la concentración en el extracto (Prueba modificada ASTM 3987-85) de alguno de los elementos listados en la NOM-052-SEMARNAT-1993³ supera los límites permisibles (NOM -141-SEMARNAT-2003).

3.2.2 Pruebas estáticas

Las pruebas estáticas de balance ácido-base tienen como objetivo el pronosticar la futura generación de DA razón por la que sólo se aplica en jales inalterados (No oxidados). En general

¹Method EPA 1312 "Synthetic Precipitation Leaching Procedure". El extractante usado es una disolución de ácido nítrico/sulfúrico (40:60) a pH entre 4.2 y 5.

²Modified ASTM D3987. Modified test for shake extraction of solid waste with water ASTM D3987. El extractante utilizado es agua a pH = 5.5 acidificada con CO₂ (NOM-141-SEMARNAT-2003).

³Los límites máximos de concentraciones (mg/L) de elementos que determinan el peligro de residuos mineros-metalúrgicos en extractos son: As, Pb, Cr VI, Ni y Ag = 5.0; Ba = 100; Cd = 1.0; Hg = 0.2; Se = 1.0

el fin de estas pruebas es estimar el balance existente entre minerales potencialmente generadores de ácido y minerales potencialmente consumidores de acidez.

La Prueba Modificada de Balance Ácido Base (PM-ABA) es el procedimiento recurrente para estimar el balance de los minerales potencialmente generadores y neutralizadores (Lawrence 1990, 1997).

El trabajo de Lawrence tiene su precedente en el método desarrollado en 1978 denominado Prueba de Balance Ácido-Base o “ABA” (Sobek et al., 1978), donde las principales diferencias son:

- En la prueba ABA se calentaba la mezcla de muestra y ácido clorhídrico (HCl) hasta el punto de ebullición logrando la disolución de carbonatos como el de hierro (FeCO_3), que no participa en la neutralización en condiciones ambientales, al disolverse se producía una sobre estimación del Potencial de Neutralización (PN), el cual está dado por la presencia de minerales carbonatados. Para solucionar este problema se reemplazó el calentamiento por la agitación durante 24 horas en la PM-ABA.
- En cuanto a la sobre estimación en la prueba ABA del Potencial de Acidez (PA), el cual está determinado por la presencia de minerales con azufre, fue corregida en la PM-ABA al considerar solamente el azufre que se encuentra en forma de sulfuro ya que aquel que se presenta en forma de sulfato no contribuye a la generación de acidez.

Metodología para PM-ABA

A pesar de que la USEPA de 1994 señala que la relación $\text{PN:PA} \leq 1$ es la aceptada para clasificar a los residuos minero-metalúrgicos como generadores potenciales de DA, la Norma Oficial Mexicana (NOM -141-SEMARNAT-2003) indica que estos serán considerados generadores si la relación es $\text{PN:PA} < 1.2$.

- El PA está determinado por el contenido de azufre en forma de sulfuro calculándose con la siguiente ecuación:

$$PA = \% \text{ de azufre como sulfuro} \times 31.25^4 \quad \text{Ec. (13)}$$

Dónde:

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

- El PN (kg CaCO₃ / ton) es el contenido de carbonatos y se estima mediante titulación del ácido no consumido después de la agitación, utilizando una base estandarizada a un pH de 8.3, para después calcular el equivalente de carbonato con la ecuación 14.

$$PN = [(N_{\text{NaOH}} \times \text{Vol.}_{\text{NaOH}} (\text{ml})) - (N_{\text{HCl}} \times \text{Vol.}_{\text{HCl}} (\text{ml})) \times 50] / [\text{peso (g)}] \quad \text{Ec. (14)}$$

3.3 Peligrosidad de jales con base en la Normatividad Mexicana

En 2003 se publicó la Norma Oficial Mexicana en materia de jales (NOM-141-SEMARNAT-2003⁵) tras largas sesiones de trabajo en las que participaron autoridades ambientales junto con los sectores industriales, y académico (representado por la UNAM). Las pruebas para determinar la peligrosidad de los jales de acuerdo a la NOM-141- SEMARNAT-2003 tienen un fundamento científico muy sólido. Sin embargo, los criterios señalados para decidir si los jales son “peligrosos” o “no peligrosos” por su capacidad potencial para generar drenaje ácido, se basan en la experiencia internacional, y actualmente no se cuenta con datos propios que permitan valorar si estos criterios pueden ser válidos para los jales de México.

⁴Factor derivado por estequiometría química para la oxidación completa de la pirita y la subsecuente hidrólisis del Fe³⁺ generado. En conclusión, este factor relaciona la acidez total producida con la alcalinidad equivalente como CaCO₃ requerida para la neutralización.

⁵NORMA 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 post-operación de presas de jales.

3.3.1 Pruebas para determinar la peligrosidad en presas de jales activas o que se planea construir

a) 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", procedimiento que utiliza como extractante agua destilada en equilibrio con CO₂ en condiciones estándar. En el extracto obtenido se cuantifican los metales y metaloides. Si la concentración en el extracto de uno o varios de los elementos enlistados en la tabla referente a los constituyentes tóxicos en el extracto de la NOM-052-SEMARNAT-1993⁶ es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales son peligrosos por su toxicidad.

b) 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 Acidez (PA) sea menor a 1.2, se consideran generadores potenciales de acidez.

Observación: 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.

⁶Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos. Los límites máximos de las concentraciones (mg/L) en el extracto de los elementos que hacen a un residuo peligroso son: As, Pb, Cr VI, Ni y Ag = 5.0; Ba = 100; Cd = 1.0; Hg = 0.2; Se = 1.0

3.3.2 Pruebas para determinar la peligrosidad en presas de jales inactivos y oxidados (abandonados)

La lectura de la NOM-141-SEMARNAT-2003 permite interpretar que para el caso de las presas de jales inactivas aplicará la sección 5.7 denominada criterios de post-operación. En esta sección de la Norma solo se señalan las acciones que se deben implementar una vez que la presa de jales llegue al final de su vida útil, las cuales dependerán si son o no peligrosos.

En el caso de los jales inactivos y oxidados, donde ya ocurrieron los procesos de oxidación y neutralización, al igual que en los jales inalterados, la prueba de extracción sirve para cuantificar los constituyentes tóxicos solubles que pueden lixiviar. Sin embargo, 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 agotamiento de los carbonatos, se hace necesario identificar si aún hay sulfuros metálicos en los jales y estimar el balance ácido-base para pronosticar que ocurrirá en el futuro. 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 inalterados, sería neutralizada por la disolución de los carbonatos existentes.

IV. METODOLOGÍA: ACTIVIDADES DE CAMPO Y PRUEBAS DE LABORATORIO

4.1 Muestreo

El muestreo se realizó durante las fechas del 27, 28 y 29 de Enero del 2011, en dos zonas próximas al pueblo de San Juan de Dios, Guerrero. En el depósito de residuos mineros denominado Hacienda de Atlistac se colectaron 26 muestras, mientras que en la presa de los Remedios se recolectaron 33 muestras.

En la Figura 2 y Tabla 2 se presenta tanto la ubicación del muestreo de la Hacienda de Atlistac, como algunas observaciones de campo relacionadas con las muestras y algunas imágenes del muestreo. Las muestras compuestas tomadas a una profundidad de 20 cm de la superficie con clave “SX” (10 muestras) presentan una considerable variedad de colores entre los identificables son: amarillo, naranja, rojizo y marrón, estas tonalidades indican la oxidación en los jales. Las muestras simples recolectadas en los dos perfiles de los taludes expuestos; a los que se les asignaron las claves “PX” (9 muestras) y “ZX” (7 muestras) también tienen coloración típica de la oxidación de jales.

En los perfiles de la “Hacienda de Atlistac” el muestreo se realizó cada 50 cm y se consideró la variabilidad de colores de los jales oxidados.

En la zona denominada “Remedios” se realizó un procedimiento similar al efectuado en la Hacienda de Atlistac obteniendo 33 muestras de las cuales 8 son superficiales compuestas (SR), 19 son del perfil uno (PR) y 6 del perfil dos (ZR) (Figura 3 y Tabla 3), que se muestrearon en intervalos de 1 metro. Al igual que en la zona de la “Hacienda de Atlistac”, se consideraron las diferencias de tonalidades en los jales expuestos para el muestreo. Una característica remarcable es la carencia de vegetación local en los jales de los Remedios, contrario a lo que se apreció en los de Atlistac.

Tabla 2. Ubicación de las Muestras del depósito Hacienda de Atlitac.

Clave	Coordenadas (UTM)		Profundidad (m)	Observaciones en los jales
	X	Y		
Superficiales				
ZX0	14Q0439286	2049799	0 - 0.20	Oxidado
SX1	14Q0439292	2049712	0 - 0.20	Oxidado
SX2	14Q0439288	2049779	0 - 0.20	Oxidado
PX0	14Q0439268	2049779	0 - 0.20	Oxidado
SX3	14Q0439276	2049769	0 - 0.20	Oxidado
SX4	14Q0439288	2049769	0 - 0.20	Oxidado
SX5	14Q0439288	2049759	0 - 0.20	Oxidado
SX6	14Q0439276	2049759	0 - 0.20	Oxidado
SX7	14Q0439276	2049749	0 - 0.20	Oxidado
SX8	14Q0439288	2049749	0 - 0.20	Oxidado
SX9	14Q0439276	2049739	0 - 0.20	Oxidado
SX10	14Q0439288	2049739	0 - 0.20	Oxidado
Perfil 1				
PX0	14Q0439268	2049779	0 - 0.20	Oxidado
PX1			0.20 - 0.50	Oxidado
PX2			0.50 - 1.00	Oxidado
PX3			1.0 - 1.50	Oxidado
PX4			1.50 - 2.00	Oxidado
PX5			2.0 - 2.50	Oxidado
PX6			2.50 - 3.00	Oxidado
PX7			3.00 - 3.50	Oxidado
PX8			3.50 - 4.00	Oxidado
Perfil 2				
ZX0	14Q0439286	2049799	0.0 - 0.20	Oxidado
ZX1			0.20 - 0.50	Oxidado
ZX2			0.50 - 1.00	Oxidado
ZX3			1.0 - 1.50	Oxidado
ZX4			1.50 - 2.00	Oxidado
ZX5			2.00 - 2.50	Oxidado
ZX6			2.50 - 3.00	Oxidado

Figura 2. Muestreo en Hacienda de Atlistac.



Tabla 3. Coordenadas de las muestras recolectadas en el depósito de los Remedios.

Clave	Coordenadas (UTM)		Profundidad (m)	Observaciones en los Jales
	X	Y		
Superficiales				
SR1	14Q0439083	2050802	0.0 - 0.20	Oxidados
SR2	14Q0439096	2050751	0.0 - 0.20	Oxidados
PR0	14Q0439130	2050751	0.0 - 0.20	Oxidados
ZR0	14Q0439140	2050779	0.0 - 0.20	Oxidados
SR3	14Q0439103	2050811	0.0 - 0.20	Oxidados
SR4	14Q0439106	2050795	0.0 - 0.20	Oxidados
SR5	14Q0439091	2050775	0.0 - 0.20	Oxidados
SR6	14Q0439110	2050781	0.0 - 0.20	Oxidados
SR7	14Q0439127	2050793	0.0 - 0.20	Oxidados
SR8	14Q0439119	2050767	0.0 - 0.20	Oxidados
Perfil 1				
PR0	14Q0439130	2050751	0.0 - 0.20	Oxidados
PR1			0.20 - 1.00	Oxidados
PR2			1.0 - 2.00	Oxidados
PR3			2.0 - 3.00	Oxidados
PR4			3.0 - 4.00	Oxidados
PR5			4.0 - 5.00	Oxidados
PR6			5.0 - 6.00	Oxidados
PR7			6.0 - 7.00	Oxidados
PR8			7.0 - 8.00	Oxidados
PR9			8.0 - 9.00	Oxidados
PR10			9.0 - 10.00	Oxidados
PR11			10.0 - 11.00	Oxidados
PR12			11.0 - 12.00	Oxidados
PR13			12.0 - 13.00	Oxidados
PR14			13.0 - 14.00	Oxidados
PR15			14.0 - 15.00	Oxidados
PR16			15.0 - 16.00	Oxidados
PR17			16.0 - 17.00	Oxidados
PR18			17.0 - 18.00	Oxidados
Perfil 2				
ZR0	14Q0439140	2050779	0.0 - 0.20	Oxidados
ZR1			0.20 - 1.00	Oxidados
ZR2			1.0 - 2.00	Oxidados
ZR3			2.0 - 3.0	Oxidados
ZR4			3.0 - 4.00	Oxidados
ZR5			4.0 - 5.00	Oxidados

Figura 3. Muestreo del depósito Los Remedios.



4.2 Análisis de Laboratorio.

Después de ser recolectadas, las muestras se analizaron en los laboratorios del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Las muestras fueron secadas, disgregadas, homogeneizadas, cono-cuarteadas para finalmente ser tamizadas. Se determinaron pH, conductividad eléctrica, la concentración total de los Elementos Potencialmente Tóxicos y de Elementos Mayores, geodisponibilidad y mineralogía. También se realizaron pruebas de balance ácido-base. En la Figura 4 se muestra el diagrama de las actividades de preparación y análisis efectuadas en los jales de los depósitos estudiados.

4.2.1 Determinación de parámetros generales (pH y Conductividad)

Una vez que los jales fueron tamizados (-10#) se prepararon suspensiones de muestras homogeneizadas para la determinación de su pH y Conductividad Eléctrica (CE), con una relación sólido-agua de 1:5, siendo agitadas por un periodo de una hora a una velocidad de 220 rpm (US-EPA,1995). Para la medición del pH se utilizó un potenciómetro HI98185 PH/ORP/ISE Meter.

La CE se midió usando el conductivímetro Hanna HI99301 EC de acuerdo al método de la Soil Science Society of America (SSSA,1996) donde se señala que el periodo de agitación de las suspensiones debe ser de una hora.

4.2.2 Concentraciones Totales de Elementos Mayores (EM) y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

A. Elementos Mayores (EM)

Se determinaron las concentraciones totales de los siguientes Elementos Mayores (EM): el Hierro (Fe_2O_3), Silicio (SiO_2), Titanio (TiO_2), Fosforo (P_2O_5), Aluminio (Al_2O_3), Manganeseo (MnO), Magnesio (MgO), Calcio (CaO), Sodio (Na_2O) y Potasio (K_2O).⁷

⁷El análisis de EM es dado en forma de sus óxidos

El procedimiento para la obtención de concentración de EM (Lozano et al, 1995) consiste en la pulverización de la muestra seca a una malla de -230 (65 μm), después es fundida en pastillas con 95% de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, para finalmente cuantificarla con Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (Sistema Secuencial de FRX Siemens SRS 3000)⁸.

B. Elementos Potencialmente Tóxicos.

Se determinaron las concentraciones totales de los siguiente elementos potencialmente tóxicos (EPT): Fe, As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Ni, Co y V. Para estas determinaciones se utilizó la técnica de Fluorescencia de Rayos X de tercera Generación, con un equipo NITTON XLt3 de Thermo Scientific⁹.

4.2.3 Geodisponibilidad de EPT y EM en lixiviados artificiales

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 indica un protocolo para la determinación de los elementos tóxicos geodisponibles a través de una prueba de extracción, la cual consiste en preparar suspensiones con jales y agua en equilibrio con CO_2 a un $\text{pH}=5.5 \pm 0.2$ (para simular el agua meteórica) en una relación 1:20.

El siguiente paso es la agitación de las suspensiones por un lapso de 18.0 horas para después separar el extracto por centrifugación, para posteriormente efectuar la filtración con membranas de 0.45 μm .

Finalmente los extractos obtenidos son analizados en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología (UNAM) a fin de medir las concentraciones de los iones mayores. El equipo utilizado para medir los iones mayores es el de Cromatografía iónica¹⁰ mientras que para cuantificar la disponibilidad de otros elementos entre los que están los EPT (Pb, As, Cu, Zn, Fe, Cd) las muestras se enviaron al Laboratorio ACTLABS (Canadá) para su análisis por ICP-OES.

⁸Como medida de control el equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X, NITTON XLt3 de Thermo Scientific, podrá ser utilizado para comparar algunos elementos mayores (Mn, Ca y K).

⁹Con intención de valorar la precisión de las muestras el análisis se realiza por triplicado. El análisis previo de muestras de jales llamadas de referencia (RTS-3, RTS-4 y Till-4) tiene por objetivo el control de calidad del análisis (Método de exactitud).

¹⁰La dilución usada en cromatografía es de 2 microlitros en 10 mililitros (.2:10) además para evitar la generación de burbujas para la dilución se usa la micropipeta. Cabe mencionar que el agua utilizada se encuentra libre de sales (Agua MILIQ) que pudiesen afectar la medición del Cromatógrafo.

4.2.4 Evaluación de la Capacidad de generación de Drenaje Ácido (DA)

Para determinar el potencial de generación del DA en las presas de jales la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 señala como procedimiento de evaluación la Prueba Modificada de Balance Ácido-base PM-ABA (Lawrence, 1990). El detalle de este método se puede consultar en el apartado 3.2.2 de este documento.

4.2.5 Análisis mineralógico de los residuos por Difracción de Rayos X (DRX)

La preparación de las muestras para el análisis de DRX se basa en la homogenización y pulverización en el mortero de ágata hasta alcanzar una granulometría inferior a la malla 230 (65 μm); posteriormente las muestras pulverizadas son analizadas con el apoyo de un Difractómetro Shimadzu XRD-6000, se utilizó un intervalo angular 2θ de 4° a 70° y velocidades de $2^\circ/\text{minuto}$.

La identificación de la composición mineralógica de los jales se realiza comparando los patrones de difracción obtenidos con la base de datos de los patrones conocidos, considerando la información previamente obtenida de la composición química de los residuos estudiados.

4.2.6 Análisis de fases sólidas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

El uso de este microscopio permite estudiar en alta resolución la superficie de un sólido ya que al “barrer” la muestra con un haz electrónico de sección transversal de alta energía se genera una imagen punto a punto de la topografía; además que permite un análisis puntual de la composición química, consecuencia de los varios tipos de señales producidos por los electrones al impactar la muestra.

Muestreo y Análisis de Muestras

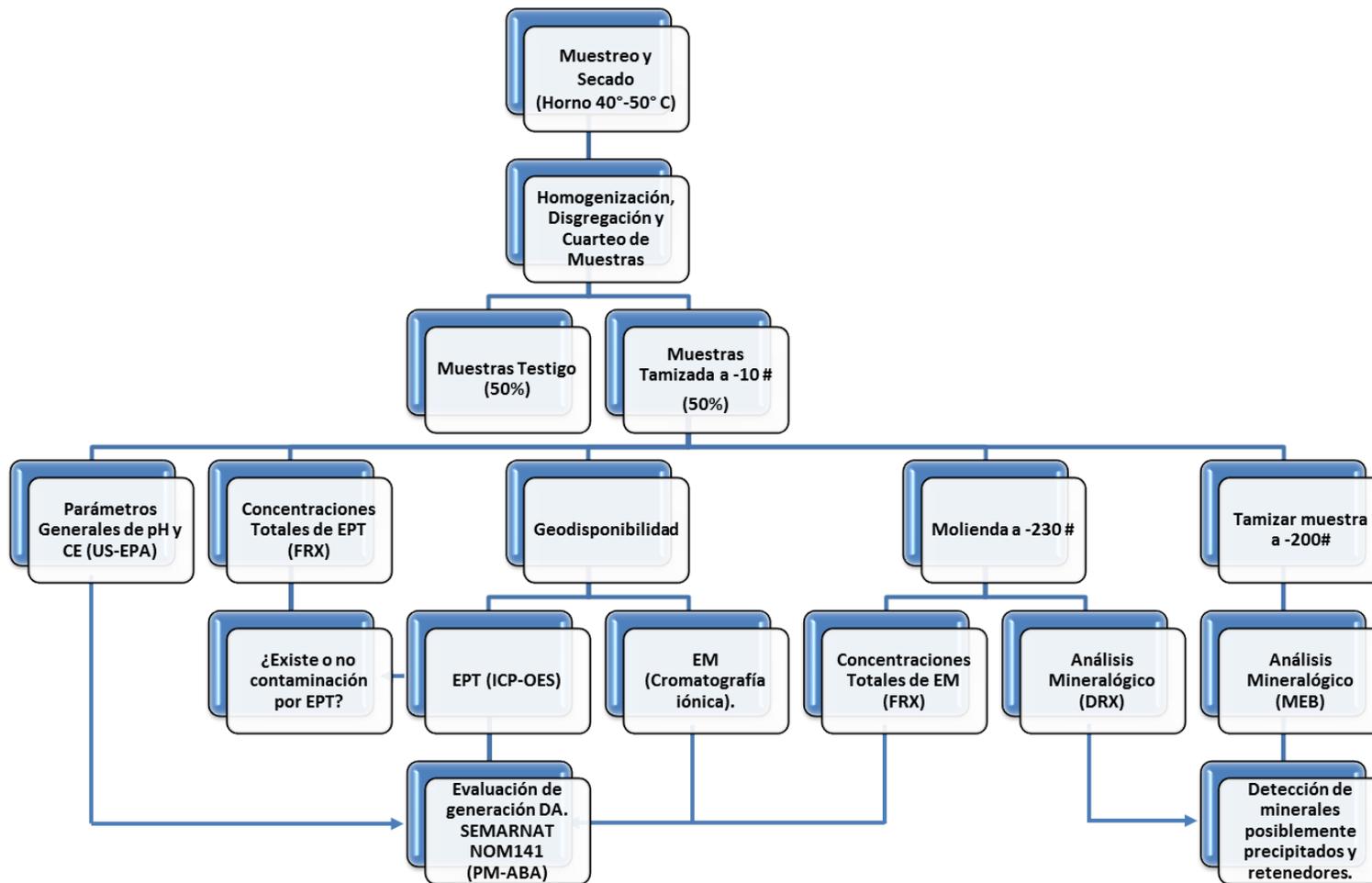


Figura 4. Proceso de la campaña y del análisis de las muestra

V. RESULTADOS

5.1 Caracterización general de los jales Hacienda de Atlistac y Remedios

En las Tablas 4 y 5 se muestra los resultados obtenidos de la medición de pH y Conductividad Eléctrica (CE) de los jales de las dos zonas estudiadas.

El pH de los jales de Hacienda de Atlistac varía entre 2.51 y 8.13 con una CE entre 0.12 y 2.87 (mS/cm), mientras que en los del depósito de los Remedios el pH varían entre un mínimo de 2.06 y un máximo de 7; con una CE entre 1.19 y 11.13 (mS/cm).

5.1.1 Jales del depósito Atlistac

En el depósito Atlistac los jales son de color café-amarillo con incrustaciones de color blanco, lo que indica un avanzado grado de oxidación.

De las muestras superficiales recolectadas (20 cm de profundidad) cuya clave es “SX” siete de diez presentan un pH próximo al neutro (6.08) e incluso algunas poseen un pH básico (8.13) con conductividades que fluctúan de 0.13 a 1.95 (mS/cm). En las otras muestras “superficiales”, los valores de pH son ácidos (2.51-4.69) con conductividades de 0.17 a 2.81 mS/cm.

En el perfil 1 (PX), de estos jales, se puede observar que en las primeras muestras existe un pH prácticamente neutro (6.17-7.57) con una conductividad cercana a 1.8 mS/cm, sin embargo esta incrementa ligeramente (1.9 mS/cm) al disminuir el pH entre 4.03 y 4.61 (muestras PX2 y PX3). En la muestra PX4 se incrementa nuevamente el pH hasta la neutralidad (6.99) con una conductividad de 2 mS/cm. Finalmente después de 2.5 metros de profundidad las muestras tienen un pH ácido que oscila entre 3.21 y 3.61, con una conductividad entre 2.06 y 2.87 mS/cm.

En el segundo perfil al que se le denominó “ZX”, hasta un metro de profundidad se midió un pH entre 6.14 y 7.39 con conductividades entre 1.02 y 1.99mS/cm, pero en las muestras ZX3-ZX6 (de 1.0 a 3.0 m de profundidad) el pH es ácido (3.22-3.54) con conductividades entre 1.90 y 1.95mS/cm.

5.1.2 Jales del depósito Los Remedios

En Los Remedios, los jales son de color café, rojo y amarillo lo que indica que están oxidados. Las 8 muestras superficiales identificadas como “SR” (0 - 20 cm de profundidad) tienen un pH ácido que varía entre 2.06 y 3.43, con una CE entre 1.91 y 5.47 mS/cm (Tabla 5).

En el perfil uno (PZ) se identifica que en las primeras muestras existe un pH ácido (2.89-4.58) con una conductividad cercana a 2.0 mS/cm, sin embargo, a profundidades entre los cuatro y cinco metros el pH es de 7.06 con un CE de 2.81 mS/cm. En muestras de mayor profundidad (PR6-PR16) se cuantificaron valores de pH ácido (2.06-3.32) con CE de 1.98 hasta 5.05 mS/cm. En las últimas muestras (PR17 y PR18) se identifica un pH prácticamente neutro (6.76-6.87) con una Conductividad ente 1.94 y 2.23 mS/cm.

En el segundo perfil denominado ZR, el comportamiento es similar al de las muestras del perfil PR pues los jales ZR0 a ZR3 SON ácidos y salinos (pH=2.33-3.43, CE=1.92-11.13), en la muestra ZR4 se visualiza un incremento en el pH (pH=5.52, CE=4.0 mS/cm) y finalmente en la muestra ZR5 se presentarse un pH ácido de 3.61.

5.1.3 Comparación de los valores de pH y CE entre los jales estudiados y jales de otros depósitos estudiados

La coloración café-amarilla con incrustaciones de color blanco en ambos depósitos, así como la variación de los valores y de conductividad eléctrica son indicadores de la presencia de condiciones variables óxido-reductoras, de acides y de salinidad. Para los jales oxidados, ácidos y muy salinos, se puede interpretar que son potenciales generadores de Drenaje Ácido (DA), que se intercalan con jales no generadores de DA.

El comportamiento de estos jales, que se asocian a los más antiguos del distrito Minero de Taxco, no se diferencian sustancialmente de lo que ha sido reportado en jales oxidados más recientes como los de El Fraile, La Concha y Guerrero (Romero et al., 2003 y 2006), lo que probablemente se deba a: (i) la heterogeneidad de los yacimientos explotados y (ii) la formación de capas de minerales secundarios que gobiernan la migración de los agentes oxidantes en el sentido vertical de los depósitos de jales, y que además determinan la movilidad de los diferentes constituyentes en los jales.

Tabla 4. Caracterización Hacienda de Atlistac.

Clave	Coordenada (x)	Coordenada (y)	Profundidad (m)	pH	Conductividad (mS/cm)
Superficiales.					
ZX0	14Q0439286	2049799	0 - 0.20	6.14	1.99
SX1	14Q0439292	2049712	0 - 0.20	2.51	2.81
SX2	14Q0439288	2049779	0 - 0.20	4.51	2.04
PX0	14Q0439268	2049779	0 - 0.20	6.17	1.89
SX3	14Q0439276	2049769	0 - 0.20	4.69	0.17
SX4	14Q0439288	2049769	0 - 0.20	6.23	1.95
SX5	14Q0439288	2049759	0 - 0.20	7.53	0.13
SX6	14Q0439276	2049759	0 - 0.20	6.76	0.15
SX7	14Q0439276	2049749	0 - 0.20	7.28	0.12
SX8	14Q0439288	2049749	0 - 0.20	8.13	0.25
SX9	14Q0439276	2049739	0 - 0.20	7.23	0.63
SX10	14Q0439288	2049739	0 - 0.20	6.08	0.32
Perfil 1					
PX0	14Q0439268	2049779	0 - 0.20	6.17	1.89
PX1			0.20 - 0.50	7.57	1.74
PX2			0.50 - 1.00	4.61	1.89
PX3			1.00 - 1.50	4.03	1.99
PX4			1.50 - 2.00	6.99	2.08
PX5			2.00 - 2.50	3.61	2.36
PX6			2.50 - 3.00	3.48	2.87
PX7			3.00 - 3.50	3.60	2.18
PX8			3.50 - 4.00	3.26	2.06
Perfil 2.					
ZX0	14Q0439286	2049799	0 - 0.20	6.14	1.99
ZX1			0.20 - 0.50	7.31	1.02
ZX2			0.50 - 1.00	7.39	1.77
ZX3			1.00 - 1.50	3.51	1.95
ZX4			1.50 - 2.00	3.54	1.93
ZX5			2.00 - 2.50	3.22	1.90
ZX6			2.50 - 3.00	3.24	1.93

Tabla 5. Caracterización del depósito de residuos mineros Los Remedios.

Clave	Coordenada (x)	Coordenada (y)	Profundidad (m)	pH	Conductividad (mS/cm)
Superficiales.					
SR1	14Q0439083	2050802	0 - 0.20	3.18	2.01
SR2	14Q0439096	2050751	0 - 0.20	3.43	1.96
PR0	14Q0439130	2050751	0 - 0.20	3.12	2.13
ZR0	14Q0439140	2050779	0 - 0.20	3.43	1.92
SR3	14Q0439103	2050811	0 - 0.20	2.47	4.68
SR4	14Q0439106	2050795	0 - 0.20	3.00	5.77
SR5	14Q0439091	2050775	0 - 0.20	3.21	2.09
SR6	14Q0439110	2050781	0 - 0.20	3.38	1.91
SR7	14Q0439127	2050793	0 - 0.20	2.55	2.86
SR8	14Q0439119	2050767	0 - 0.20	2.06	5.47
Perfil 1					
PR0	14Q0439130	2050751	0 - 0.20	3.12	2.13
PR1			0.20 - 1.00	3.01	2.07
PR2			1.00 - 2.00	2.89	2.26
PR3			2.00 - 3.00	4.58	2.07
PR4			3.00 - 4.00	5.86	2.81
PR5			4.00 - 5.00	7.06	1.19
PR6			5.00 - 6.00	3.02	1.98
PR7			6.00 - 7.00	2.06	6.14
PR8			7.00 - 8.00	2.16	8.65
PR9			8.00 - 9.00	2.22	5.91
PR10			9.00 - 10.00	2.56	3.49
PR11			10.00 - 11.00	2.94	4.66
PR12			11.00 - 12.00	2.74	3.01
PR13			12.00 - 13.00	3.02	2.21
PR14			13.00 - 14.00	2.87	2.35
PR15			14.00 - 15.00	2.54	3.84
PR16			15.00 - 16.00	2.36	5.05
PR17			16.00 - 17.00	6.76	2.23
PR18			17.00 - 18.00	6.87	1.94
Perfil 2.					
ZR0	14Q0439140	2050779	0 - 0.20	3.43	1.92
ZR1			0.20 - 1.00	3.21	2.05
ZR2			1.00 - 2.00	2.33	8.54
ZR3			2.00 - 3.00	2.37	11.13
ZR4			3.00 - 4.00	5.52	4.02
ZR5			4.00 - 5.00	3.61	2.40

5.2 Concentraciones Totales de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

5.2.1 Presa Hacienda de Atlistac

En las Tablas 6 se presentan los valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones totales de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) determinadas en el depósito de jales Atlistac.

Tabla 6. Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones totales de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) determinadas en el depósitos jales Atlistac.

CLAVE LAB	PROF. (m)	pH	Cond. (mS)	Pb	As	Cu	Fe	Zn
				(ppm)				
PERFIL 1								
PX0	0.20	6.17	1.89	4008.53	483.74	256.36	175098.45	10896.50
PX1	0.50	7.57	1.74	1814.99	231.27	56.93	89317.48	10255.89
PX2	1.00	4.61	1.89	2680.20	340.43	70.12	94272.43	1795.29
PX3	1.50	4.03	1.99	2058.64	243.37	48.88	79650.39	1603.72
PX4	2.00	6.99	2.08	2261.58	193.48	0.00	89575.69	31313.21
PX5	2.50	3.61	2.36	1764.22	303.11	54.43	115433.51	1529.51
PX6	3.00	3.48	2.87	2084.66	410.91	95.7	153184.41	5767.17
PX7	3.50	3.60	2.18	10031.99	1068.2	569.62	279855.72	4004.27
PX8	4.00	3.26	2.06	3414.16	557.12	67.03	142604.22	1342.34
PERFIL 2								
ZX0	0.20	6.14	1.99	5048.38	579.66	268.65	175061.23	11032.16
ZX1	0.52	7.31	1.02	2210.13	211.55	106.22	75905.79	16464.18
ZX2	1.00	7.39	1.77	924.15	110.75	0.00	57857.44	13346.98
ZX3	1.50	3.51	1.95	2023.99	338.32	70.61	104794.84	1687.09
ZX4	2.00	3.54	1.93	1098.63	325.67	59.99	145029.81	2025.88
ZX5	2.50	3.22	1.90	2292.62	469.09	65.24	193268.81	1060.59
ZX6	3.00	3.24	1.93	1269.41	322.48	65.89	127916.94	522.45
SUPERFICIALES								
SX1	0.20	2.51	2.81	8968.15	925.44	0.00	184838.90	809.26
SX2	0.20	4.51	2.04	3498.66	615.18	301.55	208714.09	5618.09
SX3	0.20	4.69	0.17	2774.44	518.66	232.40	183718.62	3371.39
SX4	0.20	6.23	1.95	3559.97	548.36	187.10	165441.13	8033.45
SX5	0.20	7.53	0.13	6791.94	606.46	344.23	146064.57	10958.15
SX6	0.20	6.76	0.15	4970.31	507.75	283.99	164267.43	11756.40
SX7	0.20	7.28	0.12	5387.04	417.10	289.81	113514.02	8909.83
SX8	0.20	8.13	0.25	5380.59	505.48	398.47	117799.91	8013.94
SX9	0.20	7.23	0.63	2873.96	326.81	116.11	118255.00	14261.98
SX10	0.20	6.08	0.32	4264.08	523.20	288.07	163182.19	5162.92

En términos de valores promedio, en los jales del depósito Atlistac, el contenido de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) estudiados desciende en el siguiente orden: Fe > Zn > Pb > As > Cu.

Si comparamos las concentraciones totales de los EPT de interés en los jales de Atlistac, con los reportados por Talavera et al. (2005) en depósitos de jales más recientes, de Taxco, como el Fraile, Guerrero y Foster, podemos concluir que la mayor diferencia es el menor contenido de las concentraciones promedio de As y Cu; pero mayor contenido de Fe y Zn, en los jales del depósito de Atlistac, que es más antiguo. Las concentraciones totales de Pb son similares entre jales de los depósitos más recientes y el del depósito de Atlistac, que es más antiguo.

Jales superficiales

Los valores de pH indican la existencia de jales superficiales ácidos, medianamente ácidos y prácticamente neutros. Se puede observar que los jales ácidos presentan los valores de conductividad eléctrica más altos; mientras que los neutros presentan los valores de CE más bajos (Figura 5), que podría interpretarse como la menor presencia de sales solubles en estos últimos.

Las concentraciones totales de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) de los jales superficiales y prácticamente neutros (PX0, ZX0, SX4-SX10) del depósito Hacienda de Atlistac-Xochula son relativamente altas (Tabla 6) con valores que varían entre 2873.96-6791.94 ppm para Pb, 326.81-606.45 ppm para As, 116.11-398.47 ppm para Cu, 5162.9-14261.98 ppm para Zn y 11.35-17.51 % para Fe.

Sin embargo en los jales correspondientes a las muestras SX2 y SX3 cuyos valores de pH son medianamente ácidos (pH = 4.51 y 4.69), las concentraciones son mayores para Pb = 3498.66 y 2774.44 ppm, As = 615.18 y 518.66 ppm, Cu = 301.55 y 232.4 ppm, Zn = 5618.09 y 3371.39 ppm; Fe = 20.87% y 18.37%.

En la muestra superficial (SX1), que es la más ácida (pH = 2.51) se determinaron las concentraciones máximas de Pb (8968.15 ppm y As (925.44 ppm); lo que parece indicar que bajo condiciones ácidas se concentran estos elementos de naturaleza tóxica; lo que marca una diferencia sustancial con lo reportado en otros jales más recientes, del Distrito Minero de Taxco,

donde se ha reportado un empobrecimiento de las concentraciones de estos EPT, en jales ácidos, debido a los procesos de lixiviación en condiciones ácidas (Romero et al., 2003 y 2006).

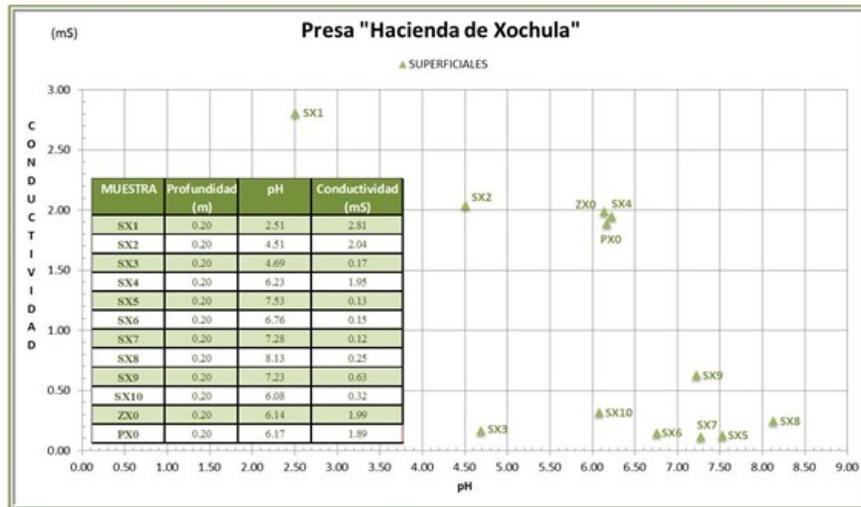


Figura 5. Gráficas de conductividad eléctrica en función del pH de los jales superficiales de Atlistac.

Perfil 1

Al igual que en los jales superficiales, los valores de pH indican la existencia de jales ácidos, medianamente ácidos y prácticamente neutros. Sin embargo, en este perfil los valores de CE son similares y relativamente altos tanto en jales ácidos como medianamente ácidos y neutros (Figura 6).

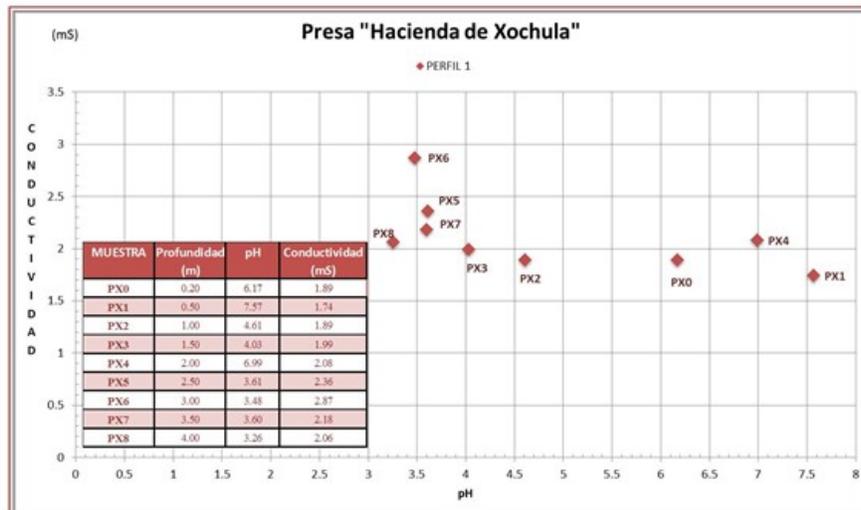


Figura 6. Gráficas de conductividad eléctrica en función del pH de los jales del Perfil 1 de Atlistac

El comportamiento de los valores de concentración total de los EPT de interés se puede observar en la Figura 7. En general se observa el enriquecimiento de las concentraciones totales de As, Pb, Cu y Fe en la parte inferior del perfil. En cambio, el Zn se acumula en la parte media del perfil.

En las muestras denominadas PX0 y PX1 del primer perfil (PX) se midió un pH próximo al neutro (6.17 y 7.57) con concentraciones que tienden a disminuir de: 4008-525 a 1814.99 ppm para Pb, 483.75 a 231.27 ppm para As, 256.36 a 56.93 ppm para Cu, 10896.49 a 10255.89 ppm para Zn y 17.51% a 8.93% para Fe.

A profundidades de 1 y 1.5 m (muestras PX2 y PX3) los valores de pH (4.61 y 4.03) indican que son jales medianamente ácidos. En la tabla 6 se observa una disminución en las concentraciones entre estas dos muestras (Pb de 2680.20 a 2058.64 ppm, As de 340.43 a 243.37 ppm, Cu de 70.12 a 48.88 ppm, Fe de 9.43 a 7.96 % y Zn de 1795.29 a 1603.72 ppm).

La muestra PX4 registra un incremento de pH=6.99, con pequeños aumentos en la concentración de Pb=2261.58 ppm y de Fe=8.96%, pero importantes en la concentración de Zn=31313.21 ppm; contrario a la tendencia de comportamiento homogéneo que se había presentado, en la muestra PX4 se midió una disminución de concentraciones de As=193.48 ppm y de Cu el cual está por debajo del nivel de detección.

En las muestras PX5 y PX6 que tienen un pH más bajo (pH = 3.61 y 3.48), que indican que son jales ácidos, las concentraciones de Pb, As, Cu, Fe y Zn que incrementan gradualmente (Pb de 1764.22 a 2084.66 ppm, As de 303.11 a 410.91 ppm, Cu de 54.43 a 95.70 ppm, Fe de 11.54 a 15.32% y Zn de 1529.51 a 5767.17), sin embargo a pesar de poseer un pH similar (3.60) al de las muestras anteriores, la mayoría de las concentraciones totales de la muestra PX7 son notablemente superiores a las de las muestras PX5 y PX6 (Pb=10031.99 ppm, As=1068.24 ppm, Cu=569.62 y Fe=27.99 %).

Finalmente en la muestra PX8 que tiene un pH ácido (3.26) se midieron concentraciones muy inferiores a las de la muestra PX7, Pb=3414.16 ppm, As=557.12 ppm, Cu=67.03 ppm, Zn=1342.34 y Fe=14.26 %.

El comportamiento geoquímico de este perfil es similar a lo reportado en jales de El Fraile, La Concha y Guerrero, que son más recientes, del Distrito Minero de Taxco (Romero et al., 2003 y 2006), lo que probablemente se deba a la formación de capas de minerales secundarios que gobiernan el transporte de los agentes oxidantes; y que además determinan la movilidad de los diferentes constituyentes en los jales.

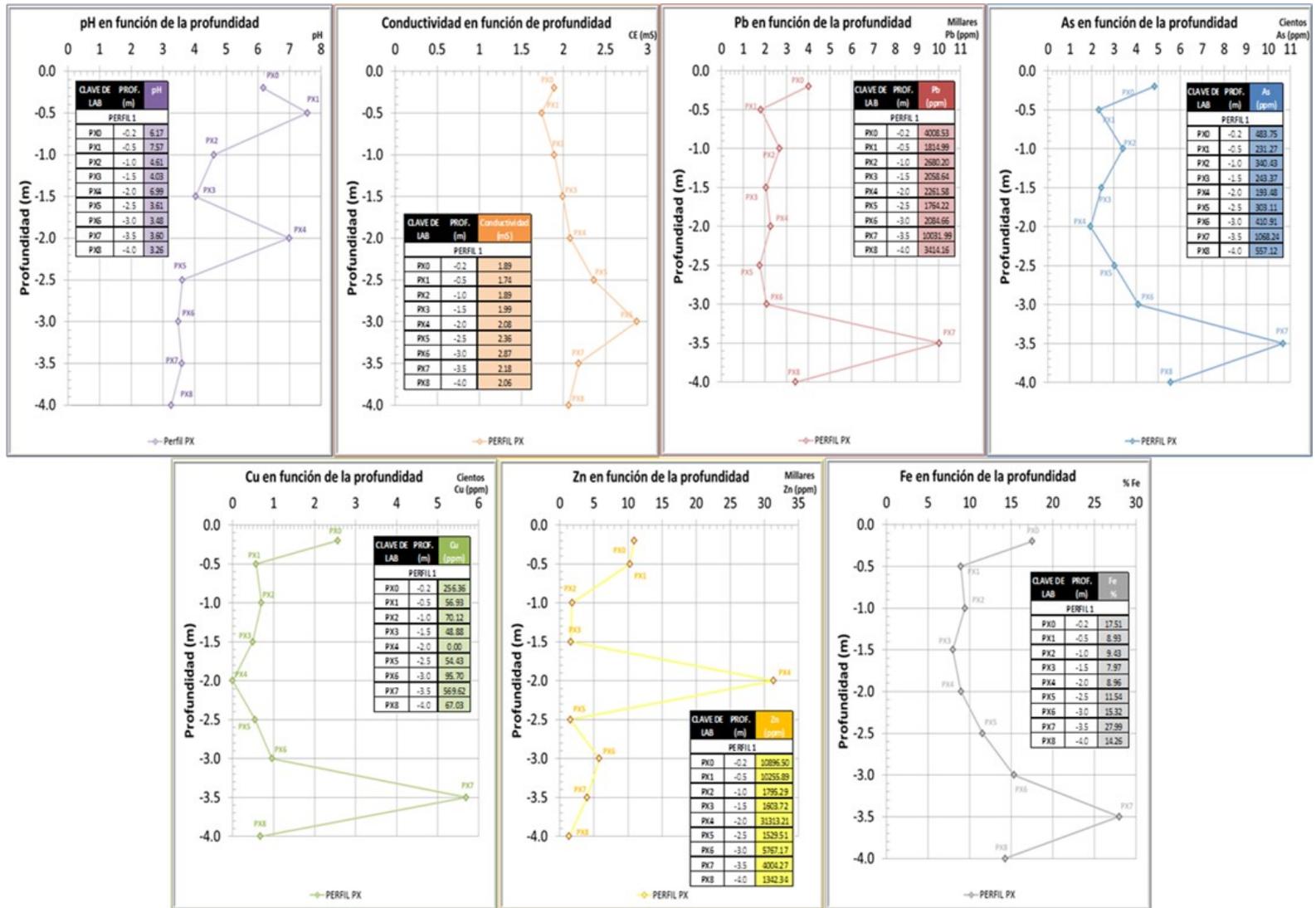


Figura 7. Comportamiento de los valores de pH, conductividad eléctrica y concentraciones totales de EPT en perfil 1 (PX) del depósito de jales Atlistac

Perfil 2

Los valores de pH, en los jales del Perfil 2, indican la existencia de jales ácidos y prácticamente neutros. Sin embargo, este perfil los valores de CE son similares y relativamente altos tanto en jales ácidos como medianamente ácidos y neutros (Figura 8).

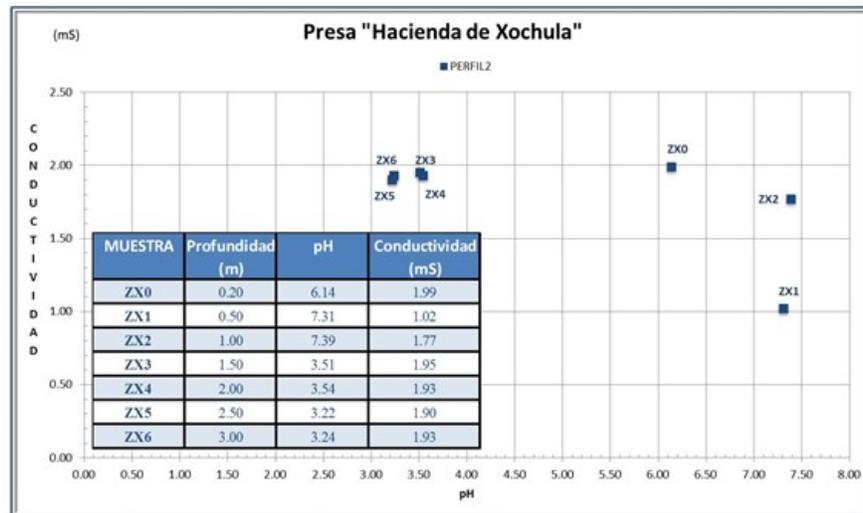


Figura 8. Gráficas de conductividad eléctrica en función del pH de los jales del Perfil 1 de Atlistac

El comportamiento de los valores de concentración total de los EPT de interés se puede observar en la Figura 9. En general se observa el enriquecimiento de las concentraciones totales de As, Pb, Cu, Zn y Fe en la parte superior del perfil. En el caso del Fe, se observa otra acumulación en la parte inferior del perfil.

En el perfil ZX las primeras muestras (ZX0-ZX2) representan una zona donde el pH tiende a ser neutro (6.14-7.39) y éste se incrementa en función de profundidad, con respecto a las concentraciones totales de EPT, se identifica una disminución progresiva en función de la profundidad (Pb de 5048.38 a 924.15 ppm, As de 579.66 a 110.75 ppm, Cu de 268.65 a una concentración por debajo del límite de detección y Fe de 17.51 a 5.79 %).

En las muestras siguientes del perfil ZX (ZX3-ZX6) se cuantificaron valores de pH ácido que oscilan entre 3.22 y 3.51, con concentraciones totales relativamente constantes y en un rango

similar: Pb (1098.63-2292.62 ppm), As (322.48-469.09 ppm), Cu (59.99-70.61 ppm), Fe (104794.84-193268.81 ppm) y Zn (522.45-2025.88).

El comportamiento geoquímico de este perfil es similar a lo reportado en jales de El Fraile, La Concha y Guerrero, que son más recientes, del Distrito Minero de Taxco (Romero et al., 2003 y 2006), lo que probablemente se deba a la formación de capas de minerales secundarios que gobiernan el transporte de los agentes oxidantes; y que además determinan la movilidad de los diferentes constituyentes en los jales.

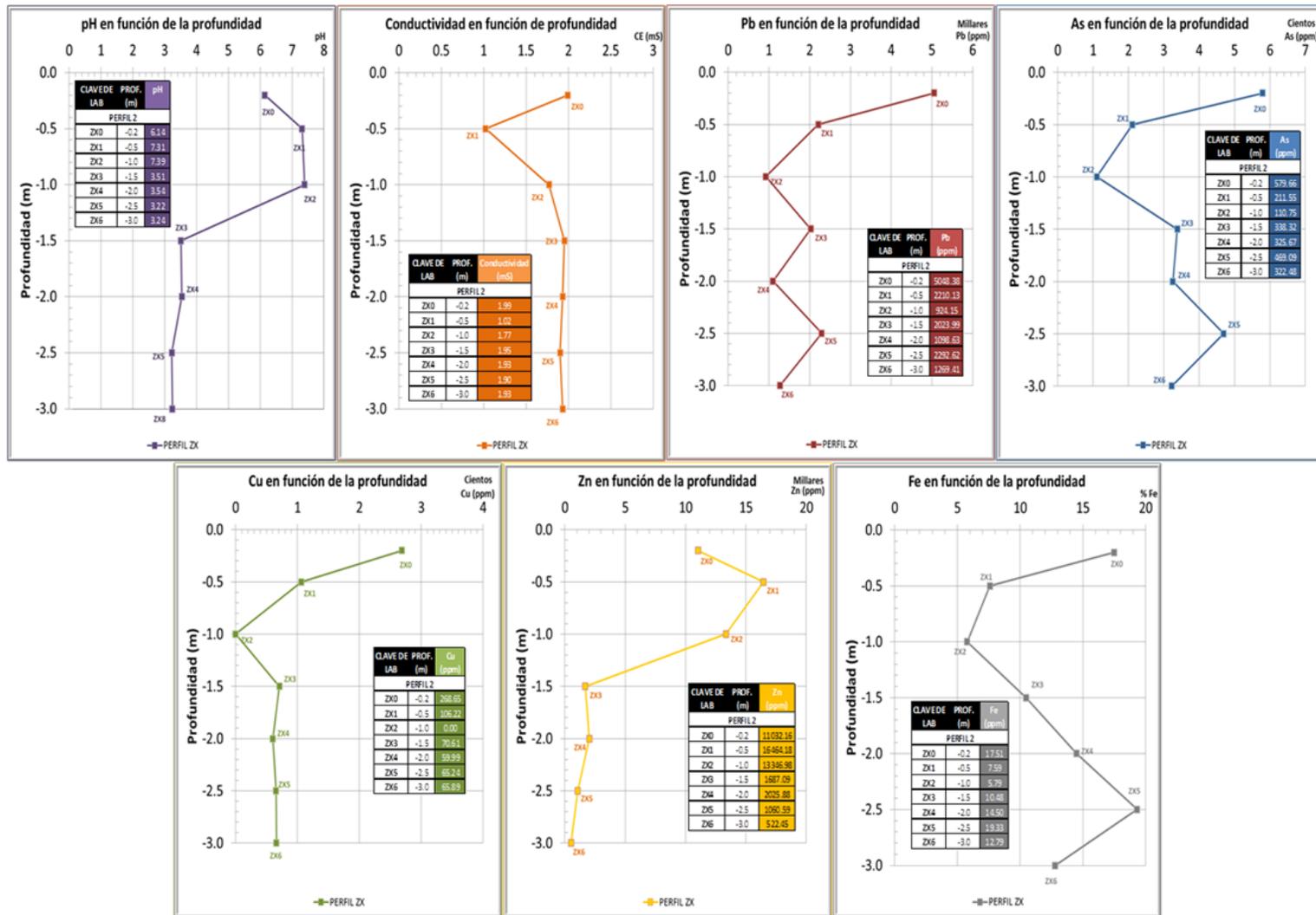


Figura 9. Comportamiento de los valores de pH, Conductividad eléctrica y concentraciones totales de EPT en perfil 2 (ZX) del depósito de jales Atlitac

5.2.2 Presa de Los Remedios

En las Tablas 7 se presentan los valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones totales de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) determinadas en el depósito jales Los Remedios.

Tabla 7. Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones totales de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) determinadas en los depósitos jales Los Remedios

CLAVE DE LAB.	PROFUNDIDAD (m)	Ph	Conductividad (ms)	Pb	As	Cu	Fe	Zn
				(ppm)				
PERFIL 1								
PR0	0.20	3.12	2.13	3575.12	744.58	410.12	261955.77	1384.89
PR1	1.00	3.01	2.07	6547.04	1231.91	321.78	246938.86	671.08
PR2	2.00	2.89	2.26	2805.19	609.78	334.57	308408.43	547.31
PR3	3.00	4.58	2.07	2202.93	408.29	171.38	213571.39	10193.57
PR4	4.00	5.86	2.81	2388.18	570.92	140.54	173662.46	24558.89
PR5	5.00	7.06	1.19	1288.12	137.64	109.25	123273.11	7787.69
PR6	6.00	3.02	1.98	6160.33	1162.34	78.35	301995.05	4357.19
PR7	7.00	2.06	6.14	1829.98	783.87	80.98	256059.57	1963.29
PR8	8.00	2.16	8.65	729.17	314.83	99.20	190663.38	1484.75
PR9	9.00	2.22	5.91	704.07	293.84	69.47	144465.70	1501.44
PR10	10.00	2.56	3.49	1042.83	442.06	0.00	166819.11	624.49
PR11	11.00	2.94	4.66	1263.10	1035.47	91.41	180104.73	2163.19
PR12	12.00	2.74	3.01	1294.88	767.96	0.00	198443.40	1002.54
PR13	13.00	3.02	2.21	1031.86	679.36	63.76	154448.14	896.38
PR14	14.00	2.87	2.35	5085.29	1058.40	401.21	330608.25	1656.26
PR15	15.00	2.54	3.84	2254.84	706.28	315.43	314433.25	1127.35
PR16	16.00	2.36	5.05	5103.66	805.70	643.73	377097.06	2946.45
PR17	17.00	6.76	2.23	5069.11	493.15	727.99	304379.25	7514.75
PR18	18.00	6.87	1.94	5735.84	552.07	803.46	256311.31	6433.05
PERFIL 2								
ZR0	0.20	3.43	1.92	2848.35	824.72	142.62	157127.94	1215.94
ZR1	1.00	3.21	2.05	7933.74	1723.06	514.60	267229.76	2117.68
ZR2	2.00	2.33	8.54	1281.08	294.49	962.23	187880.18	5810.86
ZR3	3.00	2.37	11.13	10567.45	1134.14	1086.63	356856.58	14455.28
ZR4	4.00	5.52	4.02	526.77	102.48	348.97	55227.07	3729.23
ZR5	5.00	3.61	2.40	485.10	120.67	387.82	81565.82	1871.51

SUPERFICIALES								
SR1	0.20	3.18	2.01	5312.54	1280.5	270.45	205352.7	1757.41
SR2	0.20	3.43	1.96	2411.66	816.19	179.63	139457.02	671.85
SR3	0.20	2.47	4.68	4018.23	668.78	524.35	262750.22	2984.44
SR4	0.20	3.00	5.77	10021.40	1017.84	620.92	279582.44	4071.83
SR5	0.20	3.21	2.09	5477.58	890.17	339.74	256127.34	2155.61
SR6	0.20	3.38	1.91	4279.99	660.35	539.81	298615.06	1338.42
SR7	0.20	2.55	2.86	4260.45	746.76	299.77	253221.94	2490.30
SR8	0.20	2.06	5.47	13313.95	1223.3	504.44	247743.69	1991.02

En términos de valores promedio, los jales del depósito Atlistac, el contenido de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) estudiados desciende en el siguiente orden: Fe > Pb > Zn > As > Cu. Con excepción del Zn, en general estas concentraciones totales promedio en los jales del depósito Los Remedios son mayores que las determinadas en los jales del depósito Atlistac.

Si comparamos las concentraciones totales, de los EPT de interés, en los jales de Los Remedios, con los reportados por Talavera et al. (2005) en depósitos de jales más recientes, de Taxco, como el Fraile, Guerrero y Foster podemos concluir que la mayor diferencia es el menor contenido de las concentraciones promedio de As; pero mayor contenido de Fe, en los jales del depósito de Los Remedios, que es más antiguo. Las concentraciones totales de Cu, Pb y Zn son similares entre jales de los depósitos de jales más recientes y el del depósito de Los Remedios, que es más antiguo.

Jales superficiales

Los valores de pH indican la existencia de jales superficiales ácidos (pH = 2.06 - 3.43) y valores de CE relativamente altos que varían entre 1.91 y 5.47 mS/cm. Se puede observar que los jales más ácidos presentan los valores de conductividad eléctrica más altos (Figura 10), que podría interpretarse como la mayor presencia de sales solubles en éstos.

Estos jales ácidos se caracterizan por presentar concentraciones totales de Pb entre 2411.66 y 13313.95 ppm, de As entre 660.75 y 1280.50 ppm, de Cu entre 142.6 y 539.81 ppm, de Fe entre 13.95 y 29.86 %, mientras que para el Zn las concentraciones totales varían entre 671.85 y 4071.83 ppm (Tabla 7).

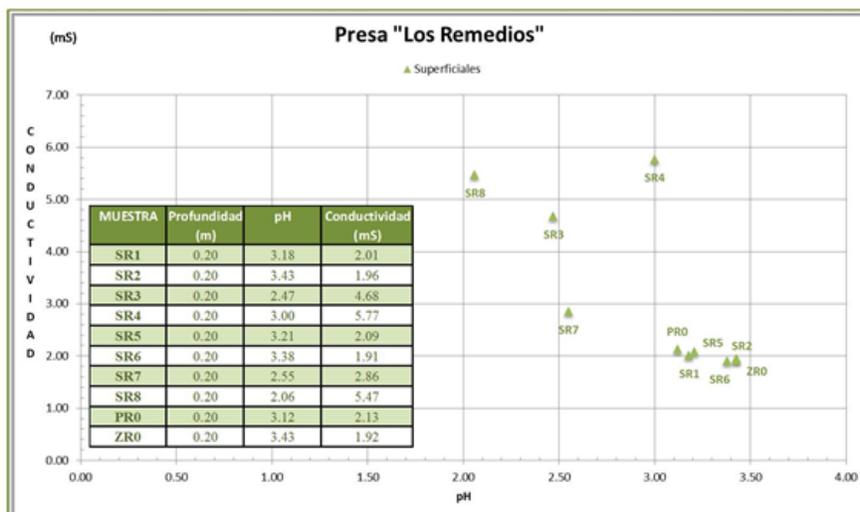


Figura 10. Gráficas de conductividad eléctrica en función del pH de los jales superficiales de Los Remedios.

Perfil 1

Los valores de pH indican la existencia de jales ácidos, medianamente ácidos y prácticamente neutros. Se puede observar que los jales ácidos presentan los valores de conductividad eléctrica más altos; mientras que los neutros presentan los valores de CE más bajos (Figura 11), que podría interpretarse como la menor presencia de sales solubles en estos últimos.

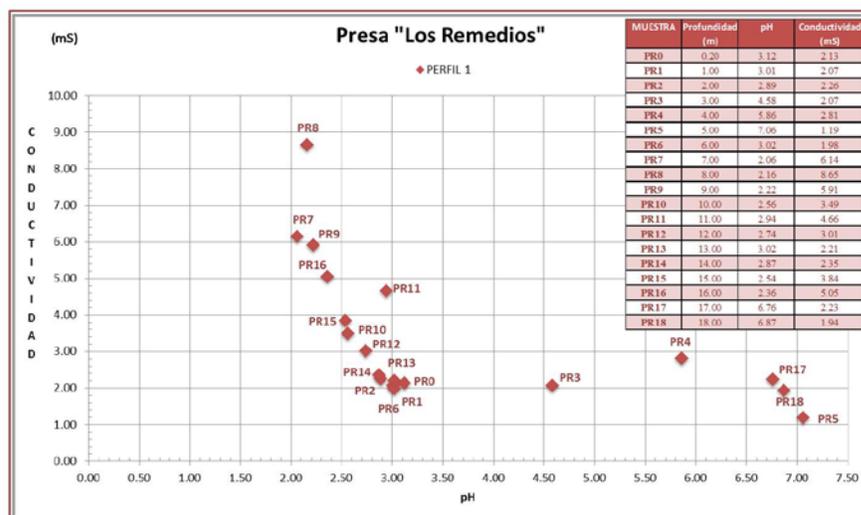


Figura 11. Gráficas de conductividad eléctrica en función del pH de los jales del Perfil 1 de Los Remedios

El comportamiento de la concentración total de los EPT de interés se puede observar en la Figura 12. En general se observa el enriquecimiento de las concentraciones totales de Fe, As y Pb en la parte superior, media e inferior del perfil. En cambio, en el caso de Cu, se observa la mayor acumulación en la parte inferior del perfil y el Zn se acumula en la parte media.

En el perfil 1 (PR) de la presa “Los Remedios” (Tabla 7) se puede observar que las muestras más superficiales (PR0-PR2) son ácidas ($\text{pH} = 2.89\text{-}3.12$), además de caracterizarse por las relativamente altas concentraciones totales de Zn (547.31-1384.89 ppm), Cu (321.78-410.12 ppm), Pb (2805.19-6547.04 ppm), Fe (24.69-30.84 %) y As (609.78- 1231.91 ppm).

En las muestras PR3-PR5, los valores de pH aumentan, conforme incrementa la profundidad, de 4.58 a valores de hasta 7.06; además se observa una disminución en las concentraciones de Pb (de 2388.18 a 1288.12 ppm) As (de 570.92 a 137.64 ppm), Cu (de 171.38 a 109.25 ppm) y Fe (de 21.36 a 12.33 %), sin embargo el comportamiento del Zn es diferente pues en la muestra PR4 su concentración total se eleva de hasta 24558.89 ppm y disminuye a 7787.69 ppm en PR5.

En la muestra PR6 se mide nuevamente un pH ácido (3.02) con un incremento en las concentraciones de Pb (6160.33 ppm), As (1162.34 ppm) y Fe (30.20 %) pero con una disminución en las de Cu (78.35 ppm) y en las de Zn (4357.19 ppm). Aunque las muestras de PR7 a PR13 también tienen un pH ácido (2.06 a 3.02), presentan un comportamiento diferente pues en éstas se cuantificaron bajas concentraciones totales (en comparación a PR6): Para el Pb entre 729.17 y 1829.98 ppm, para el As entre 293.84 y 1035.47 ppm, para Fe entre 14.45 y 25.61 %, para el Zn entre 624.49 y 2136.185 ppm, finalmente al medir el Cu se detectaron muestras cuyas concentraciones se encuentran por debajo del límite de detección.

Las muestras PR14, PR15 y PR16 presentan otro cambio de comportamiento pues a pesar de tener un pH ácido (2.36-2.87) las concentraciones de MMPT se incrementa; a excepción de las del Zn (1127.35-2946.45 ppm) que conserva su comportamiento con respecto al grupo de muestras anteriores. En estas muestras el valor máximo en la concentración de Pb es de 5103.66 ppm, As es de 1058.40 ppm, Cu es de 643.73 ppm y Fe 37.71 %.

Finalmente, las muestras PR17 y PR18 presentan un pH cercano al neutro, con altas concentraciones totales de Pb, As, Cu, Fe y Zn.

El comportamiento geoquímico de este perfil es similar a lo reportado en jales de El Fraile, La Concha y Guerrero, que son más recientes, del Distrito Minero de Taxco (Romero et al., 2003 y 2006), lo que probablemente se deba a la formación de capas de minerales secundarios que gobiernan el transporte de los agentes oxidantes; además de que limitan la movilidad de los constituyentes de los jales. Sin embargo, el hecho de que en jales ácidos se determinaron las mayores concentraciones totales de EPT parece indicar que bajo condiciones ácidas se concentran estos elementos de naturaleza tóxica; lo que marca una diferencia sustancial con lo reportado en otros jales más recientes, del Distrito Minero de Taxco, donde se ha reportado un empobrecimiento de las concentraciones de estos EPT, en jales ácidos, debido a los procesos de lixiviación en condiciones ácidas (Romero et al., 2003 y 2006).

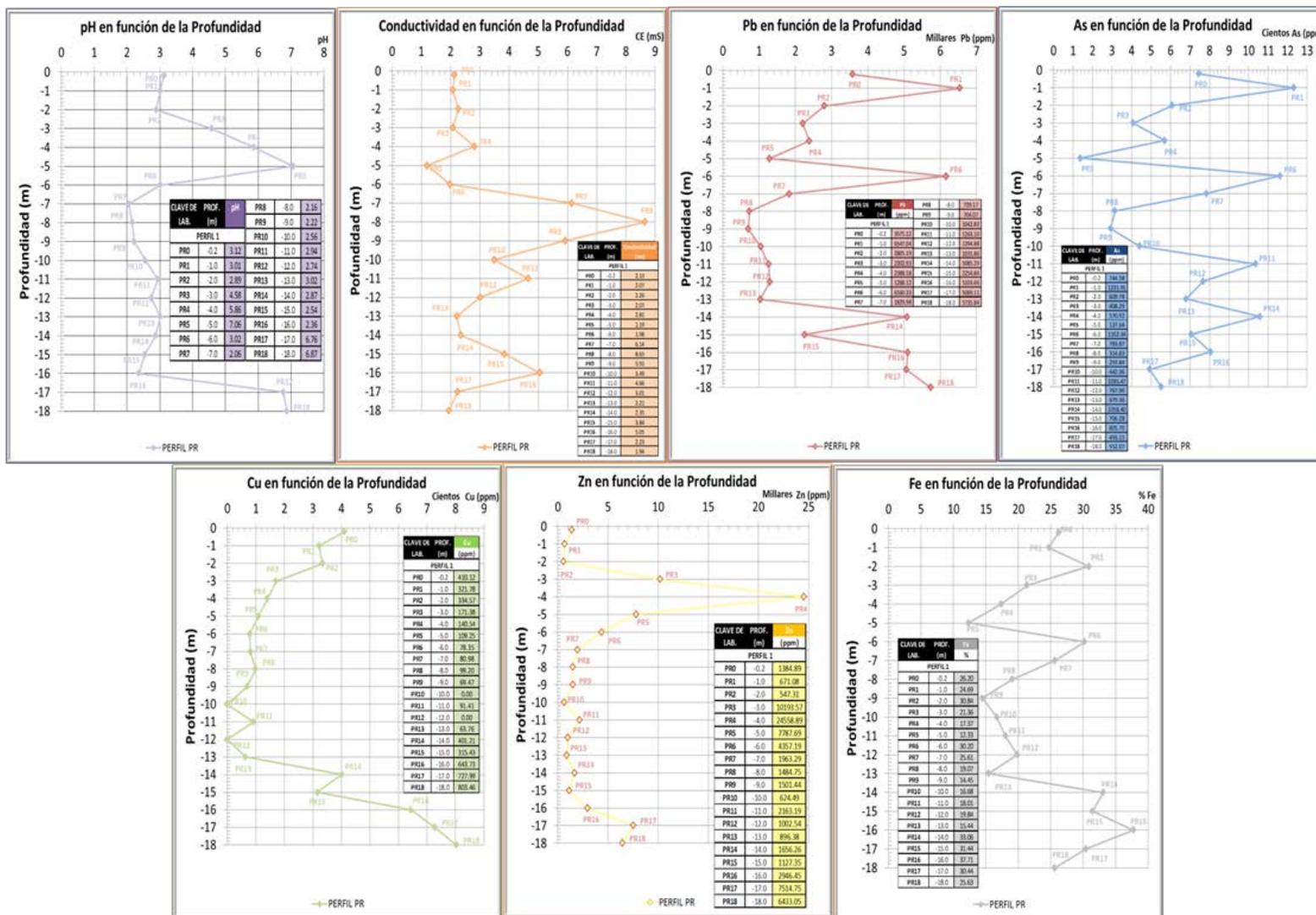


Figura 12. Comportamiento de los valores de pH, Conductividad eléctrica y concentraciones totales de EPT en perfil 1 (PR) del depósito de jales Los Remedios

Perfil 2

El comportamiento de los valores de concentración total de los EPT de interés se puede observar en la Figura 13. En general se observa el enriquecimiento de las concentraciones totales de As y Pb en la parte superior y media del perfil. En cambio, las concentraciones de Cu, Zn y Fe muestran la mayor acumulación en la parte media del perfil.

En el perfil 2 denominado ZR, de la presa “Los Remedios” (Tabla 7), todas las muestras tienen a un pH ácido que varía entre 2.33 y 5.52. En las primeras dos muestras superficiales (ZR0 y ZR1), que tienen un pH 3.43 y 3.21, se midió un incremento notable de las concentraciones totales: para el Pb de 2848.35 a 7933.74 ppm, para el As de 824.72 a 1723.06 ppm, para el Cu de 142.62 a 514.6 ppm, para Fe de 15.71 a 26.72 % y finalmente para Zn de 1215.99 a 2117.68 ppm.

En las siguientes dos muestras (ZR2 y ZR3) que se encuentran a 2.0 y 3.0 m de profundidad se midió una disminución en el pH con respecto a las muestras superiores, con valores de 2.33 y 2.37 respectivamente; además de una disminución de la concentración total de Pb, As, Fe y Zn entre las muestras ZR1 y ZR2. La concentración total se incrementa entre las muestras ZR2 y ZR3, con valores para Pb de 1281.08 a 10 567.45 ppm, para As de 294.49 a 1134.14 ppm, para Cu 962.23 a 1086.65 ppm, para Fe de 18.79 a 35.69% y finalmente Zn de 5810.86 a 14455.28 ppm.

Las muestras ZR4 y ZR5 tienen un pH ácido (5.52 y 3.64) ligeramente superior al de las muestras ZR2 y ZR3 con concentraciones totales pequeñas en comparación a las de la muestra ZR3. En estas muestras la concentración de Pb oscila entre 526.77 y 485.10 ppm, la de As entre 102.48 y 120.67 ppm, la del Cu entre 348.97 y 387.82 ppm, la del Fe entre 5.52 y 8.16 %, mientras que la del Zn se midió entre 3729.23 y 1871.51 ppm.

El comportamiento geoquímico de este perfil es similar a lo reportado en jales de El Fraile, La Concha y Guerrero, que son más recientes, del Distrito Minero de Taxco (Romero et al., 2003 y 2006), lo que probablemente se deba a la formación de capas de minerales secundarios que gobiernan el transporte de los agentes oxidantes; y que además determinan la movilidad de los diferentes constituyentes en los jales.

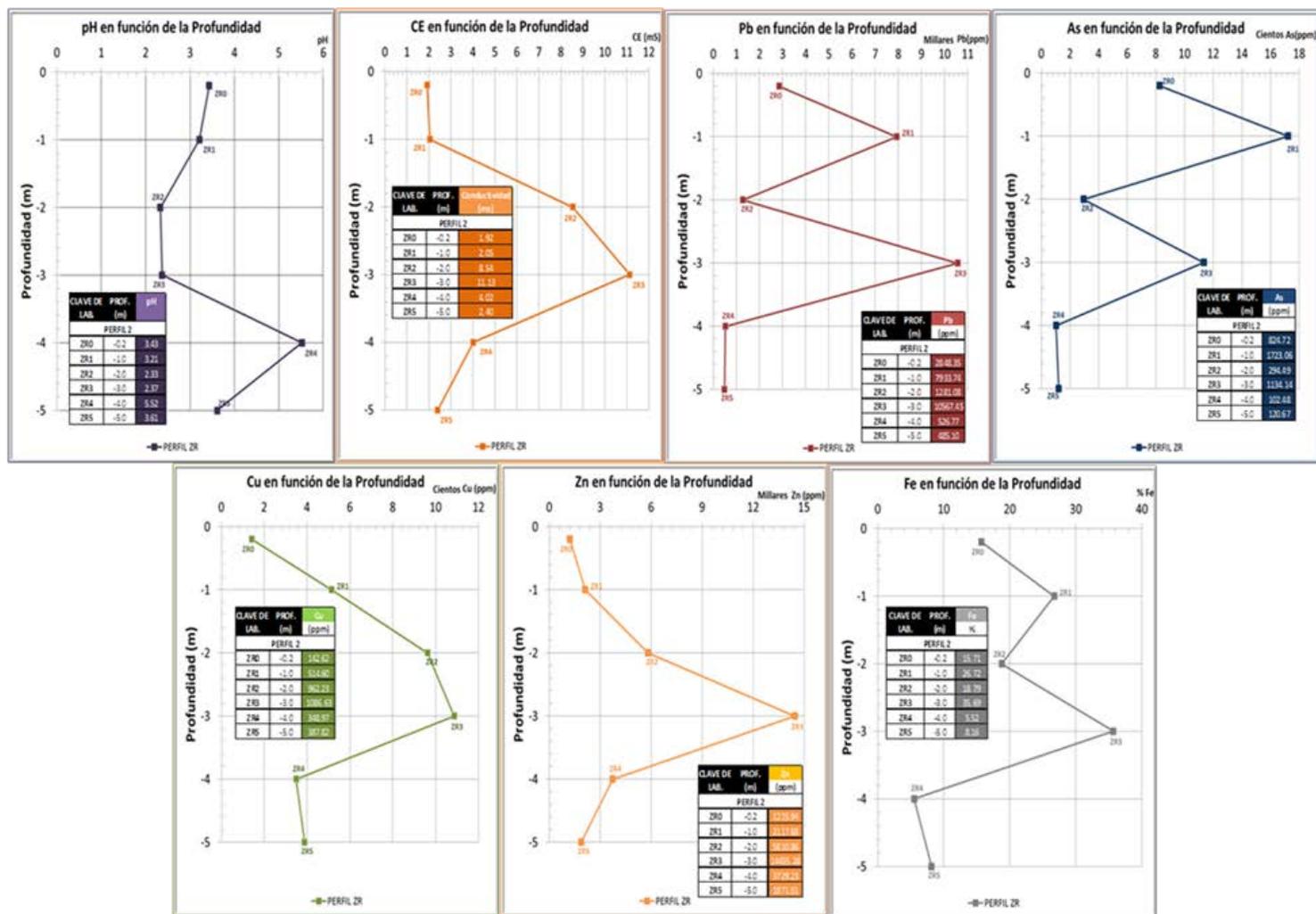


Figura 13. Comportamiento de los valores de pH, Conductividad eléctrica y concentraciones totales de EPT en perfil 2 (ZR) del depósito de jales Los Remedios

5.3 Concentración geodisponible de los elementos tóxicos asociados a los sulfuros metálicos

En la Tabla 8 y en las Figuras 14 y 15 se presentan las concentraciones geodisponibles de EPT de los depósitos de jales de interés de los depósitos Atlistac y Los Remedios.

En los jales de Atlistac se determinaron concentraciones variables de Pb (0.0005- 0.364 mg/L), As (0.00008-0.00287 mg/L), Cu (0.0008-0.0755 mg/L), Fe (0.010-2.020 mg/L), Zn (0.0446-58.1 mg/L) y Cd (0.00108-1.78 mg/L) en tanto que los resultados en la presa Los Remedios son: Pb (0.00045-1.99 mg/L), As (0.00037-21.3 mg/L), Cu (0.0013-7.89 mg/L), Fe (0.050-364 mg/L), Zn (0.162-142 mg/L) y Cd (0.00406-2.26 mg/L).

Las mayores concentraciones geo-disponibles de los EPT de interés se determinaron en los jales ácidos, lo que permite concluir que el drenaje ácido que se pueda formar en estos jales se caracterizaría por la presencia de estos contaminantes en forma soluble. Sin embargo, en muestras de jales, prácticamente neutros, se determinaron valores relativamente altos de concentración geodisponible de Zn y Cd, lo que permite concluir que el drenaje neutro, que pudiera generar, se caracterizaría por la presencia de estos metales, lo que podría representar un riesgo para el ambiente.

En términos de valores de tendencia central, los valores de pH y de las concentraciones geodisponibles de EPT, para los jales de Atlistac son: pH = 5.98, Pb = 0.09706 mg/L, As = 0.00145 mg/L, Cu = 0.02191 mg/L, Fe = 0.24176 mg/L, Zn = 8.4667 mg/L y Cd = 0.20174 mg/L. Para los jales de Los Remedios se determinaron los siguientes valores promedio: pH = 3.34, Pb = 0.41806 mg/L, As = 0.00626 mg/L, Cu = 3.1161 mg/L, Fe = 36.064 mg/L, Zn = 30.282 mg/L y Cd = 0.43807 mg/L. Estos resultados indican que los lixiviados de los jales Los Remedios son más ácidos y contienen mayores concentraciones de EPT disueltos que los lixiviados de los jales Atlistac.

Para el caso de los elementos regulados en la normatividad ambiental mexicana (As, Pb y Cd) en materia de jales (NOM-141, SEMARNAT 2004)¹¹, se concluye que estos jales no son peligrosos pues sus lixiviados poseen concentraciones inferiores a los límites máximos permisibles. Sin embargo, las concentraciones de los otros metales que no están regulados como el Cu, Fe y Zn son relativamente altas y su dispersión puede representar un riesgo para el entorno.

¹¹LMP_{arsénico} = 5.0 mg/L, LMP_{cadmio} = 1.0 mg/L, LMP_{plomo} = 5.0 mg/L A pesar de que el cobre, zinc y hierro no están regulados en la NORM- 141, se deberían realizar estudios para determinar en qué concentraciones son capaces de afectar a los organismos y al medio ambiente.

Tabla 8. Geodisponibilidad de EPT.

Claves de Lab.	Claves Canadá	Profundidad (m)	pH	Pb mg/L	As mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Zn mg/L	Cd mg/L
Límite de Detección				0.00001	0.00003	0.0002	0.010	0.0005	0.00001
HACIENDA DE ATLISTAC									
SX1	X1	0.20	2.51	0.940	0.00268	0.0754	2.020	2.420	0.0344
SX2	X2	0.20	4.51	0.0898	0.00128	0.0305	0.240	23.900	0.269
SX3	X3	0.20	4.69	0.0146	0.00079	0.0208	0.050	2.640	0.0278
SX4	X4	0.20	6.23	0.00176	0.00083	0.0083	0.240	10.500	0.159
SX5	X5	0.20	7.53	0.00114	0.00131	0.0072	< 0.050	0.0917	0.00163
SX6	X6	0.20	6.76	0.00199	0.00199	0.0052	< 0.010	0.790	0.00706
SX7	X7	0.20	7.28	0.00128	0.00222	0.0067	< 0.010	0.0447	0.00108
SX8	X8	0.20	8.13	0.00239	0.00287	0.0155	< 0.010	0.0446	0.00167
SX9	X9	0.20	7.23	0.00074	0.00024	0.0016	< 0.010	0.207	0.00917
SX10	X10	0.20	6.08	0.0186	0.00251	0.0343	0.140	2.520	0.0224
PX0	X11	0.20	6.17	0.00076	0.00213	0.0089	< 0.010	7.430	0.234
PX1	X12	0.50	7.57	0.00207	0.00017	0.0008	< 0.010	0.126	0.00817
PX4	X13	2.00	6.99	0.00651	0.00008	0.0017	< 0.010	58.100	1.780
PX8	X14	4.00	3.26	0.201	0.00275	0.0755	0.260	22.700	0.410
ZX0	X15	0.20	6.14	0.00282	0.000081	0.0042	0.340	4.700	0.291
ZX2	X16	1.00	7.39	0.0005	< 0.0001	0.0019	0.430	5.520	0.130
ZX5	X17	2.50	3.22	0.364	0.00193	0.0739	0.270	2.200	0.0432
LOS REMEDIOS									
SR1	R1	0.20	3.18	0.0386	0.00428	0.0872	0.070	0.656	0.00705
SR2	R2	0.20	3.43	0.746	0.00271	0.0473	< 0.050	0.175	0.00437
SR3	R3	0.20	2.47	0.0464	0.0102	10.100	1.370	95.5	1.790
SR4	R4	0.20	3.00	0.683	0.00525	7.890	< 0.050	150	2.260
SR5	R5	0.20	3.21	0.606	0.001	0.0548	< 0.050	0.528	0.0112
SR6	R6	0.20	3.38	0.586	0.00113	0.163	< 0.050	0.416	0.00438
SR7	R7	0.20	2.55	0.0248	0.00263	0.311	0.750	1.53	0.018
SR8	R8	0.20	2.06	0.014.3	0.0283	1.330	172	9.4	0.0512
PR0	R9	0.20	3.12	0.469	0.00125	0.162	< 0.050	0.724	0.0118
PR5	R10	5.00	7.06	0.00045	0.00037	0.0013	< 0.050	0.162	0.0219
PR6	R11	6.00	3.02	0.778	0.00744	0.0139	0.110	0.946	0.0211
PR16	R12	16.00	2.36	1.990	0.0054	2.620	2.210	31.3	0.382
ZR0	R13	0.20	3.43	0.281	0.00206	0.0168	0.100	0.196	0.00406
ZR2	R14	2.00	2.33	0.00683	21.3	23.9	364	142	1.420
ZR4	R15	4.00	5.52	0.00047	0.65	0.0448	< 0.050	20.7	0.564
Mínimo Hacienda de Atlistac			2.51	0.0005	0.00008	0.0008	0.010	0.0446	0.00108
Máximo Hacienda de Atlistac			7.57	0.364	0.00287	0.0755	2.020	58.100	1.780
Media Hacienda de Atlistac			5.98	0.09706	0.00145	0.02191	0.24176	8.4667	0.20174
Mínimo Los Remedios			2.06	0.00045	0.00037	0.0013	0.050	0.162	0.00406
Máximo Los Remedios			7.06	1.990	21.3	7.890	364	142	2.260
Media Los Remedios			3.34	0.41806	0.00626	3.1161	36.064	30.282	0.43807

5.4 Cálculo del Potencial de Neutralización Neto (PNN) en los jales neutros de los depósitos de Hacienda de Atlistac y Los Remedios.

Basándose en el criterio de la Norma Oficial Mexicana 141 (SEMARNAT, 2004) se realizó la evaluación de Generación de Potencial Ácido de los dos depósitos de jales “Atlistac y Los Remedios”.

Los resultados de las pruebas de balance ácido-base de ambas presas se pueden observar en la Tabla 9. En estos se identifica un Potencial de Acidez (PA) mayor al Potencial de Neutralización (PN) en prácticamente todas las muestras tanto el depósito Atlistac como en el de Los Remedios.

Según la interpretación dada en la NOM_141 de la SEMARNAT, si el coeficiente $PN/PA \leq 1.2$ entonces los jales son potenciales productores de Drenaje Ácido (DA).

Los valores de PN/PA para los jales neutros de “Atlistac” éstos varían entre 0 y 0.87, lo que indica que el potencial de acidez (PA) es mayor que el potencial de neutralización (PN), por lo que se puede concluir que aún pueden generar drenaje ácido.

Los valores de PN/PA es de 1.46 en la única muestra con un pH neutro del depósito Los Remedios, lo que indica que este depósito no será generador de acidez; según la NOM_141 de la SEMARNAT, pero probablemente en la actualidad sea generador de DA al carecer de elementos neutralizadores identificable por pH ácidos en las muestras analizadas.

5.5 Caracterización mineralógica de los jales de los depósitos Atlistac y Los Remedios.

Los resultados de los análisis de Difracción de Rayos X (DRX) se presentan en la Tabla 10 y en las figuras 14 y 15. El análisis por DRX es cualitativo y la simbología “XX” en la Tabla 10 indica la abundancia relativa del mineral en la muestra es decir mientras mayor sea el número de “X” en la tabla mayor fue el pico del elemento en las gráficas. La diagonal “/” señala la presencia de trazas o una incertidumbre sobre la existencia de algún mineral.

Tabla 9 Resultados de la prueba de Balance Ácido-Base en muestras de jales Atlistac y Remedios

Muestra	pH	S mg/Kg	SO ₄ ²⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/Kg	S %	SO ₄ ²⁻ %	S ²⁻ %	PA	PN	PN/PA
Hacienda de Atlistac										
SX4	6.23	52613.83	1723.95	34478.98	5.26	3.45	1.81	56.67	0.00	0.00
SX5	7.53	29287.93	9.75	195.00	2.93	0.02	2.91	90.92	22.50	0.25
SX6	6.76	28811.73	19.50	390.01	2.88	0.04	2.84	88.82	9.25	0.10
SX7	7.28	28957.81	12.19	243.75	2.90	0.02	2.87	89.73	35.75	0.40
SX8	8.13	24451.11	10.36	207.19	2.45	0.02	2.42	75.76	66.25	0.87
SX9	7.23	30644.97	145.64	2912.86	3.06	0.29	2.77	86.66	12.00	0.14
SX10	6.08	15930.15	40.39	807.82	1.59	0.08	1.51	47.26	0.00	0.00
PX0	6.17	58472.16	567.95	11358.93	5.85	1.14	4.71	147.23	0.00	0.00
PX1	7.57	43053.13	1644.12	32882.39	4.31	3.29	1.02	31.78	0.00	0.00
PX4	6.99	62457.05	1531.20	30624.01	6.25	3.06	3.18	99.48	30.75	0.31
ZX0	6.14	144202.63	1670.93	33418.65	14.42	3.34	11.08	346.20	0.00	0.00
Los Remedios										
PR5	7.06	33463.22	1007.92	20158.44	3.35	2.02	1.33	41.58	60.50	1.46

TABLA 10. Mineralogía de los jales de Atlistac y Los Remedios, por DRX

MUESTRA	Feldespato	Cuarzo <i>SiO₂</i>	Yeso <i>CaSO₄2H₂O</i>	Alunita	Jarosita <i>KFe₃(SO₄)₂(OH)₆</i>	Filosilicatos	Fluorita <i>CaF₂</i>
X1/SX1		XXX	XX		X		
X3/SX3		XXX	XX		X	/	
X6/SX6		XXX				/	X
X15/ZX0	/	XXX	XX		X		
R3/SR3	/	XXX	XX		X	/	
R8/SR8		XX	XXX		X		
R10/PR5		XXX	XX			/	X
R14/ZR2		XXX	XX	/	X	/	

En la Tabla 10 se observa que el cuarzo es el mineral primario de mayor abundancia seguido por el yeso; el cual es la consecuencia el mineral secundario más abundante. En estas muestras también se detecta Jarosita, que es un mineral secundario capaz de retener elementos potencialmente tóxicos (Blowes et al., 1990. Lin 1997. McGregor et al., 1998 y Bain et al. 2000). Es importante notar la presencia de fluorita en algunas muestras y trazas de filosilicatos y feldespatos.

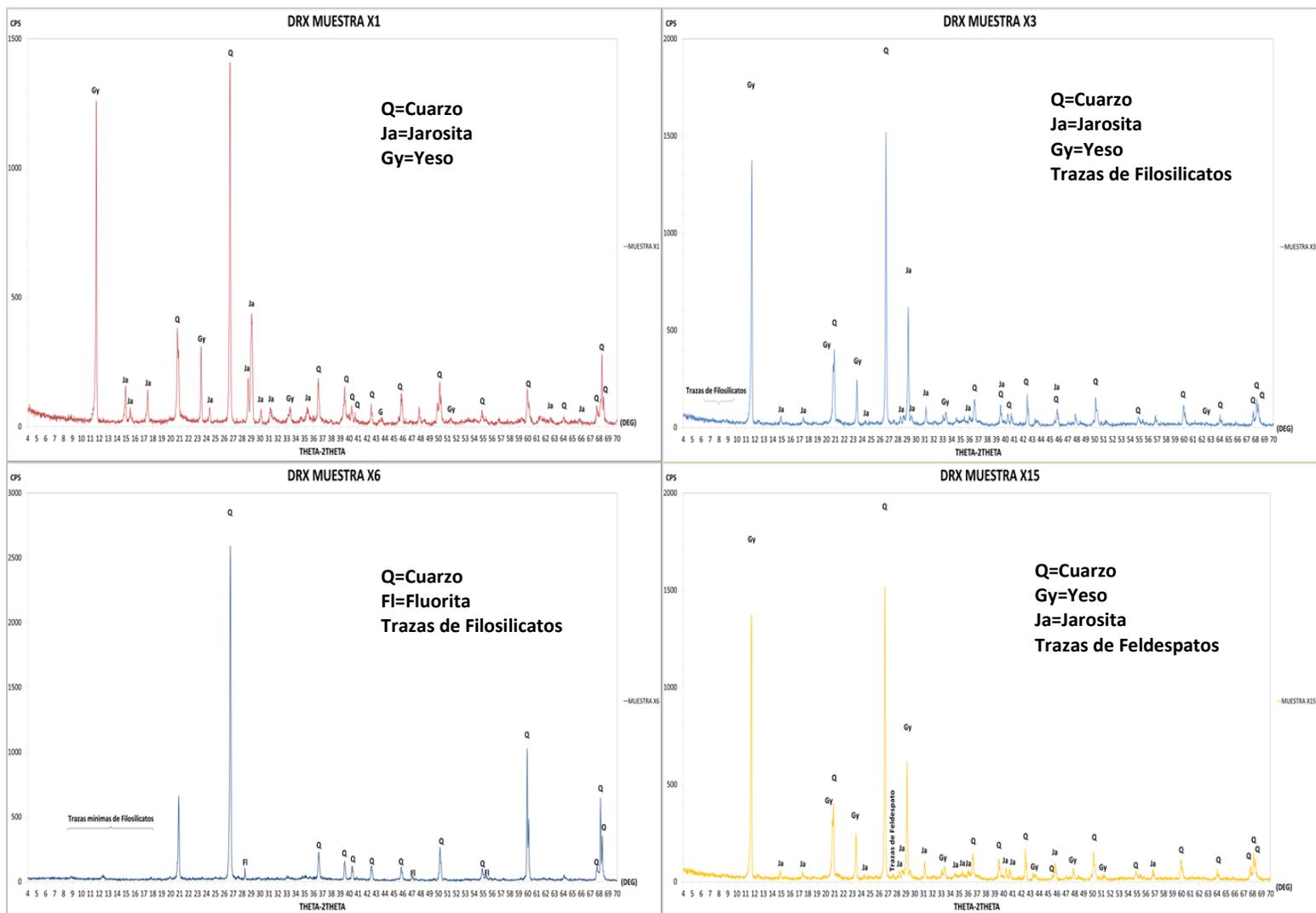


Figura 14. Difracción de Rayos X de la presa Hacienda de Atlistac.

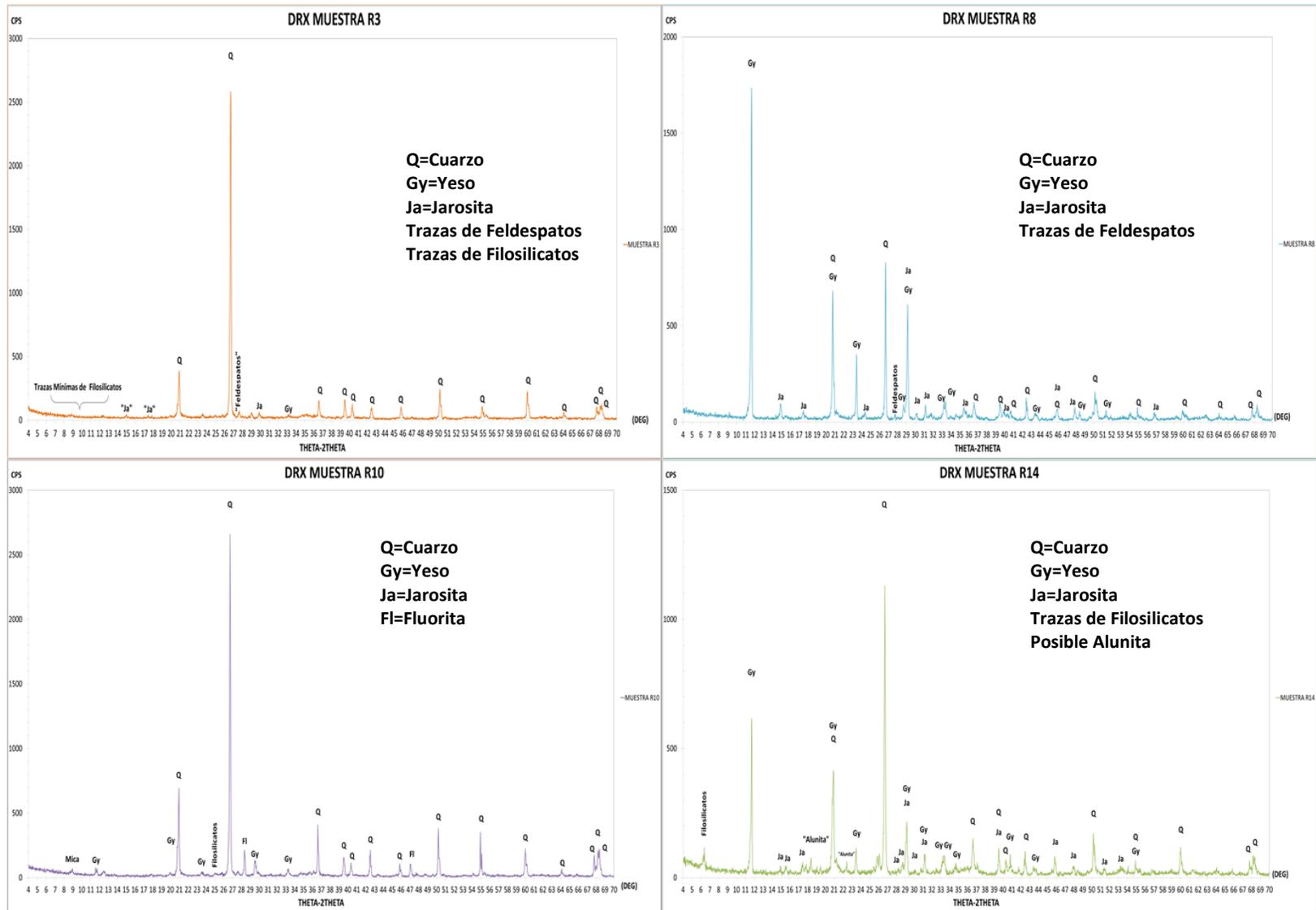


Figura 15. Difracción de Rayos X de la presa “Los Remedios”.

5.6 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido Acoplada con Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS)

Con el objetivo de inferir los posibles procesos geoquímicos que gobiernan la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos en los jales de estudio, se seleccionaron muestras representativas de los dos depósitos estudiados para realizar microanálisis, utilizando la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido Acoplada con Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS)

5.6.1 Jales del depósito Atlistac

Se seleccionaron muestras con valores de pH ácidos, medianamente ácidos y prácticamente neutros y relativamente con altas concentraciones totales de Fe, Pb y Zn.

Jales ácidos: Muestras PX8 (pH = 3.26) y PX7 (pH = 3.60)

En las dos muestras ácidas analizadas, los resultados que se presentan en la Tabla 11.a y 11.b, indican la presencia de dos tipos de partículas: (i) Partículas con predominio de Fe con cantidades variables de S y K (Partículas Fe-S-K). (ii) Partículas con predominio de Si con cantidades importantes de Fe y pequeñas cantidades de S (Partículas Si-Fe). Adicionalmente, en la muestra PX7 se identificaron 2 partículas con predominio de Ca y S (Partículas Ca-S).

- Partículas Fe-S-K: De las 33 partículas analizadas en las dos muestras de jales ácidos, 23 son del tipo Fe-S-K (Figura 16). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de jarosita potásica, que sería un mineral secundario de Fe que precipitó producto de la oxidación de los sulfuros metálicos (Romero et al., 2007).
- Partículas Si-Fe: De las 33 partículas analizadas en las dos muestras de jales ácidos, sólo solo 7 corresponden a las partículas tipo Si-Fe (Figura 16). Este tipo de partículas parece el producto de la mezcla mecánica de minerales secundarios de Fe con cuarzo. Este tipo de mezclas mecánicas es común en este tipo de análisis debido a que haz de rayos X puede atravesar varias partículas superpuestas (Romero et al., 2014).

- Partículas Ca-S: De las 18 partículas analizadas en la muestra PX7, sólo solo 2 corresponden a las partículas tipo Ca-S (Figura 16c). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de yeso, que es un mineral secundario muy común en jales oxidados ácidos (Blowes et al. 1990, Romero et al., 2007)

Es importante notar que, asociados al mineral secundario de Fe, con presencia abundante en los jales ácidos analizados, no se identificaron elementos de naturaleza tóxica (As y Pb) y otros metales pesados, asociados a los sulfuros (Cu y Zn). Sin embargo la presencia de Mo y Br en la muestra PX7 se debe considerar para futuros estudios.

Tabla 11 a. Análisis por MEB de la muestra PX8 (pH = 3.26)

PX8	Weight (%)				
	Al	Si	S	K	Fe
1 ^a		10.0	4.1		85.8
1b		29.1			70.9
1c					100.0
1d		7.1			92.9
1e		10.5			89.5
1f			4.2		95.8
2 ^a					100.0
2b		76.3	2.3		21.4
2c		3.8	6.6		89.6
2d	6.2	18.8	4.7		70.2
3 ^a	5.3	11.6	14.4	4.7	64.1
3b		8.8	9.7	7.9	73.6
3c		74.3			25.7
3d		3.4	1.9		94.7
3e		3.2	1.4		95.4

Tabla 11 b. Análisis por MEB de la muestra PX7 (pH = 3.60)

PX7	Weight (%)							
	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Mo	Br
1 ^a		6.1				93.9		
1b	9.1	79.5		4.7		6.7		
1c		3.0	38.3		51.6	7.2		
1d	5.2	11.0	4.6			79.1		
1e		3.6	2.8			93.6		
2 ^a		77.8				22.2		
2b						100.0		
2c	5.3	22.7		8.2		63.8		
2d		91.2				8.8		
2e	2.1	4.7	32.3		34.5	26.4		
2f		18.4	18.1	4.0		59.5		
3 ^a						100.0		
3b		79.9				20.1		
3c		36.3		10.6		26.6	6.2	20.2
3d		2.0				98.0		
3e		16.9	2.5			80.7		
3f		2.9	15.7	2.6	12.1	66.7		
3g						100.0		

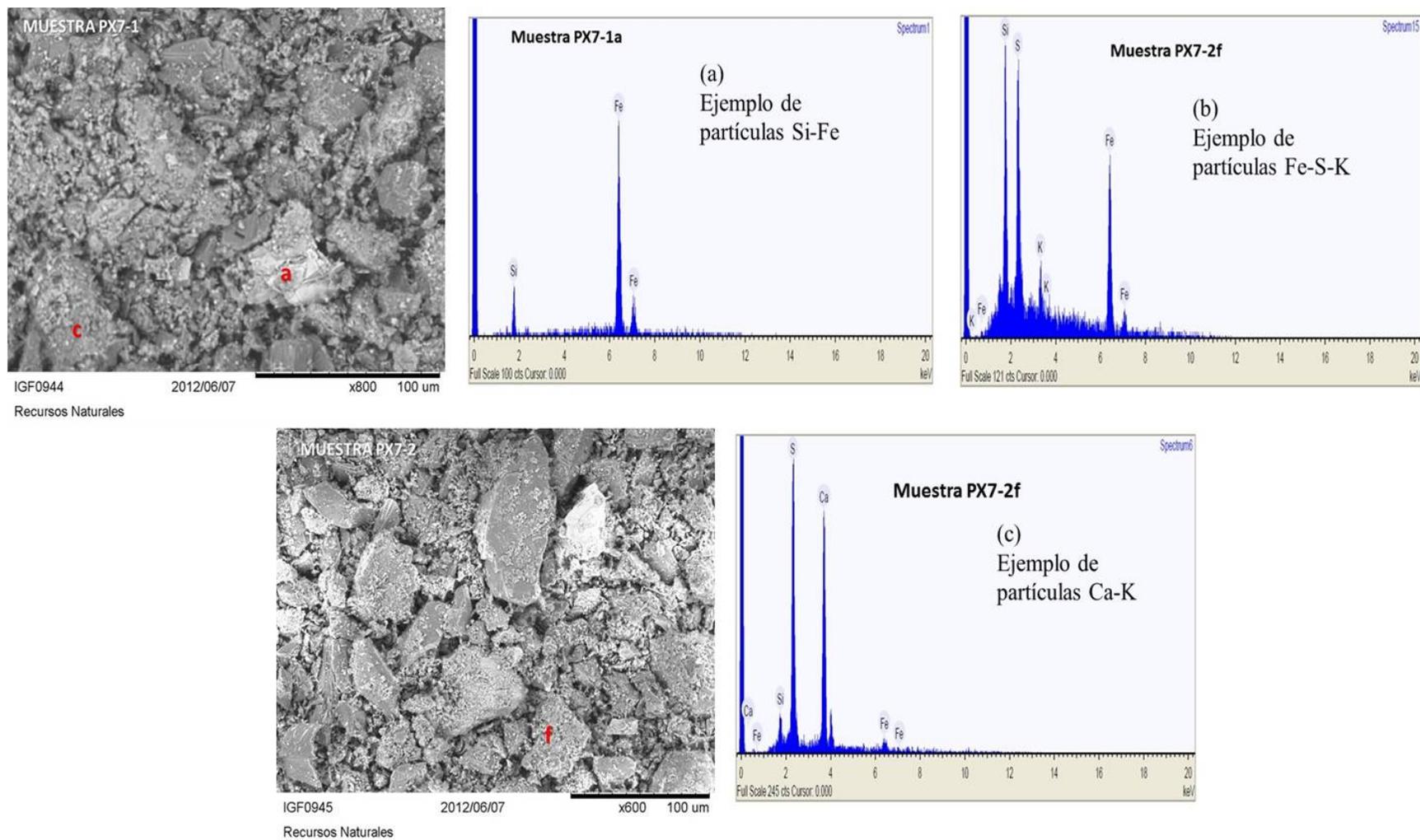


Figura 16. Imágenes de MEB-EDS de los jales ácidos del depósito de Atlistac: (a) Ejemplo de partículas Fe-Si; (b) Ejemplo de partículas Fe-Si, (c) Ejemplo de partículas Ca-S.

Jales Medianamente ácidos: Muestras SX3 (pH = 4.69)

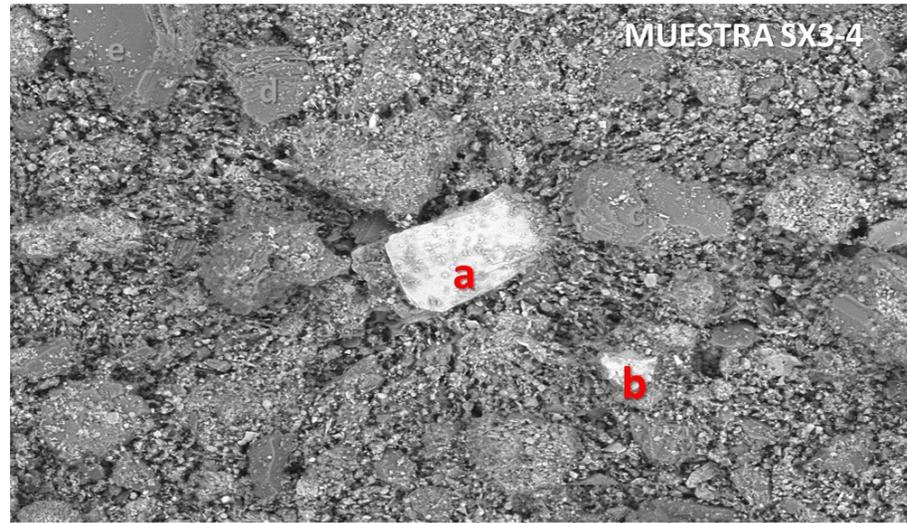
Los resultados que se presentan en la Tabla 12, indican la presencia de 5 tipos de partículas: (i) Partículas con predominio de Fe con cantidades variables de S y K (Partículas Fe-S-K). (ii) Partículas con predominio de Fe con retención de Mo. (iii) Partículas con predominio de Fe y Si con cantidades variables de S y Al (Partículas Si-Fe-S). (iv) Partículas con predominio de Ca y S (Partículas Ca-S) y (v) Partículas con predominio de Zn y Cu.

- Partículas Fe: Destaca la presencia de una partícula con más del 95 % de Fe, que puede asociarse a un oxi-hidróxido de este metal, dado que el Microscopio Electrónico utilizado no permite la identificación de H y O. Así mismo, asociado a esta partícula se identificó Mo (Figura 17a), que, aunque no esté regulado en la normatividad ambiental mexicana, amerita que sean considerado sean estudiados futuros.
- Partículas Fe-S-K: De las 25 partículas analizadas, 11 son del tipo Fe-S-K. Esta asociación elemental permite inferir la presencia de jarosita potásica, que sería un mineral secundario de Fe que precipitó producto de la oxidación de los sulfuros metálicos. Es importante notar que, asociados al mineral secundario de Fe, inferido como jarosita, se identificó una cantidad importante de Pb (Figura 17a), lo que permite especular que la jarosita es un control eficiente de la movilidad del plomo; ya que de una concentración total de plomo de 2774 mg/kg (Tabla 6) solo están disponibles 0.0146 mg/L (Tabla 8 de este documento).
- Partículas Si-Fe-S: De las 25 partículas analizadas en las dos muestras de jales ácidos, 9 corresponden a las partículas tipo Si-Fe-S. Este tipo de partículas parece el producto de la mezcla mecánica de minerales secundarios de Fe con cuarzo. Este tipo de mezclas mecánicas es común en este tipo de análisis debido a que haz de rayos X puede atravesar varias partículas superpuestas (Romero et al., 2014). Es importante notar que, asociados a este tipo de partículas se identificó al Mn (Figura 17b), lo que permite concluir la presencia de este metal pesado en los jales de estudio; que aunque no esté regulado en la normatividad ambiental mexicana, amerita que sean considerados para estudios futuros.

- Partículas Ca-S: De las 25 partículas analizadas en la muestra SX3, sólo 3 corresponden a las partículas tipo Ca-S (Figura 17b). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de yeso, que es un mineral secundario muy común en jales oxidados ácidos (Blowes et al. 1990, Romero et al., 2007).
- Partículas Zn-Cu: De las 25 partículas analizadas, solamente 1 es del tipo Cu-Zn (Figura 17b). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de oxi-hidróxidos de Zn y Cu; dado que el Microscopio Electrónico utilizado no permite la identificación de H y O. Este resultado permite especular acerca de la precipitación de oxi-hidróxidos de Zn y Cu como un mecanismo de control de la movilidad de estos metales en el medio medianamente ácido (Ver Tabla 8 de este documento).

Tabla 12. Análisis por MEB de la muestra SX3 (pH = 4.69)

	Weight (%)											
	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Pb	Mo	Cu	Zn
SX3												
1 ^a	5.3	38.8						55.9				
2 ^a	1.6	4.3	1.6					92.5				
2b	1.6	27	15.4		3.5	1.6		51				
3 ^a	5.9	8	5.9					80.3				
3b	3.2	14.8	19.8		4.4			57.8				
3c			7.8			28.2		64				
3d	1.7	7	25.5			32.6		33.2				
4 ^a		2.4						95.5		2.1		
4b	0.9	5.5	16		2.2			61.8	13.6			
4c	1.5	4	32.5			44.6		17.3				
4d		4.9	6.5			14.8		73.9				
4e	7.1	31.7	25.3		1.1	22.9		11.8				
5 ^a		4.1						95.9				
5b	1.2	6	1.5					91.4				
5c		85.2						14.8				
5d	5	20.6	6.8		8.6	8.4		50.6				
5e		4.7	13.2		5.5			76.6				
5f	2.9	8.9	16.2		7.1	1.9		63				
5g		20.1						79.9				
6 ^a	2.3	12.3	6.1	8.2	3.8	38.2		29.2				
7 ^a		3.6	1.7					6.7			50.9	37.1
7b	3.2	19.1						77.7				
7c	6.4	19.8			4.5			69.2				
7d	1.7	60.4	1.9		1.6			34.3				
7e	3.4	13.6			3.6	9	6.6	63.8				



IGF0913 2012/05/24 x500 200 um
 Recursos Naturales

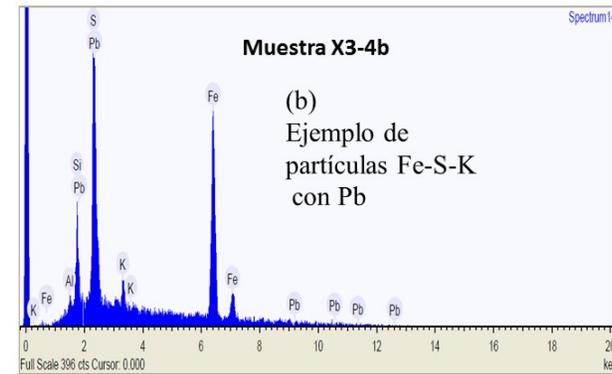
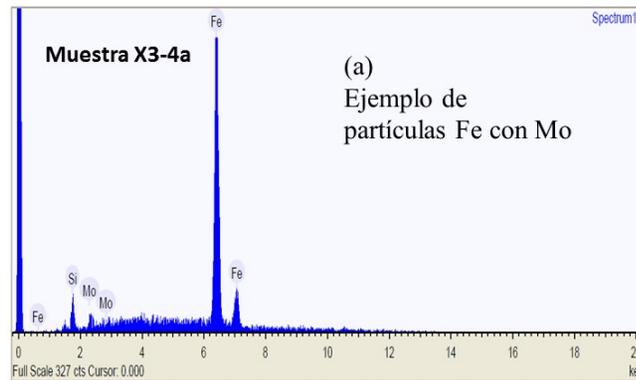


Figura 17 a. Imágenes de MEB-EDS de los jales medianamente ácidos del depósito de Atlitac-Xochula: (a) Ejemplo de partículas Fe con Mo (b) Ejemplo de partículas Fe-S-K con Pb.

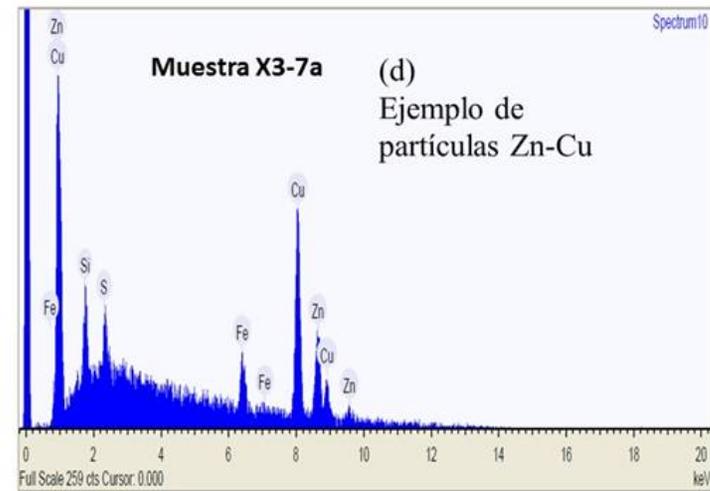
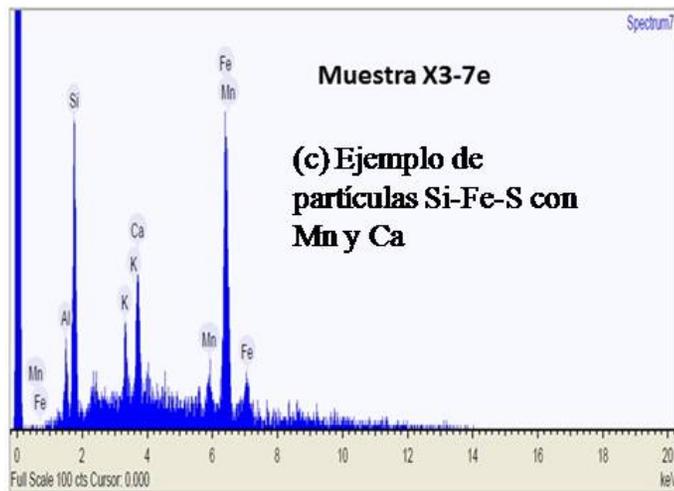
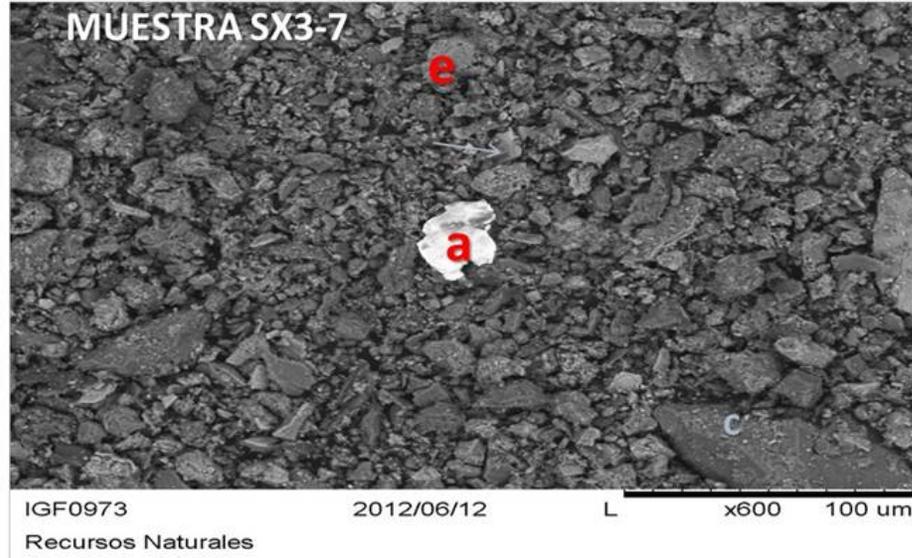


Figura 17b. Imágenes de MEB-EDS de los jales medianamente ácidos del depósito de Atlistac: (c) Ejemplo de partículas con Mn y Ca; (d) Ejemplo de partículas de Cu-Zn.

Jales prácticamente neutros: Muestras X13 (pH = 6.99)

Los resultados que se presentan en la Tabla 13, indican la presencia de 5 tipos de partículas: (i) Partículas con predominio de Fe-Si con un porcentaje de Na y Al (Partículas Si-Fe-S-Na-Al). (ii) Partículas con Fe y K (Partículas Fe-K). (iii) Partículas con predominio de Fe y Si con presencia de Mn (Partículas Si-Fe-Mn). (iv) Partículas con Ca. (v) Partículas de Zn y Br.

- Partículas Fe-Si-S-Al-Na: De las treinta partículas analizadas, destaca la presencia de diecisiete partículas con un pequeño porcentaje de Al y una con un pequeño porcentaje de Na (Cerca de 3%), lo que puede asociarse a la alteración de aluminosilicatos lo cual consume protones de hidrogeno disminuyendo la probabilidad de generación de Drenaje Ácido (Figura 18 a).
- Partículas Fe-K: De las 30 partículas analizadas, 4 son del tipo Fe-K. Esta asociación elemental permite inferir la presencia de jarosita potásica, que sería un mineral secundario de Fe que precipitó producto de la oxidación de los sulfuros metálicos, sumado a un pH neutro de la muestra se puede inferir que se llevó a cabo un proceso de neutralización efectivo en esta muestra (Figura 18 a).
- Partículas Si-Fe-Mn: De las 30 partículas analizadas en la muestra con pH neutro en 9 se ubican nueve muestras con presencia de Mn. Este tipo de partículas parece el producto de la mezcla mecánica de minerales secundarios de Fe con cuarzo. Este tipo de mezclas mecánicas es común en este tipo de análisis debido a que haz de rayos X puede atravesar varias partículas superpuestas (Romero et al., 2014). Es importante notar que, asociados a este tipo de partículas se identificó al Mn (Figura 18 b), lo que permite concluir la presencia de este metal pesado en los jales de estudio; que aunque no esté regulado en la normatividad ambiental mexicana, amerita que sean considerado para estudiarlos en el futuros.
- Partículas Ca: De las 30 partículas analizadas en la muestra X13, 6 corresponden a las partículas con Ca (Figura 18 b). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de yeso, que es un mineral secundario resultado de procesos de atenuación (Blowes et al. 1990, Romero et al., 2007). Por los porcentajes superiores al 30% en cuatro de ellas se

puede deducir un alto contenido de carbonatos de calcio razón por la que la neutralización en esta muestra fue posible. Además esta composición elemental se puede asociar a carbonatos de calcio, dado que el Microscopio Electrónico utilizado no permite la identificación de C y O.

- Partículas Zn-Br: De las 30 partículas analizadas, ocho son del tipo Zn y en dos de ellas se detecta Br (Figura 18 b). En estas muestras también se detecta Fe y S, dicha asociación elemental permite inferir la presencia de oxihidróxidos precipitados los cuales serían un mecanismo de control de la movilidad de estos elementos.

Tabla 13. Análisis por MEB de la muestra X13 (pH = 6.99)

	Weight (%)									
	Na	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Zn	Br
X13										
1a		4.0	30.4					65.6		
1b		1.3	5.9					92.8		
1c		2.6	85.5					11.9		
1d			8.1	5.2				80.2	3.1	3.5
1e		9.8	43.9		16.1			30.2		
1f			19.3	7.5	2.0			56.5	14.7	
1g			50.2			49.8				
1h	3.3	3.8	55.8					37.1		
1i			8.5	4.4				87.1		
1j			12.1			52.7		36.1		
1k		5.1	32.3		26.7	9.5		26.3		
2 ^a			60.7			11.4		27.9		
2b			18.5	9.6		35.2		36.7		
2c			46.0					54.0		
2d		3.4	45.1				30.2	19.1	2.3	
2e		7.7	18.2	6.7			8.7	58.7		
2f		2.8	46.5	2.7			11.1	36.9		
2g		3.7	12.1	18.8				52.1	13.3	
2h			19.3					79.0	1.7	
3a			11.7					88.3		
3b		10.4	38.1					51.4		
3c		5.2	19.6		1.9		8.1	55.1	10.2	
3d			12.7			30.9	10.2	31.3	7.7	7.1
3e		5.8	22.1				12.0	60.2		
3f			25.6				11.6	62.8		
3g			29.9					70.1		
3h		15.2	24.8				6.1	40.2	13.7	
3i		2.6	71.7					25.7		
3j		12.7	25.0				15.9	46.4		
3k		5.5	17.5					77.1		

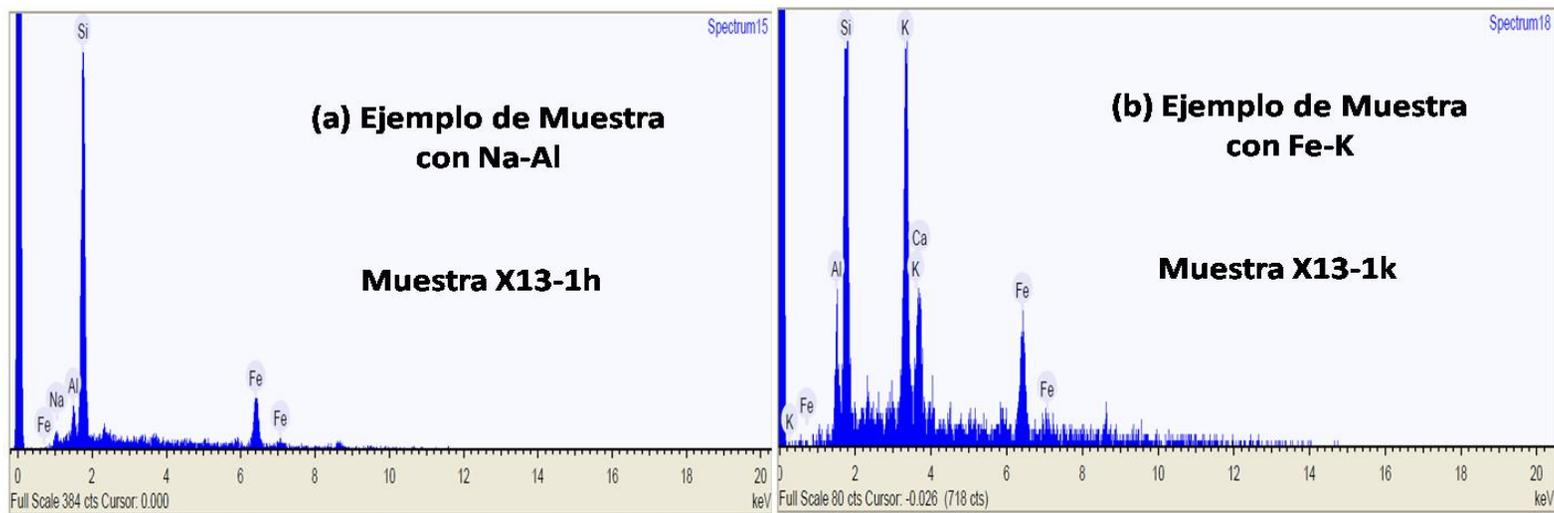
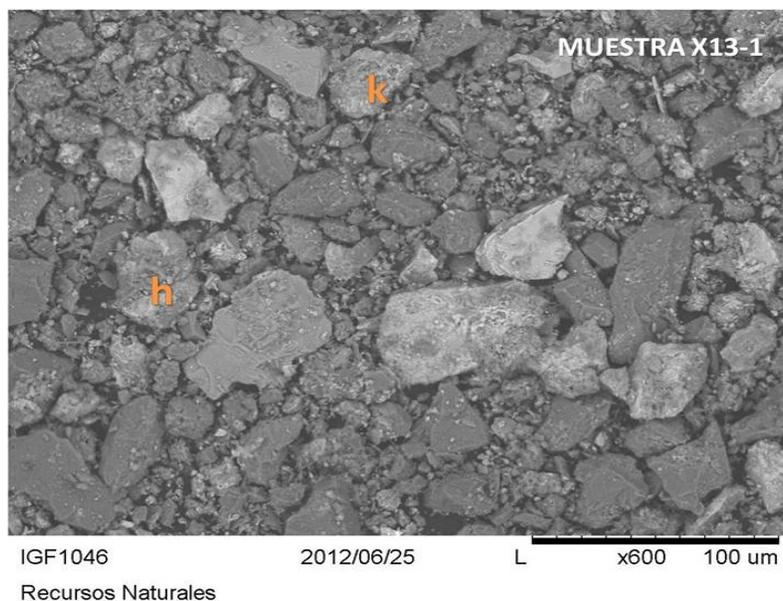


Figura 18 a. Imágenes de MEB-EDS de los jales relativamente neutros del depósito de Atlitac: (c) Ejemplo de partículas con Na-Al; (b) Ejemplo de partículas de Fe-K.

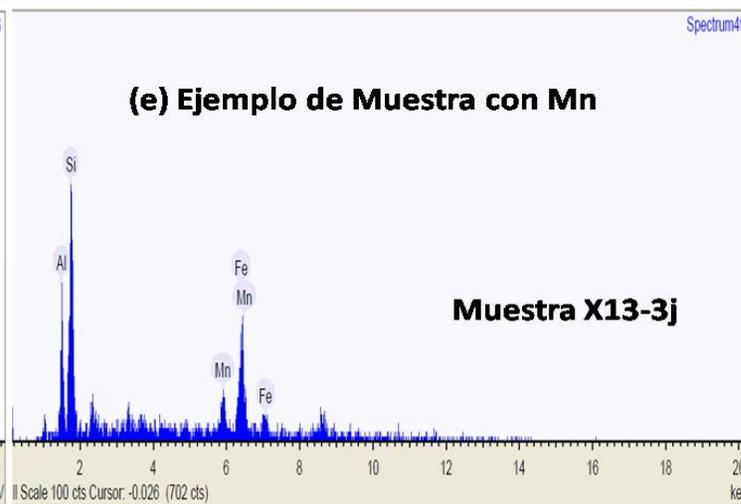
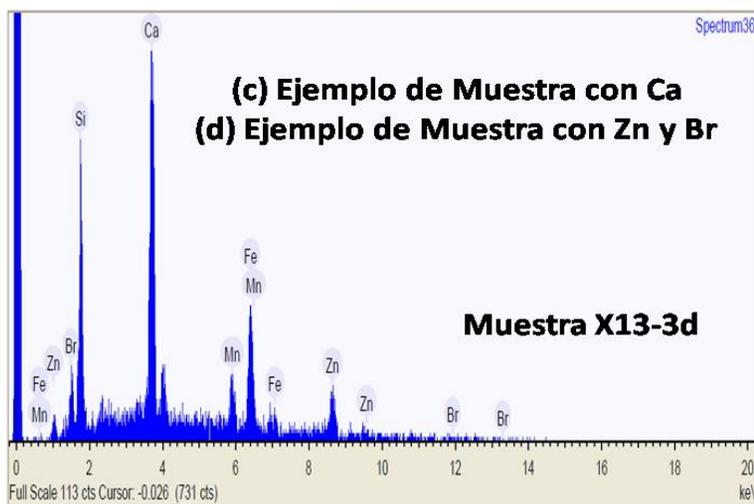
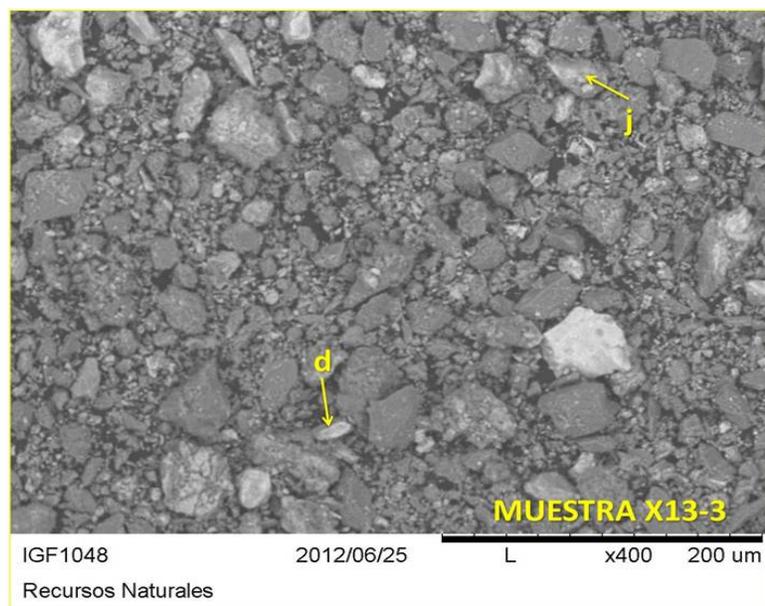


Figura 18 b. Imágenes de MEB-EDS de los jales relativamente neutros del depósito de Atlitac: (c) Ejemplo de partículas con Ca; (d) Ejemplo de partículas con Zn y Br; (e) Ejemplo de partículas de Mn.

5.6.2 Jales del depósito de Remedios

Se seleccionaron muestras con valores de pH ácidos, medianamente ácidos y prácticamente neutros y relativamente con altas concentraciones totales de As, Cu, Fe, Pb, Cd y Zn.

Jales ácidos: Muestra R3 (pH = 2.47)

En la muestra ácida analizada, los resultados que se presentan en la Tabla 14, indican la presencia de cuatro tipos de partículas: (i) Partículas con predominio de Fe con cantidades variables de S y K (Partículas Fe-S-K). (ii) Partículas con predominio de Si con cantidades importantes de Fe y pequeñas cantidades de S y Al (Partículas Si-Fe-Al). (iii) Dos muestras que indican un 100% de Fe. (iv) Adicionalmente, en la muestra se identificaron 5 partículas con presencia de Br, Mg y Mn con porcentajes considerables de Fe y Si (Partículas Br-Mg-Mn).

- Partículas Fe-S-K: De las 19 partículas analizadas en la muestra de jal ácido, 9 son del tipo Fe-S-K (Figura 19). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de jarosita potásica, que sería un mineral secundario de Fe que precipitó producto de la oxidación de los sulfuros metálicos (Romero et al., 2007).
- Partículas Si-Fe-Al: De las 19 partículas analizadas en las dos muestras de jales ácidos, sólo 8 corresponden a las partículas tipo Si-Fe-Al (Figura 19). Este tipo de partículas parece el producto de la mezcla mecánica de minerales secundarios de Fe con cuarzo. Este tipo de mezclas mecánicas es común en este tipo de análisis debido a que haz de rayos X puede atravesar varias partículas superpuestas (Romero et al., 2014). La presencia de aluminio probablemente se deba a una alteración de aluminosilicatos.
- Partículas Fe: De las 19 partículas analizadas en la muestra R3, solo 2 corresponden a las partículas tipo Fe con un 100 %, que puede asociarse a un oxi-hidróxido de este metal, dado que el Microscopio Electrónico utilizado no permite la identificación de H y O (Figura 19).

- Es importante notar que, asociados al minerales con alto porcentaje de Fe y Si, en el jal ácido analizado, no se identificaron elementos de naturaleza tóxica (As y Pb) u otros metales pesados, asociados a los sulfuros como Cu y Zn. Sin embargo la presencia de Br, Mn y Mg en la muestra R3 se debe considerar para futuros estudios.

Tabla 14. Análisis por MEB de la muestra R3 (pH = 2.47)

	Weight (%)							
	Mg	Al	Si	S	K	Mn	Fe	Br
R3								
1a			10.1		3.2		86.7	
1b		1.5	5.7		1.9		90.9	
2a		1.8	21.7	9.7	6.1		60.7	
2b			8.8				91.2	
2c		8.2	23.1	2.6	2.2		63.8	
3a		1.2	89				9.7	
3b		5.9	15.3	1.6	2.3		74.9	
3c			83.3				13	3.7
4a		2.1	5.6	1.6		3.3	87.4	
5a							100	
5b							100	
5c		2.2	50.4	6.3			41.1	
5d	2.4	10.2	65.3	4.9			17.3	
5e			79.6				20.4	
6a			9.2	18.5	2.9		64.3	5.1
6b			8.6	5.9			85.5	
6c			6.3	8.5			79.8	5.4
6d			3.9				96.1	
6e		5.4	33.9	15.6	3.6		41.5	

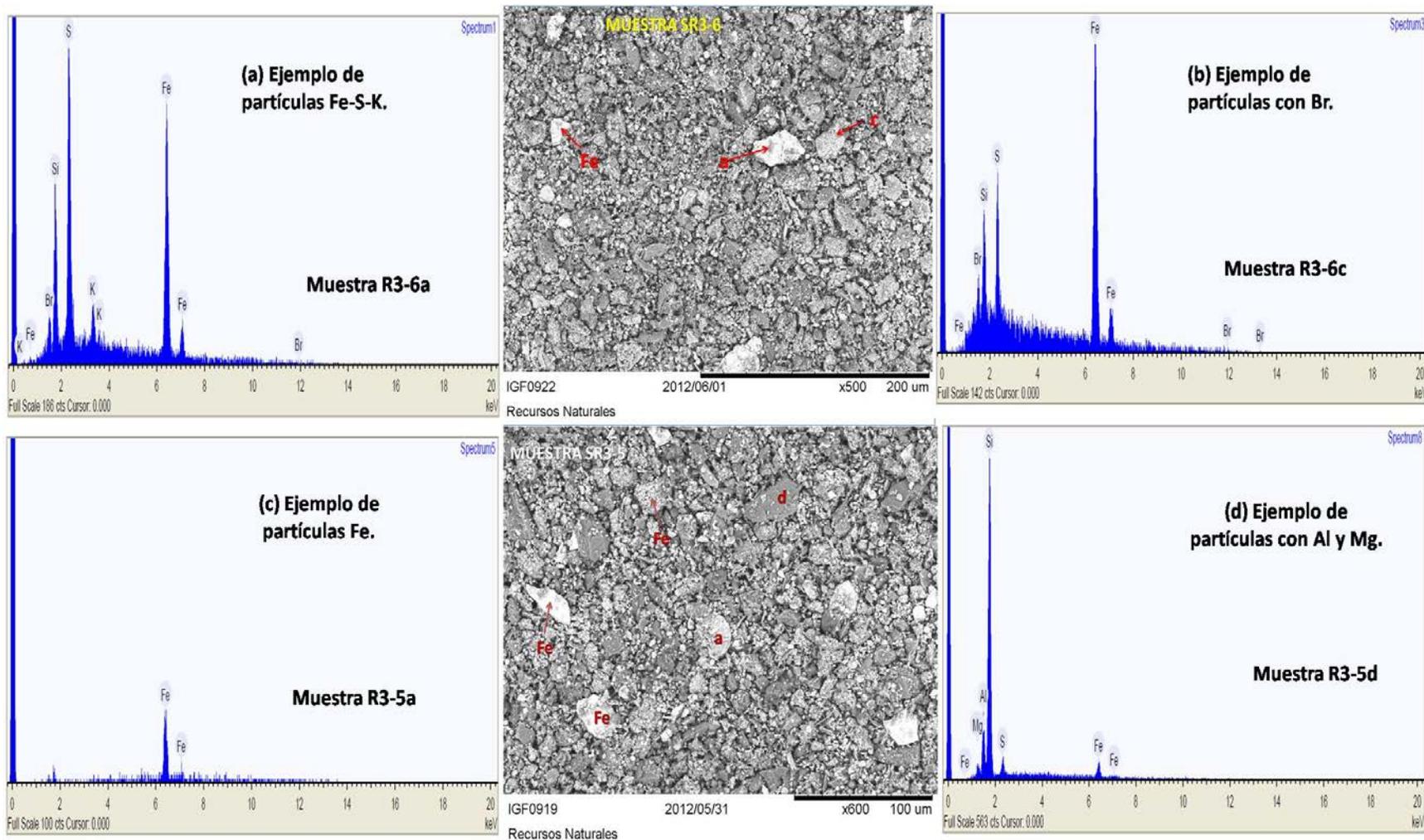


Figura 19. Imágenes de MEB-EDS de los jales ácidos del depósito de Remedios: (a) Ejemplo de partículas Fe-S; (b) Ejemplo de partículas con Br; (c) Ejemplo de partículas de Fe y (d) Ejemplo de partículas Fe-Si-Al.

Jales Medianamente ácidos: Muestras R15 (pH = 5.52)

Los resultados que se presentan en la Tabla 15, indican la presencia de 5 tipos de partículas: (i) Partículas con predominio de Fe y cantidades variables de S y K (Partículas Fe-S-K). (ii) Partículas con de Fe. (iii) Partículas con predominio de Fe y Si con cantidades variables de S y Al (Partículas Si-Fe-S). (iv) Partículas con predominio de Ca y S (Partículas Ca-S); (v) Partículas con presencia de Br.

- Partículas Fe-S-K: De las 21 partículas analizadas, 10 son del tipo Fe-S-K. Esta asociación elemental permite inferir la presencia de jarosita potásica, que sería un mineral secundario de Fe que precipitó producto de la oxidación de los sulfuros metálicos y señal de un proceso de atenuación de acidez en el depósito (Figura 20 a).
- Partículas Fe: Destaca la presencia de dos partículas con 100 % de Fe, que puede asociarse a un oxi-hidróxido de este metal, dado que el Microscopio Electrónico utilizado no permite la identificación de H y O. El cual es un mineral secundario resultado de una posible atenuación de drenaje ácido en la presa (Figura 20 a).
- Partículas Si-Fe-S: De las 21 partículas analizadas en la muestra de jal medianamente ácida, 7 corresponden a las partículas tipo Si-Fe-S. Este tipo de partículas parece el producto de la mezcla mecánica de minerales secundarios de Fe con cuarzo. Este tipo de mezclas mecánicas es común en este tipo de análisis debido a que haz de rayos X puede atravesar varias partículas superpuestas (Romero et al., 2014). Es importante notar que, asociados a este tipo de partículas se identificó al Mn y Mg (Figura 20 a), lo que permite concluir la presencia de estos metales en los jales de estudio; que aunque no esté regulado en la normatividad ambiental mexicana, amerita que sean considerados para estudios futuros.
- Partículas Ca-S: De las 21 partículas analizadas en la muestra R15, sólo 10 corresponden a las partículas tipo Ca-S (Figura 20 b). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de yeso, que es un mineral secundario muy común en jales oxidados ácidos (Blowes et al. 1990, Romero et al., 2007). Además de presencia de Si y Al lo cual indica

presencia de aluminosilicatos, minerales alterados y que intervienen en el proceso de atenuación para la producción de Drenaje Ácido (Figura 20 b).

- Partículas Br: De las 21 partículas analizadas, solamente dos son del tipo Br (Figura 20 b). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de oxihidróxidos; dado que el Microscopio Electrónico utilizado no permite la identificación de H y O. Este resultado permite especular acerca de la precipitación de oxihidróxidos como la jarosita la cual podría ser retenedora de Br y como un mecanismo de control de la movilidad de este. Sin embargo se debe realizar estudios futuros para determinar si el Br es potencialmente peligroso ya que este no se encuentra regulado en la normatividad ambiental mexicana.

Tabla 15. Análisis por MEB de la muestra R15 (pH = 5.52)

	Weight (%)									
	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Br
R15										
1a	3.1	1.9	19.4	48.9	3.3	3.4		10.2	9.8	
1b		8.9	13.7	32.1	13.9		10.1		21.4	
1c									100	
1d				10.2	2.2				81.3	6.4
1e		2	9.9	15	28.8	2.7	31.9		9.6	
2a					20				80	
2b			6.9	8.7	11.4	3.9	16.3		52.7	
2c		1.7	9.5	22	21.8	2.6	19.8		22.7	
2d			2	4.4	5.8	3.9			84	
2e		3.3	11	23.8	18.1	6.2	8.9	3.6	25.2	
2f									100	
2g		5.3	21.3	28.4	9	4.5	2.8		28.6	
3a				4.9	4				86.8	4.4
3b							44.8		55.2	
3c			2.9	5.6			16.2	14.2	61.2	
3d			1.9	4.2	42.1				51.8	
3e		8.6	16.4	31.6	3.5	4.5			35.5	
3f			0.9	1.3	24.9	3.7	29.9		39.4	
3g			19.9	47.1	4.2	12.4			16.5	
3h			2	5.2	41.4		51.4			
3i			3.4	6.3	40.3		50			

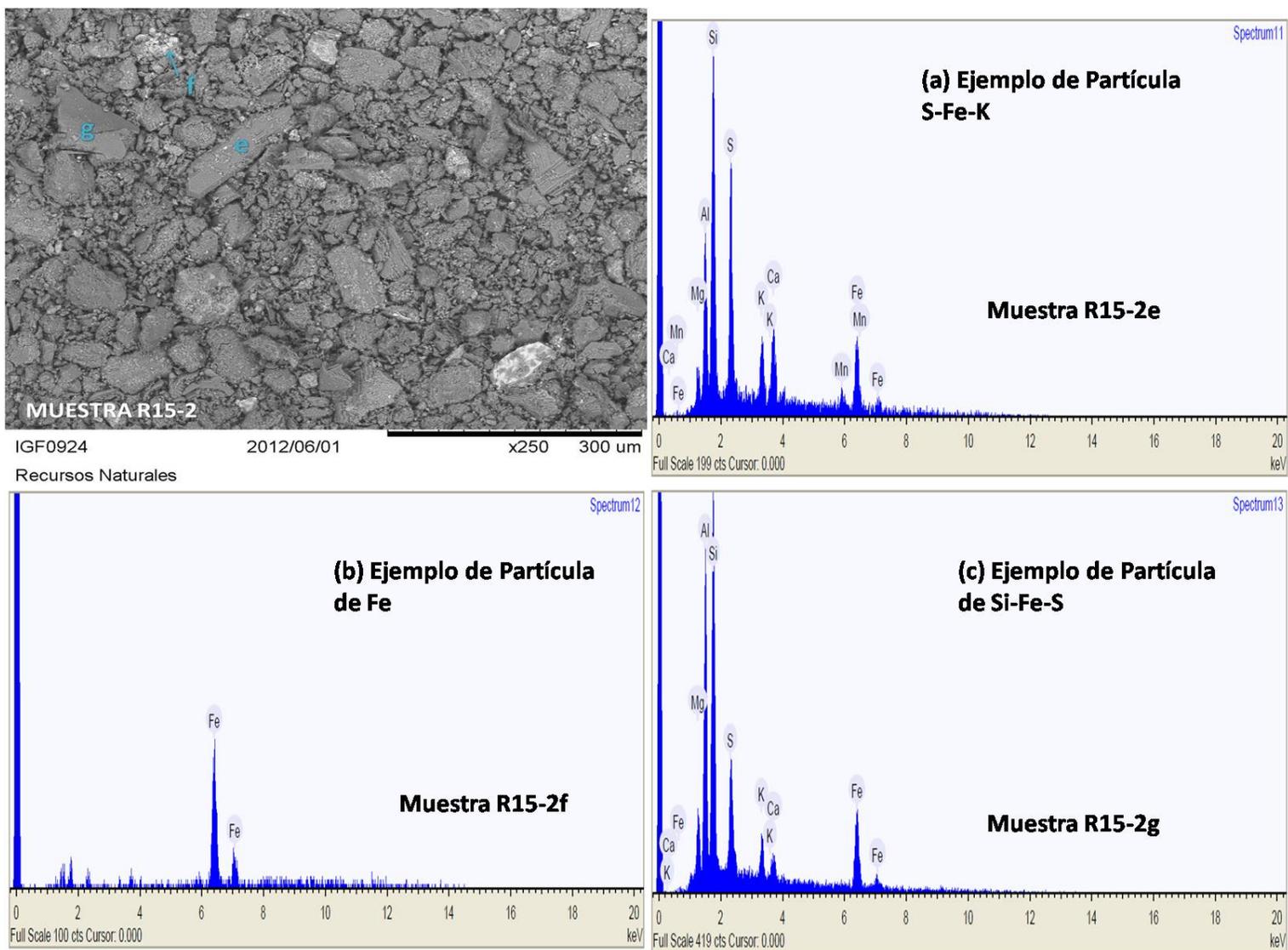
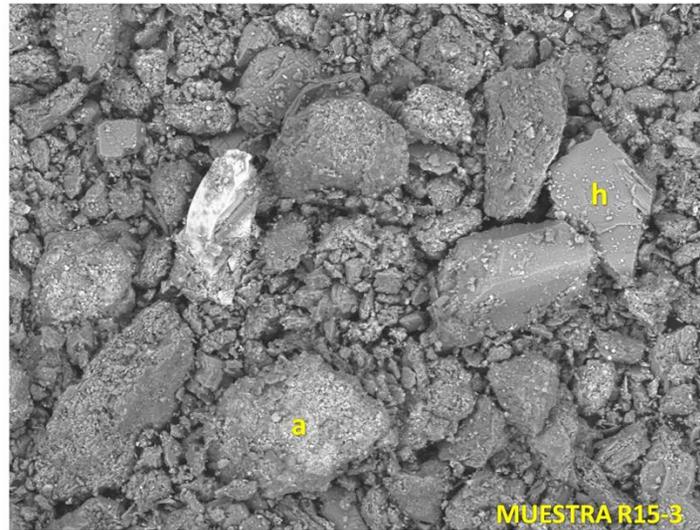


Figura 20 a. Imágenes de MEB-EDS de muestra de jales medianamente ácido del depósito de Remedios: (a) Ejemplo de partículas Fe-S-K; (b) Ejemplo de partículas Fe; (c) Ejemplo de partículas Si-Fe-S.



IGF0925 2012/06/01 x500 200 um
Recursos Naturales

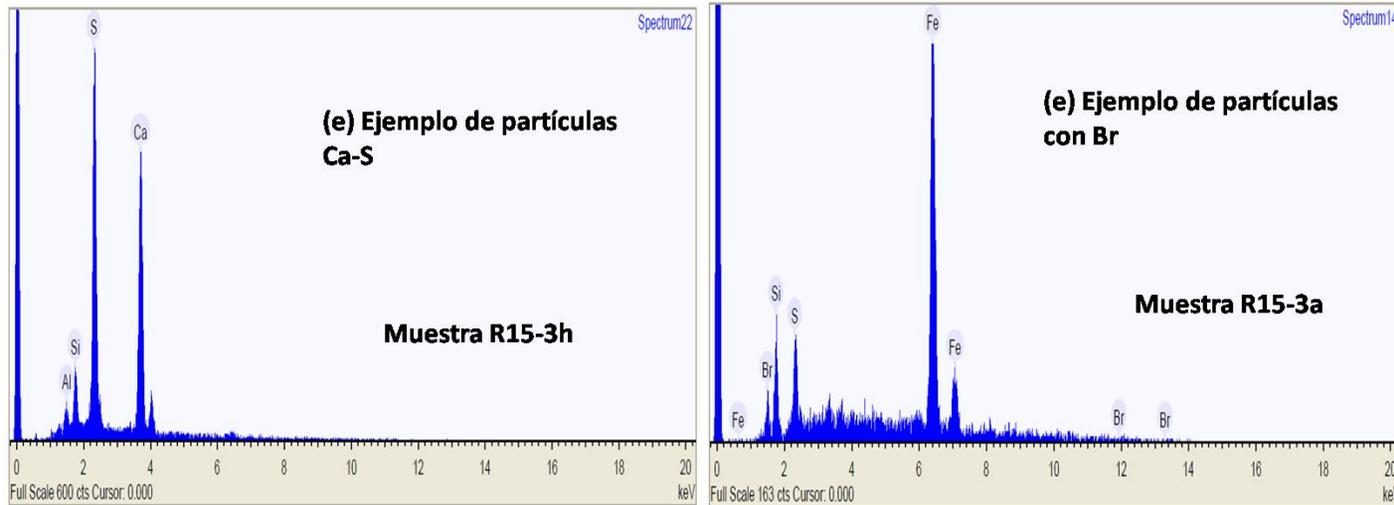


Figura 20 b. Imágenes de MEB-EDS de la muestra de jales medianamente ácidos del depósito Remedios: (d) Ejemplo de partículas con Ca-S; (e) Ejemplo de partículas con Br.

Jales neutros: Muestras R10 (pH = 7.06)

Los resultados que se presentan en la Tabla 16, indican la presencia de 5 tipos de partículas: (i) Partículas con predominio de Fe y Si con un porcentaje de Na y Al (Partículas Si-Fe-S-Al). (ii) Partículas con Fe y K (Partículas Fe-K). (iii) Partículas con predominio de Fe y Si con presencia de Mn (Partículas Si-Fe-Mn). (iv) Partículas con Ca. (v) Partículas de Zn y Br.

- Partículas Si-Fe-Al: De las dieciséis partículas analizadas, destacan ocho la presencia de partículas con un pequeño porcentaje de Al y una con un pequeño porcentaje de Na (Cerca de 2%), lo que puede asociarse a la alteración de aluminosilicatos lo cual consume protones de hidrógeno disminuyendo la probabilidad de generación de Drenaje Ácido (Figura 21). Es importante notar que, asociados al mineral secundario de Fe, inferido como jarosita, se identificó una cantidad importante de Pb (Figura 21), lo que permite especular que la jarosita es un control eficiente de la movilidad del plomo; ya que de una concentración total de plomo de 1288.12 mg/kg (Tabla 6) solo están disponibles 0.00045 mg/L (Tabla 8).
- Partículas Fe-K: De las 16 partículas analizadas, 5 son del tipo Fe-K. Esta asociación elemental permite inferir la presencia de jarosita potásica, que sería un mineral secundario de Fe que precipitó producto de la oxidación de los sulfuros metálicos, sumado a un pH neutro de la muestra se puede inferir que se llevó a cabo un proceso de neutralización efectivo en esta muestra (Figura 21).
- Partículas Si-Fe-Mn: De las 16 partículas analizadas en la muestra con pH neutro en 4 se ubican nueve muestras con presencia de Mn. Este tipo de partículas parece el producto de la mezcla mecánica de minerales secundarios de Fe con cuarzo. Este tipo de mezclas mecánicas es común en este tipo de análisis debido a que haz de rayos X puede atravesar varias partículas superpuestas (Romero et al., 2014). Es importante notar que, asociados a este tipo de partículas se identificó al Mn (Figura 21), lo que permite concluir la presencia de este metal pesado en los jales de estudio; que aunque no esté regulado en la normatividad ambiental mexicana, amerita que sean considerado para estudiarlos en el futuros.

- Partículas Ca: De las 16 partículas analizadas en la muestra R10, 5 corresponden a las partículas con Ca (Figura 21). Esta asociación elemental permite inferir la presencia de yeso, que es un mineral secundario generado durante un proceso de neutralización (Blowes et al. 1990, Romero et al., 2007). Por los porcentajes inferiores al 10% en las partículas se puede deducir que los carbonatos se agotaron hasta lograr la neutralización. Situación posible por la composición elemental asociable a carbonatos de calcio, dado que el Microscopio Electrónico utilizado no permite la identificación de C y O.
- Partículas Zn-Br: De las 16 partículas analizadas, una contiene Zn (Figura 21) y en la otra se detecta Br. En estas muestras también se detecta Fe, dicha asociación elemental permite inferir la presencia de oxihidróxidos precipitados, los cuales serían un mecanismo de control de la movilidad de estos elementos.

Tabla 16. Análisis por MEB de la muestra R10 (pH = 7.06)

	Weight (%)											
	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Pb	Zn	Br
R10												
1 ^a			8.3	15.1		2.1	8.2	5	61.2			
1b				3			1.6		95.4			
1c			4.1	66.7					29.2			
1d			6.7	22.2		19.1			52			
1e			6.9	15.6		1.6	3.2	6	66.8			
2 ^a		4.1	15.1	26.2		2.6			52			
2b				82.1					17.9			
2c			1.1	3.6					95.3			
2d				6.1				52.2	33.3		8.4	
2e				19.3					80.7			
2f								4.5	95.5			
3 ^a				1.7					98.3			
3b	2.3			12.4	4.7	3	4.3		65.2			8.1
3c			1.5	4.8					93.7			
3d				100								
3e			2.4	9.2			2.2		70.4	15.8		

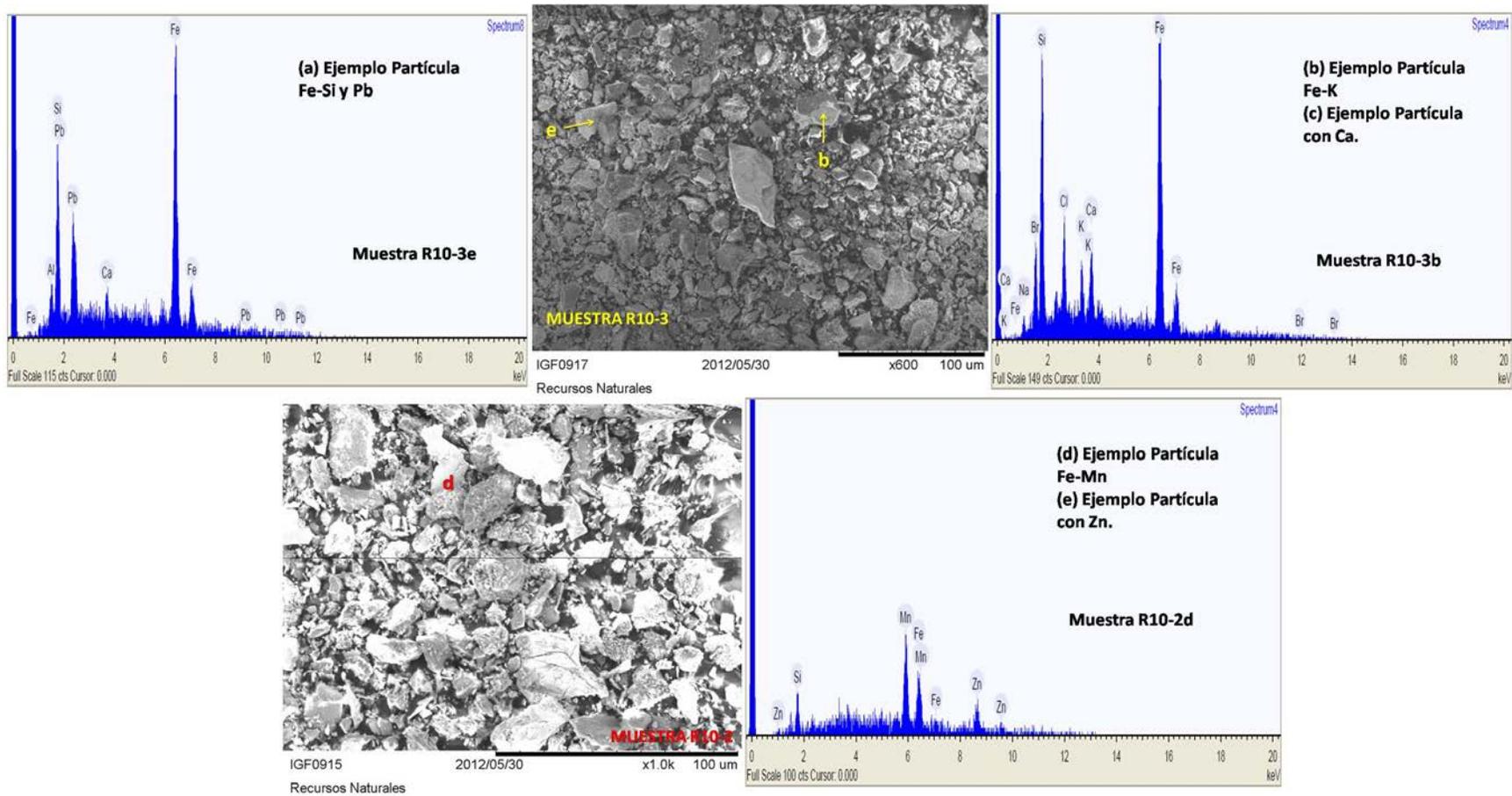


Figura 21. MEB-EDS de la muestra de jales neutros del depósito de Los Remedios. (a) Ejemplo de partículas con Fe-Si-Pb; (b) Ejemplo partículas Fe-K; (c) Ejemplo de partículas Ca; (d) Ejemplo de partículas Fe-Mn y Na-Al; (e) Ejemplo de partículas de Zn.

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

Este es el primer estudio de los dos depósitos más antiguos de la región de Taxco. En este trabajo se reportan los resultados del análisis de 26 muestras en el depósito “Atlistac” mientras que en “Los Remedios” se recolectaron 33 muestras, que corresponden a muestras superficiales y de cuatro perfiles. En los depósitos estudiados hay jales que pueden ser generadores de drenaje ácido al reaccionar con agua de lluvia o que pueden producir drenaje neutro.

En los resultados de pH y conductividad eléctrica (CE) determinados en los jales de estudio. El pH del depósito de “Atlistac” varía entre 3.0 y 8.0 con una CE entre 1.0 y 3.0 (mS), mientras que los jales del depósito de los Remedios tiene un pH entre 2.0 y 7.0, con valores de CE entre 1.0 y 11.0 (mS). Estos comportamientos son muy similares a los de los depósitos reportados en jales oxidados más recientes como los de “El Fraile”, “Guerrero” y “Foster”, a causa de:

- La heterogeneidad de los yacimientos explotados.
- La formación de capas de minerales secundarios que gobiernan la migración y movilidad de los agentes oxidantes en el sentido vertical.

Los jales de “Atlistac” se caracterizan por altas concentraciones de EPT, que oscilan entre 2873.96-6791.94 ppm para Pb, 326.81-606.45 ppm para As, 116.11-398.47 ppm para Cu, 11.35-17.51 % para Fe y 5162.9-14261.98 ppm para Zn mientras que en el depósito de los Remedios los jales poseen concentraciones totales de Pb que oscilan entre 2411.66 y 13313.95 ppm, de As entre 660.75 y 1280.50 ppm, de Cu entre 142.6 y 539.81 ppm, de Fe entre 13.95 y 29.86 % y de Zn entre 671.85 y 4071.83 ppm.

En estos depósitos son menores las concentraciones promedio de As; pero mayores en contenido de Fe si los comparamos con los depósitos más antiguos reportados: “El Fraile”, “Guerrero” y “Foster”. Las mayores concentraciones geo disponibles de los EPT de interés se determinaron en los jales ácidos, donde estos contaminantes se presentan en forma soluble y que pueden considerarse un riesgo por la falta de zonas atenuadoras.

Además, en muestras con un pH considerado neutro, se determinaron valores relativamente altos de concentración geodisponible de Zn y Cd, lo que permite concluir que el drenaje neutro que

pudiera generar, se caracterizaría por la presencia de estos metales, lo que podría representar un riesgo para el ambiente y se sugiere realizar estudios de posible impacto de estos elementos en la zona.

De las pruebas de balance ácido-base se concluye que los jales de “Atlistac”, si podrían generar acidez en el futuro, ya que los valores del potencial de acidez (PA) son mayores que el potencial de neutralización (PN) donde el PNN varían entre 0 y 0.87 con una media de 0.08 mientras que los valores de PN/PA es de 1.46 en la única muestra con un pH neutro del depósito Los Remedios, lo que indica que este depósito no serán generador de acidez; según la NOM_141 de la SEMARNAT, si el coeficiente $PN/PA \leq 1.2$ entonces los jales son potenciales productores de Drenaje Ácido (DA)

Los análisis mineralógicos por DRX y el microanálisis por MEB-EDS revelaron la presencia de Jarosita, con trazas de Pb y Zn, lo que permite especular que este mineral secundario de Fe es un control eficiente de la movilidad del plomo. Por MEB-EDS se identificaron partículas Zn-Cu, que permite inferir la presencia de oxihidróxidos de Zn y Cu y por lo tanto especular acerca de la precipitación de oxi-hidróxidos de Zn y Cu como un mecanismo de control de la movilidad de estos metales pesados.

Finalmente, es importante resaltar la presencia de Fluorita, en algunas muestras; y trazas de Mo y Mn asociados a los minerales secundarios de Fe, lo que indica que en estudios futuro es necesario incluir el análisis de fluoruros, manganeso y molibdeno, para determinar bajo qué condiciones se rompe la estabilidad causando daños en el medio y en la vida; y si estas son posibles que se presenten en la naturaleza; aunque el estudio de estos elementos no estén regulados en la normatividad ambiental mexicana.

Debido a la existencia de Drenaje ácido en la presa de jales de Atlistac se considera necesario realizar estudios para determinar si este podría dañar el entorno, las aguas subterráneas o a las comunidades aledañas, por lo que la realización de un mapa de riesgos por residuos mineros en la zona es una acción pertinente.

BIBLIOGRAFÍA

Arcega-Cabrera, F., Castillo-Blum, S.E., Armienta, M.A., 2005. Kinetic study of the Releases of Lead in a Mine-Impacted Tropical River, Mexico: *Environ. Contam. Toxicol.* 75:523-529.

Armienta, M.A., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley, L.K., Mango, H., 2001. The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapan Valley, Mexico: *Environ. Geol.* 40 (45), 571-581.

Armienta, M.A., Talavera O., Morton O., Barrera M., 2003. Geochemistry of metals from Mine tailings in Taxco, Mexico: *Environ. Contam. Toxicol.* 71:387-393.

Asta M.P., Cama J., Martínez M., Giménez J., 2009. Arsenic removal by goethite and jarosite in acidic conditions and its environmental implications. *J Hazard Mat* 171:965–972.

Bain, J.G., Blowes, D.W., Robertson, W.D., Frind, E.O., 2000. Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site: *J. Contam. Hydrol.* 41 (1-2), 23-47.

Blowes, D.W. and Jambor, L.L., 1990. The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailing, Waite A mullet, Quebec, Canada. *Applied Geochem.*, 5(3): 327-346.

Bothe, J., Brown, P., 1999. Arsenic immobilization by calcium arsenate formation. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 3806-3011.

Bowell, R.J., 1994. Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. *Appl. Geochem.* 9. pp 279-286.

Camero P.H., 2000, Encapsulamiento concurrente de la piritita en presa de relaves. Potosí-Bolivia. Curso internacional de maestría en medio ambiente “Técnicas ambientales”.

Castro-Larragoitia, J., Krama, U., & Puchelt, H., 1997. 200 years of mining activity at La Paz/San Luis Potosí/Mexico- Consequences for environment and geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 58,81–91.

Clark, K.F., Salas, G.A., Cubillas-Estrada, R., 2008. *Geología Económica de México*. México. Servicio Geológico Mexicano.

Consejo de Recursos Minerales (COREMI), 1999. *Monografía Geológico – Minera del Estado de Guerrero*. México.

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

Davis, A., Ruby, M.V., Bloom, M., Schoof, R., Freeman, G., Bergstrom, P.D., 1995. Mineralogical constraints on the bioavailability of arsenic in smelter-impacted soils. *Environ SciTech* 30 (2): 392-399.

Dold, B. and Fontboté, L., 2001. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *J. GeochemExplor.* 74, 3 – 35.

Dold, B., 2002, Basic Concepts of Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Waste, Curso de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México, 22-28 Abril. Pp. 1-38.

Dold, B., 2003, Aguas Ácidas: formación, predicción, control y prevención. University of Lausanne, Suiza, (www.iimp.org.pe/minería), p 1-9.

Evangelou, V.P., Zhang, Y.L., 1995. A Review: Pyrite Oxidation Mechanisms and Acid Mine Drainage Prevention. *Environ Sci Tech* 25 (2): 141-199.

- Faure, G., 1980. Principles and applications of geochemistry. Macmillan publishing Company, Canada.
- Faure, G., 1998. Principles and applications of geochemistry. Prentice Hall. Second Edition, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 600p.
- Fetter, C.W., 1993. Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, N.Y.
- Foster, A.L., Brown, G.E., Tingle, T.N. and Parks, G.A., 1998, Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. *American Mineralogist*, 83(5-6), 553-568.
- Frost, R.F., Griffin, R.A., 1977. Effect of pH on adsorption of arsenic and selenium from landfill leachate by clay minerals.
- Fuller, C.C., Davis, J.A. and Waychunas, G.A., 1992. Surface chemistry of ferrihydrite: Part2. Kinetics, arsenate adsorption and coprecipitation. *Geochim. Cosmochin. Acta* Vol. 57, pp. 2271-2282.
- Gieré, R., Sidenko, N.V. and Lazareva, E.V., 2003 The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes (Berikul gold mine, Siberia). *Appl Geochem* 18: 1347-1359.
- Goldberg, S., Suarez, D.L. and Glaubig, R.A., 1988. Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of arid zone soils. *Soil Sci.* 146:317-325.
- Goldberg, S. and Johnston, C.T., 2001. Mechanism of arsenic adsorption on amorphous oxides evaluated using macroscopic measurements, vibrational spectroscopy, and surface complexation modeling. *J Colloid Interface Sci* 234: 204-216.
- Goldberg, S., 2002. Competitive adsorption of arsenate and arsenite on oxides and clay minerals. *SoilSciSoc Am J* 66: 413-421.
- Grupo México (GMÉXICO), 2011. Informe Anual del 2011. México.
- Holmstrom, H. and Ohlander, B., 2001. Layers rich in Fe- and Mn-oxihydroxides formed at the tailings-pond water interface, a possible trap for trace metals in flooded mine tailings. *J. Geochem. Explor.* 74, 189 – 2003.
- Helawell, J.M., 1988. Toxic substances in rivers and streams. *EnvironPollut* 50, 61-85.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Taxco de Alarcón, Guerrero. México.
- Jambor, J.L., 1994. Mineralogy of sulfide-rich Tailing and Their Oxidation Products in., Short course handbook in Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes, mineralogical association of Canada 3, 4, 9 and 10, pp 58-292.
- Jambor, J.L., 2000, The relationship of mineralogy to acid-and neutralization-potential values in ARD. In: Environmental Mineralogy: Microbial interactions, Anthropogenic influences, contaminated Land and Waste Management (J.D Cotter-Howells, L.S. Campell, E. Valsami Jones and M. Batchelder, editors). Mineralogical society. Series, 9. Mineralogical society, London. Hudson-Edwards, K.A., Macklin, M.G., pp. 141-159.
- Jennings, S.R., Dollhops, D.J. and Inskep, W.P., 2000. Acid Production from sulfide minerals using hydrogen peroxide weathering. *Appl Geochem* 15: 235 – 243.
- Johnson R.H., Blowes, D.W., Robertson, W.D. and Jambor, J.L., 2000. The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario: *J. Contam. Hydrol.* 41 (1-2), 49-80.
- Jung, M.C., 2001. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea: *Appl. Geochem.* 16 (11-12), 1369-1375.

- Lawrence, R.W., 1990. Prediction of the behaviour of mining and processing wastes in the environment, In: Western Regional Symp. on Mining and Mineral Processing Waste, Berkeley, California. USA.
- Lawrence, R.W. and 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.
- Levy, D.B., Curtis, K.H., Casey, W.H. and Rock, P.A., 1997. A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine. *Appl. Geochem.* 12, 203 – 211.
- Lin, Z., 1997, Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden: *Sci. Total Environ.* 198, 13-31.
- Lindsay, W.L., 1979, *Chemical Equilibria in Soils*. New York. USA.
- Lizárraga-Mendiola, L.G., 2008. Afectación de una Presa de Jales de Sulfuros Masivos a la Hidrogeoquímica de los Ecurrimientos Superficiales Aledaños.
- Ljungberg, J. and Ohlander, B., 2001. The geochemicals dynamics of oxidizing mine tailings at Laver, northern, Sweden. *J Geochem Explor* 74: 57-72.
- Lozano, R., Verma, S., Girón, P., Velzco, F., Morán, D., Viera, F. and Chávez, G., 1995 Calibración preliminar de fluorescencia de rayos-X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas. *Actas INAGEQ* 1: 203-208.
- Luna, L.C., 2008. Mineralogía y geoquímica de los jales de la unidad minera Charcas, San Luís Potosí.
- Luna, L.C., 2011. Barreras geoquímicas para el control de drenaje ácido en jales de una mina de hierro. Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM.
- Lydon, J.W., 1988. Volcanogenic massive sulphide deposits, A descriptive model, in ores deposits models Geoscience Canada, reprint series 3, pp. 145 -153. Canada.
- Manahan, S.E., 1989. *Toxicological Chemistry. A guide to toxic substances in chemistry*. Lewis Publishers, INC. Michigan, USA.
- Manning, B.A. and Goldberg, N., 1997. Adsorption and stability of arsenic (III) at the clay mineral-water interface. *EnvironSciTech* 31:2005-2011.
- Martínez, S.C., 2011. Evaluación de la peligrosidad de jales y lixiviados de una mina de sulfuros masivos en el Estado de México. Facultad de Ingeniería UNAM.
- 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: *Contam Hydrol* 33, 247-271.
- McGregor, R.G. and Blowes, D.W., 2002. The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings. *J GeochemExplor* 76: 195-207.
- Méndez, M. and Armienta, M.A., 2003. Arsenic phase distribution in Zimapán mine tailings, México: *GeofísicaInternacional*, 42(1), 131-140.
- Monroy, M.Dr., Díaz-Barriga, F.Dr., Razo, I.Q. and Carrizales, L.QFB., 2002. Evaluación De la Contaminación por Arsénico y metales pesados (Pb, Zn, Cu) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz-Matehuala, SLP. Instituto de Metalurgia UASLP.
- Morales-Arredondo, J.I., 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras de México: implicaciones ambientales. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

- Moreno, E., 2010. Recuperación de suelos mineros contaminados con Arsénico mediante Fitotecnología. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Morin, K.A. and Hutt, N.M., 2001. Environmental geochemistry of mine sites drainage: Practical theory and case studies. MDAG Publishing, Vancouver, Canada.
- Muhech, V., 2001. Acciones sugeridas para el abandono ordenado de almacenamiento de residuos mineros. Memorias del seminario "Almacenamiento de Residuos Mineros". México.
- NOM-141-SEMARNAT-2003, 2004. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto construcción y operación y post-operación de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 30 pp. D.F. México.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, 2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. D.F. México.
- Núñez, L.A., 2008. Análisis de residuos mineros y alternativas de manejo en Pinar del Río, Cuba, y Taxco, México. Trabajo de Estudios Avanzados, España.
- Paktunc, D. and Dutrizac J.E., 2003. Characterization of arsenate-for sulfate substitution in synthetic jarosite using X-ray diffraction and X-ray absorption spectroscopy, *The Canadian Mineralogist*, 41, 905-919.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M. and Siebe-Grabach, C., 2004. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México; Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(2), 268-284.
- Ramos-Arrollo, Y.R. and Siebe-Grabach, C.D., 2006. Estrategias para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: Estudio de caso en el distrito Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1):54-74.
- Romero, F.M., 2000. Interacción de aguas contaminadas con arsénico con rocas calizas de Zimapán, Hidalgo.
- Romero, F.M., Armienta M.A. and Gonzalez-Henandez, G., 2003. The solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. 23: 23-40.
- Romero, F.M., 2004. Procesos geoquímicos que controlan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos: "El Fraile", Taxco-Guerrero. México.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., Villaseñor, G. and González, J.L., 2006. Mineralogical constraints on the mobility of arsenic in tailings from Zimapán, Hidalgo, México: *International Journal of Environment and Pollution*, 26 (1/2/3), 23-40.
- Romero, F.M. and Gutiérrez, M.R., 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 1: 43-53.
- Roussel, C., Neel, C. and Bril, H., 2000. Minerals controlling arsenic and lead solubility in an abandoned gold mine tailing. *Sci. Total Environ.* 263, 209-219.
- Santos-Martínez, C.A., 2006. Determinación de la peligrosidad de jales mineros con base en la normatividad ambiental mexicana y su efecto potencial en el ambiente.
- Secretaría de Gobernación y el Instituto para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED), 2010). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*, Guerrero, Taxco de Alarcón. México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2011. *Panorama Minero del Estado de Guerrero*. México.

Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. and Smith, R.M., 1978. Field and laboratory methods applicable to overburdens and mine soils. Environmental Protection Agency U.S EPA-600/2-78-054. Cincinnati, Ohio.

Soil Science Society of America (SSSA), 1996. Methods of Soil Analysis. Chemical Methods Book Series No.5. USA.

Sommer, I., Fernández, P., Rivas, H. and Gutiérrez, M., 2000. La geoestadística como herramienta en estudios de contaminación de suelos. Análisis de caso: Afectación por arsénico, plomo y cadmio contenidos en jales mineros. Revista internacional de contaminación ambiental 16(4) 205-2.

Sun, X. and Doner, H.E., 1998. "Adsorption and oxidation of arsenite on goethite", *Soil Science*, 163, pp. 278-287.

Talavera, O., Yta, M., Moreno, R., Dótor, A., Flores, N. and Duarte, C., 2005. Mineralogy and geochemistry sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica Internacional* (2005), Vol. 44, Num. 1, pp 49-64.

Talavera, O., Armienta, M.A., García, J. and Flores M., 2006. Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health* 28:243-255.

US-EPA, 1994. Method 3051: Microwave assisted acid digestion/sludges, soils, SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

US-EPA, 1994a. Technical document. Acid mine drainage prediction. EPA 530-R-94-036, NTIS PB94-201829. Environmental Protection Agency, USA.

US-EPA, 1995. Method 9045C: Solid and waste pH. Test methods for evaluating solid wastes, SW – 846. Environmental Protection Agency, USA.

Walsh, F. and Mitchell, R., 1972. A pH Dependent Succession of Iron Bacteria, *Environ Sci Tech* 6 (9): 809-812.

Van Der Hoek, E., Bonouvrie, P. and Comans, N., 1994. Sorption of As and Se on mineral components of fly ash: relevance for leaching processes. *Applied Geochemistry*. Vol. 9. Pp. 403-412.

Xu, H., Allard, B., Grimvall, A., 1991. Effects of acidification and natural organic materials on the mobility of arsenic in the environment. *Water, Air and Soil Pollution*. Vol. 57-58, pp. 269 278.
