



**Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico
en Electroquímica, S. C.**

**CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE JALES MINEROS Y
EVALUACIÓN DE BIOSÓLIDOS COMO PROPUESTA DE
REMEDIACIÓN**

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

**Maestro en Ciencia y Tecnología
en la Especialidad de Ingeniería
Ambiental**

PRESENTA

Alejandro Medel Reyes

**Santiago de Querétaro, Qro., México
26 de Junio del 2009**

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La industria minera ha tenido un papel fundamental en el desarrollo económico de México desde la época de la colonia. Es una de las actividades económicas de mayor tradición en México y se dedica principalmente a la producción de Cu, Zn, Ag y Pb. Sin embargo, el procesamiento de los minerales produjo residuos que fueron depositados generalmente sin controles ambientales hasta la primera mitad del siglo XX. Los residuos mineros, conocidos como jales, son generados durante los procesos de beneficio a partir de minerales polimetálicos después de moler las rocas originales que los contienen y mezclar las partículas que se forman con agua y pequeñas cantidades de reactivos químicos que facilitan la liberación de metales presentes (Armienta y col., 2005). Su disposición final ocasiona muchos problemas ambientales, entre los que se encuentra la pérdida de cobertura vegetal, la creación de estructuras poco consolidadas que son susceptibles a la erosión eólica e hídrica, generación de acidez y liberación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) al exponer los minerales de los yacimientos a un ambiente oxidante (Ramos y col., 2004). La concentración de EPT presentes en este tipo de residuos ha sido catalogada como fuente de contaminación de suelo, agua y aire (Mendoza y col., 2006).

La mayoría de los jales se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos y actualmente son acumulados en grandes terrenos conocidos como presas de jales, cuya obra de ingeniería es únicamente la cortina de retención formada por el propio descapote del suelo.

La falta de una regulación ambiental, en materia de contaminación por estos residuos y el impacto generado en el entorno ecológico, han sido las principales causas de la presión pública hacia la industria minera debido a la ocurrencia de desastres como consecuencia del derrame de grandes cantidades de residuos provocados por la ruptura o desplazamiento de las presas o depósitos en los que se encontraban contenidos. En la historia de la industria minera se han registrado accidentes que han dado como resultado el derrame de grandes cantidades de jales mineros, que si bien han sido atendidos inmediatamente, los restos constituyen una fuente potencial de contaminación de agua (Doménech y col., 2002).

Ante la problemática que representan los jales mineros debido a la presencia de EPT, es necesario proponer tecnologías de remediación que ayuden a la estabilización (inmovilización) de los EPT presentes y contribuyan a disminuir el impacto que éstos generan al ser lixiviados y/o erosionados, representando un problema de contaminación.

Por otra parte, el aumento en la producción de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales ha generado un serio problema ambiental debido a su disposición.

En México el 25% del agua residual es tratada y la producción de lodo residual es aproximadamente de 734.4 ton/día, donde el 60% del lodo generado es de tipo primario (Cardoso, 2002). En su mayor parte, los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son dispuestos en tiraderos a cielo abierto (Oropeza, 2006).

Su disposición incorrecta genera muchos problemas entre los que se encuentran: presencia de patógenos, atracción de vectores (insectos, ratas, carroñeros, etc.) y olor desagradable. A esta problemática se suma la generación de lixiviados, con las consiguientes cargas microbiológicas que pueden contaminar los suelos y aguas subterráneas sobre los cuales están siendo depositados (Cueva y col., 2006). Por lo anterior antes de ser utilizados deben ser forzosamente estabilizados, es decir controlar las características que dañan la salud y al medio ambiente (Barrios, 2001).

Cuando los lodos son sometidos a procesos de estabilización, adquieren la categoría de biosólidos, materiales que por su contenido de materia orgánica y características adquiridas después del proceso, pueden ser susceptibles de aprovechamiento (NOM-004-SEMARNAT-2003).

Un hecho rescatable y que representa el interés principal en este tipo de residuos es su alto contenido de materia orgánica, el cual al ser estabilizado da lugar a fracciones de alto peso molecular conocidas como sustancias húmicas capaces de formar compuestos estables con EPT a través de procesos de quelación.

Estudios recientes han mostrado un efecto de estabilización de EPT en jales mineros al utilizar biosólidos, encontrando un efecto significativo en la retención de cationes metálicos como son Cu, Pb, Fe y Mn (Navarro y col., 2008).

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

México es uno de los países más ricos en minerales de toda Latinoamérica. Su desarrollo industrial ha tenido como motor central al sector minero. Sin embargo, aunado a este progreso se ha generado un gran impacto en el medio ambiente.

La introducción en México del proceso de flotación a inicios del siglo XX permitió explotar mayores volúmenes de minerales metálicos generando a la vez generar grandes cantidades de jales que contienen metales en concentraciones que pueden representar un peligro para el medio ambiente.

En el 2004, fue aprobada la Norma Oficial Mexicana, NOM-141-SEMARNAT-2003 *que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales*, la cual sólo aplica para nuevos proyectos. La creación de la norma obedece al hecho de que los residuos mineros contenidos en presas de jales pueden ser liberados ante fallas estructurales y representar un problema de impacto ambiental, por lo que es necesario que el generador realice estudios a fondo en cuanto a la caracterización del sitio final de disposición.

Aunque la Norma anterior establece estrictamente los requisitos de caracterización y disposición final de los residuos mineros, es importante tomar en cuenta que algunos depósitos en los que fueron vertidos los residuos generados en épocas pasadas, se encuentran actualmente fuertemente erosionados y no se conoce su fisicoquímico. El problema anterior se ve acentuado cuando los EPT presentes en jales mineros se encuentran en forma de sulfuros y existe un gran potencial de generación de ácidos en presencia de oxígeno y agua. También, requieren particular atención los jales que contienen altas concentraciones de cianuro empleado en el proceso de beneficio.

2.1. Contaminación por jales mineros

En el pasado los jales fueron depositados en los alrededores de las minas, vertidos en cañadas o ríos sin ninguna consideración ambiental; su composición mineralógica incluye a los sulfuros como la pirita (FeS_2), la pirrotita (Fe_{1-x}S) y la arsenopirita (FeAsS), que al ser expuestos a la intemperie empiezan a reaccionar ante la presencia de oxígeno, agua y microorganismos, iniciándose así un proceso de oxidación. Al ocurrir este fenómeno se generan efluentes ácidos con altas concentraciones de metales en solución, lo que facilita su biodisponibilidad y potencial de lixiviación hacia los depósitos subterráneos.

El grado de disponibilidad de los EPT en jales mineros depende principalmente del valor de pH que presentan, del potencial de óxido-reducción y de la composición química del material; además, también son importantes la mineralogía original, la actividad bacteriana y las condiciones climáticas de la región donde se ubiquen. Estos factores determinan el desarrollo y velocidad de los procesos físicos y químicos que influyen en la liberación y retención de los EPT (Armienta y col., 2005).

Los EPT presentes en jales mineros al transportarse, pueden convertirse en un problema ambiental severo al contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas (Gutiérrez y col., 2007). Algunos de estos EPT, como el arsénico representan un gran peligro por su alto grado de toxicidad, por lo que al mezclarse con aguas naturales puede ser ingerido por organismos vivos, causando efectos dañinos en la salud de las poblaciones (Campos, 2003). Otros metales dadas sus características fisicoquímicas pueden concentrarse en niveles tróficos de las cadenas alimenticias, alcanzando concentraciones que pueden causar problemas a los organismos; en este caso en particular, es importante el riesgo que pueden representar para el ser humano.

Los efectos tóxicos provocados por EPT en los organismos vivos, están basados en la unión de metales en sitios activos que fisiológicamente son ocupados por metales esenciales, desactivando moléculas como enzimas y cambiando la conformación de

moléculas biológicas como proteínas y ácidos nucleicos; de esta manera, alteran la integridad de células y membranas, haciéndolas inactivas (Jjemba, 2004).

Es importante considerar que la toxicidad de los metales y metaloides en los jales estudiados, no depende de su concentración total sino de la concentración de la fracción extraíble bajo condiciones ambientales. La concentración total es una medida útil para estimar la contaminación en suelos, pero no nos proporciona información sobre su solubilidad y/o disponibilidad para las plantas (Walter y col., 2003). La fracción más fácilmente extraíble es la que puede representar un riesgo ambiental, ya que debido a su solubilidad y, por tanto a su movilidad, pueden migrar fácilmente a lo largo del perfil del suelo.

Los residuos generados por la industria minera pueden impactar el entorno ecológico por dos vías principales: *dispersión (eólica e hídrica)* y *lixiviación de contaminantes*. La primera, representa un gran peligro dada la presencia de EPT en las fracciones finas de los jales mineros (partículas menores de 2.5 μm), que en el caso de dispersión eólica, pueden permanecer en el aire, en forma de partículas suspendidas y moverse hasta cientos de kilómetros, afectando la biota y calidad del suelo donde se depositen. En el caso de dispersión hídrica, dependiendo el grado de precipitación, las escorrentías superficiales, pueden contribuir al arrastre de contaminantes hacia los terrenos cercanos. Se ha documentado que la contaminación en suelos, por EPT como Pb, Cd, Zn y As en áreas de influencia de presas de jales, se da generalmente en los sitios cercanos y disminuye a medida que se aleja de ellos (Puga y col., 2006).

La segunda vía que genera un fuerte impacto ambiental por los jales es *la lixiviación de contaminantes*. De manera estricta la lixiviación es la disolución de un metal o mineral en un líquido; en este sentido los jales al estar en contacto con oxígeno y agua participan en reacciones de oxidación que dan como resultado la liberación de EPT que pueden contaminar fuentes de abastecimiento de agua y ecosistemas cercanos.

2.2. Uso de biosólidos en la estabilización de EPT presentes en jales mineros

Los lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, actualmente generan un problema por su disposición, sin embargo al ser sometidos a procesos de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento. Las aplicaciones actuales incluyen: uso en suelos agrícolas (debido a su alto contenido de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio y elementos traza, incluyendo calcio, cobre, hierro, magnesio, manganeso, sulfuro y zinc), restauración de suelos erosionados y como fertilizantes para mejorar la textura y propiedades del suelo.

Una aplicación importante y de relevancia en la realización de este trabajo es el uso de biosólidos en sitios contaminados por metales procedentes de actividades mineras. Estudios realizados reportan el uso de los biosólidos en sitios mineros para la restauración de una cubierta vegetal (Illera y col., 2000; Abbott y col., 2001; Andreoli y col., 2002) además de que recientemente se ha demostrado que pueden ejercer un efecto de estabilización sobre los metales presentes en jales mineros, retardando su lixiviación (Navarro y col., 2008).

CAPÍTULO III. DEFINICION DEL PROYECTO

En este proyecto se pretende evaluar el estado fisicoquímico actual de jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, con el fin de conocer las características fisicoquímicas del material que determinan la movilidad de EPT hacia el ambiente y que pueden ser inmovilizados al aplicar materiales orgánicos como son lodos y biosólidos, compuestos orgánicos que estructuralmente poseen grupos funcionales que son capaces de enlazar cationes metálicos formando complejos de elevada estabilidad evitando su lixiviación y liberación al medio ambiente.

CAPÍTULO IV. JUSTIFICACION

Los jales mineros contienen EPT que pueden representar un riesgo potencial de afectación al medio ambiente y la salud de la población. Sin embargo la movilidad de los metales depende no solo de las características fisicoquímicas de la matriz sólida, sino también de las condiciones fisicoquímicas del medio, las cuales pueden delimitar los campos de estabilidad del material y acelerar los procesos geoquímicos que permiten la liberación de los metales al entorno ecológico.

El distrito minero de Guanajuato posee presas de jales que se encuentra tanto en operación como fuera de operación, depósitos que al no tener una cubierta vegetal, están expuestos a los agentes de intemperismo, provocando la movilización de los EPT presentes en los jales mineros hacia los terrenos cercanos, corrientes superficiales y depósitos subterráneos.

El principal problema de los jales mineros está centrado en la presencia de EPT formando parte de sulfuros polimetálicos, que al estar en contacto con oxígeno y aire tienden a oxidarse, generando efluentes ácidos, facilitando las condiciones para la liberación de los EPT presentes y potencializando su lixiviación hacia los mantos acuíferos.

En base a lo anterior el presente trabajo está centrado en conocer las características fisicoquímicas de jales procedentes del Distrito minero de Guanajuato con el fin de conocer su estado fisicoquímico actual y conocer si existe potencial de lixiviación y proponer el uso de biosólidos en la estabilización de los metales presentes. La aplicación de biosólidos, con un alto contenido en materia orgánica, cuya fracción más importante son las sustancias húmicas con grupos funcionales característicos, permitirá la estabilización de los metales presentes al formar complejos insolubles, evitando su lixiviación.

CAPÍTULO V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

- Evaluar las características fisicoquímicas en jales que potencian la lixiviación de EPT, mismos que pueden ser inmovilizados al aplicar materiales orgánicos con alto contenido en sustancias húmicas.

5.2. Objetivos específicos

- Evaluar el estado fisicoquímico actual de jales mineros para conocer las características que potencian la lixiviación y movilidad de EPT hacia el ambiente
- Disminuir el proceso de lixiviación de EPT en jales mineros al aplicar materiales orgánicos que permitan la formación de complejos estables Metal-Sustancias húmicas.

CAPÍTULO VI. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los jales mineros pueden representar un riesgo para el medio ambiente tomando en cuenta su composición química, es decir el contenido de EPT y contaminantes que puedan estar presentes como resultado del proceso de beneficio empleado tales como cianuro y que bajo condiciones ambientales pueden ser liberados.

La liberación de los EPT presentes en jales mineros está en función de procesos fisicoquímicos que son acelerados cuando los jales mineros son expuestos a fenómenos de intemperismo como son la erosión eólica e hídrica. Los procesos de lixiviación que se llevan a cabo permiten que los EPT sean solubilizados y transportados en la disolución acuosa. Sin embargo es de suma importancia tomar en cuenta que los procesos de lixiviación son favorecidos o atenuados dependiendo de la mineralogía presente, la especie química del metal y de las condiciones fisicoquímicas que predominan en el ambiente. Las consideraciones anteriores resultarán en efluentes con propiedades fisicoquímicas que varían de un sitio a otro; el análisis de los lixiviados tomando en cuenta parámetros como son pH, potencial de óxido reducción, salinidad, sulfatos, alcalinidad, entre otros, es de suma importancia porque permiten inferir si los jales mineros representan un problema por lixiviación de EPT.

6.1. Parámetros de evaluación química en el proceso de lixiviación de EPT en jales mineros.

Debido a que cada uno de los parámetros mencionados anteriormente tienen influencia importante sobre la movilidad de EPT presentes en jales mineros, a continuación se presenta una discusión detallada de cada uno de ellos.

6.1.1. pH

Es uno de los parámetros que más influencia tienen en los procesos edáficos, y en la movilidad de los metales. En general los suelos de pH más básicos presentan adsorción más fuerte para los metales pesados que los de pH más ácidos (Gerriste y Van Driel, 1984; Naidu y Col., 1994).

La influencia del pH se pone de manifiesto al estudiar los procesos de lixiviación en jales mineros, observando un decremento marcado en la movilidad del metal al incrementar los valores de pH y la solubilización de los mismos en condiciones ácidas. Lo anterior es de gran importancia dado el proceso de generación de drenaje ácido que se presenta en jales mineros, producto de la oxidación de los minerales presentes resultando en efluentes con pH muy ácidos <3 y que dan como resultado la liberación del metal.

6.1.2. Salinidad

La salinidad viene determinada por el contenido en sales y es un parámetro de influencia en la movilización de metales pesados. El aumento en la salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados por dos mecanismos; en primer lugar, los cationes asociados con las sales (sodio y potasio) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción y en segundo lugar, los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como cadmio, zinc y mercurio (Doménech X, 1997).

El grado de salinidad se mide indirectamente mediante la conductividad eléctrica (CE), ya que está directamente relacionada con la concentración de iones en disolución.

6.1.3. Potencial de óxido-reducción

La disponibilidad y movilidad de los metales pesados, depende del ambiente oxidante o reductor que predomine con la variación del pH. La solubilidad de zinc, cadmio, cobre y plomo es mucho menor en condiciones reductoras que en condiciones oxidantes, cuando se encuentran en medio ácido, probablemente debido a la formación de complejos órgano minerales y a la formación de sulfuros (Kiekens, 1984). Por otra parte, hay muchos elementos químicos que funcionan con valencias variables, pudiendo oxidarse o reducirse según el ambiente que predomine. Por ejemplo, en la oxidación de minerales primarios el Fe^{2+} se convierte en Fe^{3+} formando óxidos e hidróxidos; la transformación de Mn^{2+} en Mn^{4+} ; la oxidación de S^{2-} , por ejemplo pirita, en sulfatos; transformación de NH_4^+ en nitritos y nitratos (nitrificación). Los suelos generalmente están en contacto con el aire, por lo que presentan condiciones oxidantes. En los suelos hidromorfos (aquellos saturados de forma temporal o permanente por un exceso de agua) la aireación es difícil debido al exceso de agua, lo que tiende a provocar un ambiente reductor.

Los valores de pH y potencial de óxido-reducción en conjunto delimitan los campos de estabilidad de los minerales presentes en jales mineros. Los componentes de Fe y Mn, fracción importante a considerar en la evaluación fisicoquímica de jales mineros, son muy sensibles a cambios de pH y potencial de óxido-reducción.

6.2. Factores que acentúan el proceso de lixiviación en jales mineros

La minería en México ha sido un gran motor de desarrollo en el país, sin embargo los residuos mineros generados pueden representar un peligro para el ambiente debido a los constituyentes tóxicos de los jales, problema que se ve acentuado por la presencia de minerales tipo sulfuro que bajo condiciones de oxidación puedan generar efluentes de carácter ácido. Este problema ha sido punto central en la evaluación de la problemática que representan los jales mineros, ya que en condiciones de pH de carácter ácido, los procesos

de lixiviación son intensificados liberando los EPT que dependiendo su concentración y especie química pueden representar un riesgo para el ambiente y la salud humana.

Debido a esta problemática es importante tomar en cuenta la mineralogía presente en jales mineros, la cual determina la posible generación de acidez y presencia de contaminantes solubles.

6.2.1. Drenaje Ácido de Mina

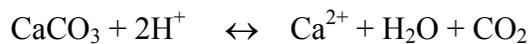
La generación de acidez es ocasionada por la presencia de minerales sulfurosos que bajo condiciones de oxidación, generan efluentes ácidos con altas concentraciones de metales en solución, evento conocido como drenaje ácido de mina (DAM).

Los sulfuros, principalmente los de hierro como la pirita (FeS_2), al oxidarse producen soluciones ácidas de acuerdo a la Ec. 3.1 lo que facilita la liberación de EPT.



La presencia de minerales como la calcita (CaCO_3) contribuyen a la neutralización de la acidez generada incrementando el pH de la solución y agregando alcalinidad a través de los iones bicarbonato (Ec. 3.2 y 3.3). Algunos feldespatos como la Ortoclasa ($\text{K(AlSi}_3\text{O}_8)$) también participan en este proceso debido a los procesos de disolución a los que son expuestos los jales mineros (Ec. 3.4).

Ec. (3.2)



Considerando que la capacidad de los jales para generar DAM depende del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores

potenciales de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos), se han desarrollado diversos procedimientos para medir esta relación y determinar si los jales que contienen sulfuros, son potenciales generadores de drenaje ácido.

Para predecir la generación de DAM, se utilizan pruebas conocidas como “pruebas estáticas” que consisten en determinar el potencial que posee una muestra de generar acidez, a través del balance entre el ácido que se puede producir como producto de la oxidación de los sulfuros presentes, y el ácido que se puede neutralizar por la presencia de carbonatos principalmente. En este sentido los procedimientos más comúnmente utilizados para pronosticar la posible generación de DAM es la denominada “Prueba de balance Acido-Base (ABA)”, por sus siglas en inglés “ Acid Base Accounting ” (Sobek y Col., 1978) y la “Prueba modificada de Balance Ácido-Base” (Lawrence y Wang, 1997).

El desventaja en este tipo de pruebas es que solo aplica para los jales recientes (presas de jales en operación) y no para los históricos (presas de jales fuera de operación) debido a que en éstos últimos ya se han llevado a cabo los procesos de oxidación y con solo determinar su valor de pH se puede valorar su capacidad de generación de acidez (Gutiérrez y Col., 2007).

El otro tipo de pruebas conocidas como “pruebas cinéticas” tienen por objeto determinar la velocidad de generación de DAM, así como analizar el comportamiento químico de los efluentes generados. Los métodos cinéticos más utilizados son las pruebas de lixiviación en miniceldas de alteración (Méndez y Col. 2007), así como las pruebas de lixiviación en columnas, ya que permiten el monitoreo de la acidez generada y la disolución de los metales en los efluentes generados (Cruz y Col., 2001). En estas pruebas los residuos son sometidos a periodos de alteración sucesivos determinando las concentraciones de metales después de la extracción realizada. En el caso de que los resultados obtenidos en la evaluación de los jales mediante las pruebas estáticas posean un alto grado de incertidumbre o sean potencialmente generadoras de DAR, las muestras de jales son sometidas a pruebas cinéticas para su confirmación.

6.2.2. Especiación química

Cuando los jales mineros son expuestos a la intemperie, los procesos físicos y químicos que desarrollan, dan como resultado la disolución de los EPT que se encuentran presentes. La generación de DAM, es uno de los factores que permiten que el metal sea fácilmente soluble al favorecer condiciones ácidas. Sin embargo, a su vez se llevan a cabo procesos de adsorción, precipitación y óxido- reducción que intervienen en la solubilidad del metal, dando paso a fases minerales lo suficientemente estables como para limitar la movilidad del metal bajo ciertas condiciones.

Los jales mineros, como parte de su composición contienen altas concentraciones de EPT, las cuales pueden encontrarse como parte de la mineralogía del material o bien, pueden transformarse o incorporarse en fases sólidas que se vuelven más estables con el tiempo, conduciendo a una disminución en la biodisponibilidad de los EPT, proceso se conoce como intemperización (Ehlers y Luthy, 2003). Atendiendo a lo anterior es de gran interés conocer la concentración soluble; fracción del metal que se encuentra potencialmente disponible y a la cual la población y/o el ecosistema pueden quedar expuestos.

La concentración de EPT que puede ser fácilmente solubilizada depende de las especies químicas presentes, las cuales influyen considerablemente en la movilidad del metal.

Para evaluar dicha concentración se emplean técnicas de extracción química secuencial con el objetivo de determinar la especiación de los metales presentes. La Especiación puede definirse como el proceso de cuantificar las diferentes especies definidas, formas o fases presentes en un material o la descripción de la cantidad y clase presentes de estas especies. (Martínez y Rivero, 2005) y nos proporciona información respecto a la biodisponibilidad y potencial de lixiviación en determinadas condiciones medioambientales.

En el presente trabajo se ha optado por utilizar, la técnica de extracción secuencial propuesta por Tessier y Col., (1979). Este método es sin lugar a dudas el método de extracción secuencial más ampliamente citado y consultado por numerosos autores, el cual

consiste en tratar sucesivamente el jal con reactivos de agresividad creciente, que permitan liberar de manera gradual los metales presentes en función de su capacidad de movilización. En este esquema se evalúan 5 fracciones: metales adsorbidos e intercambiables, metales unidos a carbonatos, metales unidos a óxidos amorfos de hierro y manganeso, metales unidos a sulfuros y metales en forma residual. De esta forma a lo largo del proceso de extracción se van liberando fracciones del metal cuya peligrosidad va decreciendo según se avanza a lo largo del esquema.

Los metales más fácilmente movilizables y por lo tanto más peligrosos son liberados en primer lugar, mientras que la última fracción representa el contenido en metales retenidos en estructuras cristalinas de minerales de tipo primario y secundario que difícilmente son liberados bajo condiciones ambientales.

Una descripción breve de las fracciones evaluadas en el presente análisis son las siguientes:

Fracción I: Metales adsorbidos e intercambiables

Esta fracción está constituida por los metales fijados al suelo mediante reacciones de adsorción a arcillas, óxidos hidratados de hierro y manganeso.

Fracción II: Metales unidos a carbonatos

Los minerales carbonatados son susceptibles a cambios de pH y los EPT asociados a ésta fracción (precipitados o coprecipitados con carbonatos) pueden solubilizarse bajo ciertas condiciones ambientales.

Fracción III: Metales unidos a óxidos amorfos de hierro y manganeso.

Estos óxidos y oxihidróxidos de hierro y manganeso, se presentan como nódulos o simplemente como cemento de unión entre partículas, constituyendo magníficos depósitos

de EPT. Los óxidos aparecen en un grado muy variable de cristalinidad y son termodinámicamente inestables bajo condiciones anóxicas.

Fracción IV: Metales unidos a sulfuros.

Los minerales tales como pirita (FeS_2), marcasita (FeS_2), esfalerita $[(\text{Zn}, \text{Fe})\text{S}]$, calcopirita (CuFeS_2), galena (PbS), pirargirita (Ag_3SbS_3), arsenopirita (FeAsS) y pirrotita (Fe_{1-x}S) que son comunes en jales mineros son depósitos de metales que bajo condiciones de oxidación pueden ser liberados.

Fracción V: Metales en forma residual

El residuo sólido obtenido, después de separar la fracción de sulfuros, está constituido principalmente por minerales primarios y secundarios que pueden contener EPT en su estructura cristalina y que no son fácilmente liberados al menos bajo condiciones naturales, se considera que estos elementos solo pueden movilizarse mediante la digestión del sólido residual utilizando ácidos fuertes y elevadas temperaturas.

6.3. Interacción de la materia orgánica con iones metálicos

Una de las características de la materia orgánica es su habilidad para interactuar con iones metálicos limitando su movilidad y su dispersión en los entornos naturales. De acuerdo a Stevenson, (1994) la química de los metales y sus reacciones en suelos está relacionada a la formación de complejos estables con sustancias orgánicas.

La formación de complejos surge cuando la carga que rodea el ión metálico es reemplazada por otras moléculas o iones, dando como resultado la formación de un *compuesto coordinado*. Las moléculas orgánicas que se combinan con el ion metálico son comúnmente referidas como ligandos y esencialmente, un complejo coordinado surge porque la estructura del ion central no se llena completamente y puede aceptar pares de

electrones adicionales de átomos que tienen un par de electrones disponibles para compartir

Ejemplos de grupos en compuestos orgánicos que tienen pares de electrones y que pueden formar enlaces coordinados con iones metálicos se muestran a continuación.



La mayoría de los metales pueden aceptar más de un par de electrones y un número correspondiente de átomos donadores pueden ser coordinados simultáneamente. El número de átomos donadores que se unen es llamado número de coordinación del ión metálico.

Por otro lado es conocido que la materia orgánica puede formar anillos quelatos con 2 o más sitios adyacentes en la misma macromolécula. Tomando en cuenta lo anterior un complejo quelato surge cuando 2 ó más posiciones coordinadas cerca del ion metálico son ocupadas por grupos donadores de un solo ligando para formar una estructura de anillo interno. Todos los ligandos que forman más de una unión con un ión de metal se llaman ligandos quelantes (del griego chelos que significa garra). El átomo central debe disponer de orbitales vacíos capaces de aceptar pares de electrones, los cationes de los grupos 1 y 2 al disponer de orbitales con poca tendencia a captar electrones tienen poca tendencia a formar complejos, son los metales de transición los que presentan una mayor tendencia.

6.3.1. Papel de las sustancias húmicas en la estabilización de metales

Una fracción importante de la materia orgánica corresponde a las sustancias húmicas, compuestos de alto peso molecular que pueden ser fraccionados en ácidos húmicos y ácidos fúlvicos atendiendo a su solubilidad en diferentes escalas de pH. Los ácidos húmicos son precipitables en un rango de 0-2 y los ácidos fúlvicos aún a esos valores son solubles. La reactividad de las sustancias húmicas está estrechamente relacionada con el tipo y

concentración de grupos funcionales de las mismas; su habilidad en la formación de complejos estables está relacionada con su alto contenido en grupos funcionales, los cuales incluyen carboxilos, carbonilos, alcoholes, hidroxilos, fenólicos y aminos. De acuerdo a Stevenson, (1994), las estructuras húmicas representan una variedad de sitios potenciales para la complejación (Figura 6.1).

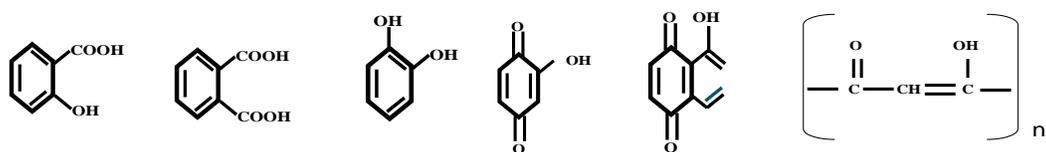
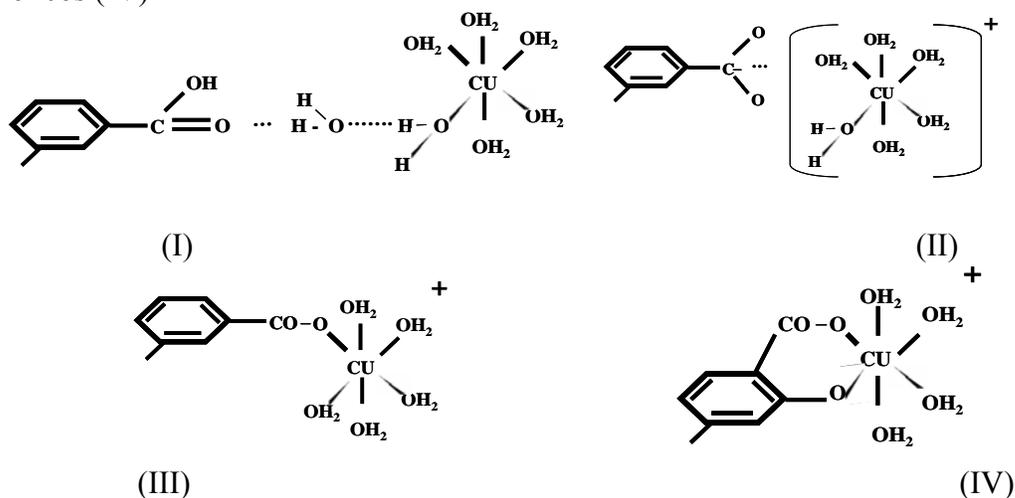


Figura 6.1. Sitios potenciales en la complejación de EPT por sustancias húmicas.

Debido a su naturaleza heterógena, la complejación de metales puede darse a través de distintas fuerzas de atracción electrostática, hasta la formación de enlaces coordinados altamente estables.

Por ejemplo la unión de Cu^{2+} podría ocurrir a través de: 1) puentes de hidrógeno (I), 2) atracción electrostática a un grupo COO^- (II), 3) formación de un enlace coordinado con un grupo donador (III), y 4) formación de anillos quelatos, tales como COO^- con grupos fenólicos (IV)



Actualmente, se ha demostrado que las sustancias húmicas son capaces de formar complejos estables con cationes metálicos a través de procesos de quelación (Schwab y

col., 2007). La interacción de las sustancias húmicas, se traduce en la reducción de los efectos tóxicos de algunos elementos metálicos, debido a la formación de complejos de gran estabilidad con fracciones húmicas de gran tamaño que no son solubles.

CAPÍTULO VII. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la metodología seguida para la evaluación de la peligrosidad de los residuos procedentes de las operaciones de beneficio de minerales metálicos y no metálicos conocidos como jales mineros. Las pruebas consideradas están basadas en el objetivo principal del proyecto: evaluar el potencial de lixiviación que representan los jales mineros procedentes del Distrito Minero de Guanajuato, así como el uso de lodos y biosólidos en la estabilización de los metales presentes. A continuación se muestra el procedimiento experimental empleado (Figura 7.1), el cuál ha sido dividido en 2 etapas: 1) Caracterización fisicoquímica de jales mineros y 2) Evaluación de la estabilización de EPT por lodos y biosólidos.

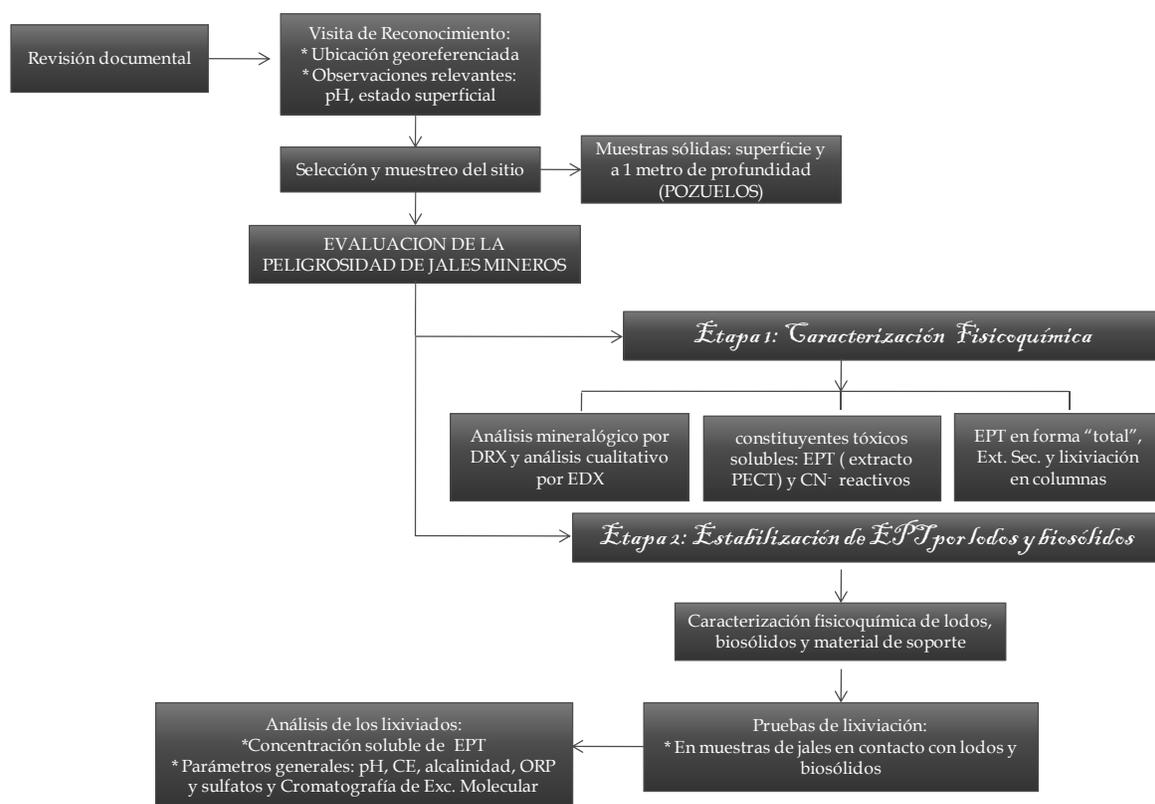


Figura 7.1. Estrategia metodológica para la determinación del potencial de lixiviación de jales mineros procedentes del Distrito Minero de Guanajuato y uso de lodos y biosólidos en la estabilización de los metales presentes.

7.1. Selección del sitio de estudio

En base a la respuesta a la solicitud realizada al sector minero solo se consideraron 4 presas de jales, referenciadas bajo la siguiente denominación: Las Torres (en operación y fuera de operación), ambas identificadas con el mismo nombre, Bolañitos (en operación) y Pozuelos (fuera de operación). Cabe mencionar que en el caso de Pozuelos se puede apreciar un avanzado estado de alteración superficial, producida por la oxidación de los minerales presentes, cubre un área de 1.1 has. y un volumen aproximado de medio millón de toneladas, las cuales fueron tratadas por cianuración y tienen un tiempo de abandono de 75 años aproximadamente (Ramos y Siebe, 2006).

7.1.1. Muestreo

La estrategia desarrollada en el muestreo ante una problemática de interés ambiental, es muy importante debido a la interpretación de los resultados obtenidos; en este sentido y ante la dificultad en la toma de muestras en algunos sitios como lo es el acceso y las condiciones climáticas, el criterio seleccionado para la toma de muestras se basó en diferencias de textura y color superficial (Volke y Col., 2003). Ante la importancia que merece la obtención de muestras representativas, considerando el historial del sitio y el análisis visual, se obtuvieron muestras tanto superficiales como a un metro de profundidad utilizando un nucleador. La ubicación de los sitios muestreados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.1. Localización geográfica de las presas de jales evaluadas (Coordenadas UTM)

X	Y	SITIO MUESTREADO
269460	2323903	Presa de jales Las Torres (en operación)
269585	2324362	Presa de jales Las Torres (fuera de operación)
258040	2331946	Presa de jales Bolañitos (en operación,
264421	2324693	Pozuelos (depósito en abandono)

Los sitios muestreados se identifican como Las Torres en operación (Figura 7.2), Las Torres fuera de operación (Figura 7.3), Bolañitos (Figura 7.4) y Pozuelos (Figura 7.5).



Figura 7.2. a) Toma de muestra en la presa de jales las Torres en operación



Figura 7.3. Toma de muestra en la presa de jales Las Torres fuera de operación



Figura 7.4. Toma de muestra en la presa de jales Las Torres fuera de operación



Figura 7.5. Toma de muestra en la presa de jales fuera de operación Pozuelos

En cada uno de los sitios seleccionados se colectaron muestras de 40 kilos aproximadamente, los cuales fueron trasladados al laboratorio y refrigeradas a 4 ° C hasta su análisis. Para la obtención de una muestra representativa, se procedió a utilizar la técnica de cuarteo que consiste en dividir la muestra en porciones iguales y descartar los extremos hasta la obtención de la cantidad requerida. El material para guardar la muestra consistió en recipientes de polietileno de alta densidad, lavados con una solución de ácido nítrico grado reactivo al 10 %.

7.2. Análisis mineralógico

7.2.1. Microanálisis por Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDX)

La identificación de EPT de forma cualitativa en las muestras sólidas se realizó de manera inicial utilizando la técnica Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X, EDX, por sus siglas en inglés (Energy Dispersive X Ray), la cuál es utilizada para la identificación de la composición elemental de la muestra. El sistema de análisis funciona de forma integrada con el microscopio electrónico de barrido.

El resultado de este análisis se presenta en forma de espectro EDX (o también conocido como microanálisis). El espectro es una gráfica que relaciona la frecuencia con la que es recibido un rayo X para cada nivel de energía. Cada una de las señales, es única para cada

átomo, por lo tanto corresponde a un solo elemento. Entre más intensa es la señal, más cantidad de ese elemento está presente en la muestra. El análisis fué realizado con un equipo JEOL JSM-5400LV.

7.2.3. Identificación de minerales presentes en jales mineros por Difracción de Rayos X

Los depósitos de jales contienen los metales en forma de sulfuros, los cuales pueden ser liberados bajo procesos de oxidación. En base a lo anterior se buscó identificar las fases minerales presentes en las muestras evaluadas para descartar o confirmar la presencia de minerales sulfurosos que pudieran contribuir a la problemática expuesta mediante la técnica de Difracción de Rayos X.

La difracción de rayos X es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina, logrando la identificación de la fase presente.

En la Tabla 7.2 se muestran los minerales más comunes que pueden generar drenaje ácido, así como los elementos traza que se asocian con estos minerales.

Tabla 7.2. Principales especies minerales tipo sulfuros en jales mineros

Nombre	Fòrmula quìmica	Elementos Traza Asociados
Pirita	FeS ₂	As, Sb, Cu, Cr, Ni, Co, Au, Sn
Pirrotita	Fe _{1-x} S	
Arsenopirita	FeAsS	Sb, Bi, Au
Calcopirita	FeCuS ₂	Bi, Se, Au
Esfalerita	ZnS	Fe, Mn, Cd, Hg
Galena	PbS	Ag, Sb, Bi

Fuente (Méndez, 2003).

Para el análisis mineralógico se utilizó la técnica de DRX utilizando un Difractómetro Marca Broker aXS, Modelo D8 Advance, con un rango de medición de 25 a 65 ° 2 θ , a una velocidad de barrido de 2 ° por minuto.

7.3. Análisis químico

7.3.1. Concentraciones de metales solubles (Extracto PECT)

Los jales mineros fueron evaluados de acuerdo a la normatividad mexicana (**NOM-052-SEMARNAT-1993**), que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos y determina la peligrosidad en función de la movilidad de los cationes metálicos.

El procedimiento permite determinar la concentración de metales solubles en un residuo de acuerdo a la prueba de extracción PECT (Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos), establecida en la NOM-053-SEMARNAT-1993.

La muestra se mezcla (~ 30 rpm) con la solución de extracción (relación 1:20), durante 16-18 h a temperatura ambiente. Se utilizan dos soluciones de extracción, dependiendo del pH de la muestra: (A) solución pH 4.9 ± 0.1 ; (B) solución pH 2.9 ± 0.1 . La utilización de las soluciones se decide en base a: si pH > 5, se utiliza la solución B; si pH < 5, se utiliza la solución A. En este caso, para los primeros tres sitios: Bolañitos y Las Torres en operación y fuera de operación se utilizó la solución B y para el caso de pozuelos la solución A. Finalmente el extracto obtenido es analizado por la técnica correspondiente para la cuantificación de los EPT solubles.

7.3.2. Cianuros

Según la historia de producción, en Guanajuato se han extraído aproximadamente 95 millones de toneladas de roca mineralizada que se han beneficiado por diferentes sistemas:

fundición y amalgamación de 1548 a 1905, cianuración de 1905 a la actualidad y flotación de 1946 a la actualidad (Ramos y Col., 2004)

En base a lo anterior, para descartar o confirmar la presencia de cianuros en las muestras de jales la determinación de cianuros reactivos se realizó de acuerdo al procedimiento Método EPA 9014, Titrimetric and Manual Spectrophotometric Determinative Methods for Cyanide

La muestra se coloca en un sistema herméticamente cerrado en medio ácido (Figura 7.6) y se hace pasar nitrógeno como gas de arrastre y los cianuros se recuperan en una solución alcalina. Posteriormente el contenido CN^- recuperado se lleva a un volumen y se cuantifica; los cianuros se acomplejan dando una coloración violeta que tiene su máxima absorbancia a una longitud de onda de 582 nm. La cuantificación se realiza en base a una curva de calibración realizada a partir de un estándar de cianuro y sometido al mismo procedimiento de desarrollo de color que las muestras.



Figura 7.6. Equipo para la determinación de cianuros reactivos.

7.3.3. Concentraciones Totales de Elementos Potencialmente Tóxicos en jales mineros

Los EPT evaluados en el presente análisis corresponden a aquellos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por As, Be, Cd, Cr (VI), Hg, Ni, Pb, Se, Tl y V, con el fin de identificar los elementos presentes en los residuos de jales mineros que bajo condiciones ambientales pueden contaminar los suelos, debido a dispersión de contaminantes o desastres naturales. A su vez se consideraron elementos que por las características del proceso de beneficio y el mineral base pudieran estar presentes como son Cu, Zn, Fe, Mn, Al y Ba.

La digestión de la muestra se realizó mediante el método **EPA SW846-3051**, utilizando una unidad de microondas especial para laboratorio marca CEM, modelo Mars X con una potencia de 1200 W con sensores de presión y temperatura, realizando la digestión a una temperatura de $170 \pm 5^\circ \text{C}$ (Figura. 7.7). Para muestras líquidas se tomaron 45 mL y en el caso de muestras sólidas el tamaño de muestra analizada fué $\sim 0.5 \text{ g}$, los cuales fueron digeridos en una mezcla de ácido nítrico (5 mL), ácido clorhídrico (2 mL) y ácido fluorhídrico (2 mL) durante 20 minutos en el horno de microondas; después de esto la muestra se dejó enfriar, se filtró y se adicionó 1 g de ácido bórico para finalmente aforar a un volumen de 100 mL y realizar las determinaciones por la técnica correspondiente ya sea en ICP o AAS.



Figura 7.7. Equipo de microondas para la digestión de muestras.

La determinación de la concentración total de EPT, se realizó utilizando la técnica de Espectroscopia de Emisión con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP), en un equipo Perkin Elmer, modelo Optima 3300 DV aplicando el método EPA 6010B, revisión 2, 1996. El Mercurio y el Arsénico fueron analizados por Espectrofotometría de absorción atómica Modelo Analyst200/MHS-15 Perkin Elmer y aplicando el método EPA 7470 A, revisión 1, septiembre 1994. El análisis de Mercurio se realizó por la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica con Generador de Hidruros y para el caso del Arsénico por la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica usando Horno de Grafito.

7.3.4. Especiación química

Los residuos antes de ser sometidos a las pruebas de extracción fueron secados a temperatura ambiente y tamizados (malla 2 mm) para la obtención de una muestra más representativa y homogénea.

Las condiciones de trabajo empleadas en cada una de las fracciones en que pueden encontrarse los EPT (intercambiables, unidos a carbonatos, unidos a óxidos, unidos a sulfuros y a la fracción residual), se indican en la Tabla 7.3. En la última fracción se adoptó un método diferente al propuesto por Tessier, el cuál consistió en digerir la muestra con una mezcla de HF, HCl y HNO₃, en horno de microondas, debido al contenido mineral de la muestra, tal como se ha realizado en trabajos recientes (Shaoping y col., 2008).

Tabla 7.3. Condiciones de trabajo utilizadas en procedimiento de extracción secuencial.

Fracción	Extractante	Relación jal/extractante	Condiciones de trabajo
Intercambiable	MgCl ₂ 1 M (pH 7,0-NaOH)	(1:8)	Agitación continua durante 1 h, centrifugación y filtrado
Ligada a carbonatos	NaCH ₃ COO 1.0 M (pH 5,0-CH ₃ COOH)	(1:8)	Agitación continua durante 5 h, centrifugación y filtrado
Ligada a óxidos de Fe y Mn	0.04 M NH ₂ OH.HCl en 25 % (v/v) CH ₃ COOH	(1:20)	Temperatura 96 +/- 3° C, con agitación ocasional por 6 h, centrifugación y filtrado
Ligada a sulfuros	HNO ₃ 0.02 M y H ₂ O ₂ (pH 2-HNO ₃) + CH ₃ COONH ₄ 3.2 M en 20% (v/v) HNO ₃	(1:3:5)	Temperatura a 85 +/- 2° C, con agitación ocasional por 2 h, centrifugación y filtrado, una segunda extracción con CH ₃ COONH ₄ (1:5 m/v), agitación por 30 min, centrifugación y filtrado
Fase residual	HNO ₃ , HF, HCl	(1:5:2:2)	Digestión en horno de microondas

Los extractos obtenidos en cada una de las muestras fueron digeridos y analizados por la técnica correspondiente para determinar el contenido de metales presentes en cada fracción (Figura 7.8).



Figura 7.8. Fracciones obtenidas en el análisis de extracción secuencial.

7.4. Evaluación del proceso de lixiviación en jales

En la realización de la presente prueba, la muestra corresponde al sitio identificado como Pozuelos y seleccionado por presentar un avanzado estado de alteración superficial, resultado de la oxidación de los minerales presentes, así como un pH de 4.9.

Las condiciones experimentales utilizadas durante el desarrollo de las pruebas se muestran a continuación: primeramente se describe el sistema experimental empleado y después se detalla el procedimiento seguido para la obtención de las muestras de jales mineros y los materiales de soporte como son grava y arena.

7.4.1. Preparación de la muestra de jal

Los depósitos de jales son una mezcla de residuos, con diferentes tamaños de partículas, lo cual puede dificultar la manipulación y la obtención de una muestra representativa, lo que conduciría a la obtención de resultados poco confiables, por lo que para asegurar la

confiabilidad de los resultados, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento que consistió en un secado al aire libre, eliminación de gruesos por medio de cribado, homogenización y obtención de la muestra final por el método de cuarteo.

La muestra obtenida al final del proceso anterior, fue sometida a un proceso de tamizado para obtener un tamaño de partícula < 0.250 mm, con el fin de favorecer los procesos geoquímicos que de manera natural se presentan en este tipo de residuos.

7.4.2. Materiales de soporte

Después de la obtención de las muestras de jales con el tamaño de partícula indicado (< 0.250 mm), se prosiguió con los otros materiales (grava y arena), para el montaje de las columnas. El siguiente paso consistió en lavar la arena y grava con HCl concentrado con la finalidad de eliminar las impurezas y las trazas de metales presentes en carbonatos, que podrían afectar los resultados en las pruebas de lixiviación. La arena y grava (Figura 7.9) fueron sometidas a un proceso de lavado que consistió en 2 etapas: a) baño con HCl concentrado y b) lavado con agua destilada (Wizotsky y Cremer, 2003). Para comprobar la eficacia del tratamiento, el agua de lavado fue analizada para descartar la posible presencia de metales traza que pudieran ser un aporte en las pruebas de lixiviación.



Figura 7.9. Grava y arena empleada como soporte en las pruebas de lixiviación.

7.5. Sistema Experimental para pruebas de lixiviación en columnas

Las pruebas de extracción en columna se realizaron en base al sistema propuesto por Doménech y col., (2002), el cual consiste en columnas empacadas con los residuos y el uso de capas de arena y grava para mejorar la infiltración de agua (Figura 7.10).

El sistema experimental empleado consiste en columnas de acrílico de 50 cm de longitud por 10.3 cm de diámetro. En el fondo de la columna se coloca una capa de arena (2 cm) y una capa de grava con un espesor de 3 cm y que sirven de soporte al jal y a la mezcla de materiales, a la vez que evita la compactación a la salida de la columna. Este arreglo se coloca también en la parte superior de la columna con el fin de tener una mejor distribución durante la adición de la solución extractante.

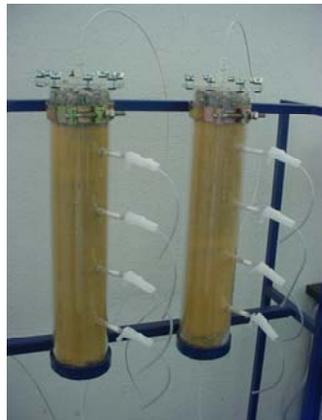


Figura 7.10. Columnas utilizadas para las pruebas de lixiviación en jales procedentes de Pozuelos.

En las pruebas de lixiviación 2 columnas fueron empacadas utilizando 500 g de muestra de jal con un tamaño de partícula <0.250 mm (malla 60), utilizando como solución extractante agua desionizada ajustada a pH 7 y acidificada a pH 5.5 con hidróxido de sodio y ácido clorhídrico con el fin de simular condiciones ambientales.

La adición de la solución extractante, es realizada en la parte superior con ayuda de una bomba peristáltica, con un flujo de 6 mL/min, a una velocidad de 110 rpm. Después de inundar la columna ésta se mantiene por una semana, después se vacía completamente y al extracto obtenido se le determina la cantidad de metales presentes. Posteriormente se deja la columna vacía por espacio de una semana completa y se vuelve a llenar nuevamente con la solución extractante, repitiendo el proceso. A cada una de estas repeticiones se les denomina *evento de lixiviación*.

Para todas las muestras de lixiviados recuperados en las pruebas realizadas, después de su filtración a través de un filtro en papel Whatman de diámetro de poro de 0.45 μm , se llevaron a cabo análisis químicos de los metales utilizando la técnica mencionada anteriormente.

7.6. Análisis del comportamiento químico de los lixiviados

El análisis del comportamiento químico de los lixiviados en jales mineros resulta imprescindible en el estudio de la movilidad de EPT y permite conocer el posible impacto que los jales mineros pueden tener bajo ciertas condiciones ambientales. La determinación de parámetros como son pH, salinidad, alcalinidad, sulfatos y potencial de óxido reducción, permite entender el nivel de afectación de sistemas como son suelo y agua frente a la acumulación de metal. A continuación se describe de forma breve el procedimiento seguido en la evaluación de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

7.6.1. pH

Antes de ser sometidos a las pruebas de lixiviación la determinación del pH en muestras sólidas se realizó en base al método para suelos NMX-AA-008-SCFI-2000, que consiste en mezclar el jal con agua destilada (relación 1:10) durante 10 min. Posteriormente, la mezcla se filtra o se deja decantar durante 10 min, y se mide el pH por medio de un potenciómetro. La determinación en los lixiviados obtenidos se realizó de manera directa por inmersión del

electrodo en la solución. En ambas determinaciones el equipo utilizado consistió en un potenciómetro *Marca Corning 450*, equipado con un electrodo de vidrio marca pinnacle. Para su calibración se utilizaron soluciones Buffer marca Merck de 4.00 (\pm 0.02), 7.0 (\pm 0.02) y 10.08 (\pm 0.05) y un estándar de verificación del CENAM (Centro Nacional de Metrología) de 6.853 ± 0.013 preparado a partir de sus sales (fosfato de potasio monobásico y fosfato disódico).

7.6.2. Salinidad

El grado de salinidad, está expresado como conductividad eléctrica (CE), la cual mide la capacidad de la solución de una matriz sólida para conducir la corriente eléctrica y el resultado expresa indirectamente la concentración total de sales solubles.

La CE en muestras sólidas fue determinada de acuerdo al procedimiento establecido en el Método NMX-AA-093-SCFI-2000 que consiste en preparar un extracto (mezcla de sólidos con agua deionizada), relación 1:10, mezclada durante 10 min. La mezcla se filtra o se deja decantar durante 10 min, y se mide la conductividad en el sobrenadante.

En los lixiviados obtenidos la determinación fue realizada de manera directa por inmersión del electrodo en la solución. El equipo utilizado en las determinaciones corresponde a un *Conductímetro Marca Corning 441*, con un electrodo de cristal marca Corning. Las soluciones de calibración fueron de 1, 413 y 12, 888 μ S, respectivamente marca Hanna y un estándar de verificación de 12880 μ S del CENAM (KCl 0.01 molal).

La clasificación de los jales mineros en base a su salinidad se realizó tomando como referencia la Norma Oficial Mexicana **NOM-021-SEMARNAT-2000** que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Los valores tomados como referencia se muestran en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Criterios para la estimación de la salinidad en suelos.

CE $\mu\text{s/cm}$	Efectos
< 1000	Efectos despreciables de salinidad
1100-2000	Muy ligeramente salino
2100-4000	Moderadamente salino
4100-8000	Suelo Salino
8100-16000	Fuertemente salino
>16000	Muy fuertemente salino

7.6.3. Potencial de Oxido-Reducción (ORP)

En el presente análisis la determinación del potencial de óxido-reducción en cada uno de los lixiviados fué realizada por medición directa en los lixiviados obtenidos utilizando un electrodo de platino y un electrodo de referencia (Ag/AgCl) en un potenciostato de alta impedancia, Marca BAS-zahner (Figura 7.11). Los valores obtenidos son convertidos a la escala de ENH (Electrodo Normal de Hidrogeno).



Figura 7.11. Instrumentos de medición del Potencial de Óxido-Reducción.

7.6.4. Alcalinidad

La alcalinidad es la medida de la capacidad tampón de una disolución acuosa, o lo que es lo mismo, la capacidad de ésta para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base.

Dado que la alcalinidad está determinada generalmente por el contenido de carbonatos y bicarbonatos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. No obstante, algunas sales de ácidos débiles como silicatos pueden también contribuir a la alcalinidad y de estar también presentes estos iones negativos en solución están comúnmente asociados con iones positivos de calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), potasio (K^{+}), sodio (Na^{+}), y otros cationes. El bicarbonato (HCO_3^{-}), constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad por lo cual es expresada en mg/L de CaCO_3 . El análisis se realizó de acuerdo al método NMX-AA-036-SCFI-2000.

A continuación se describe el procedimiento seguido en la realización de este análisis:

1. Se prepara una solución madre de H_2SO_4 0.1 N y se afora a 1 L.
2. De la solución anterior se toman 200 ml y se afora a 1 L para obtener una normalidad de 0.02
3. Se realiza la valoración del ácido sulfúrico, pesando aproximadamente 0.0262 g. de NaCO_3 en 25 mL de agua desionizada, usando anaranjado de metilo como indicador (el vire es color amarillo a canela, se registran los mL gastados del ácido sulfúrico).
4. Se toman 100 mL de muestra y se agrega el indicador anaranjado de metilo y se procede a realizar la valoración.
5. El resultado se reporta en mg/L de CaCO_3

7.6.5. Sulfatos

La presencia de sulfatos solubles en los lixiviados obtenidos en las pruebas de lixiviación de los jales mineros se midió utilizando la técnica de precipitación de sulfato de Bario, cuantificándolo mediante la absorbancia de la suspensión a una longitud de onda de 420 nm de acuerdo al método de prueba NMX-AA-074-1981. A continuación se describe brevemente el procedimiento seguido en la determinación de sulfatos.

1. La curva de calibración es realizada utilizando sulfato de sodio anhidro.
2. Se prepara una solución acondicionadora que consiste en una mezcla: 75 mL de NaCl, 50 mL de Glicerol , 30 mL HCl , 95 mL alcohol y 50 de agua.
3. Se toman 5 mL de la solución anterior y se agregan a cada una de las muestras.
4. Se agrega BaCl₂ y después de 2 minutos se realizan las lecturas.
5. Se lee un blanco de referencia y dependiendo de la concentración se realizan o no diluciones.
6. Se introduce un estándar control (sulfato de sodio anhidro).
7. Se introduce un estándar de verificación CENAM (marca comercial) de 1000 mg/L.
8. Se introduce una muestra adicionada (muestra + estándar control) para determinar el porcentaje de recobro.

7.7. Pruebas de lixiviación en jales con lodos y biosólidos en la estabilización de EPT

La evaluación del uso de materia orgánica en la estabilización de EPT presentes en jales mineros utilizando lodos y biosólidos, se llevó a cabo en columnas empacadas con los residuos, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente en las pruebas de lixiviación de jales. Las columnas fueron empacadas con 500 g de jal y 500 g de lodo o biosólido de acuerdo a la prueba a realizar. Se utilizaron 2 columnas experimentales y 3 columnas control (Figura 7.12). La solución extractante en cada prueba consistió en agua destilada con ajuste de pH a 5.5 y 7.0. Se Indica en la figura como pH 5.5 y pH 7.0.

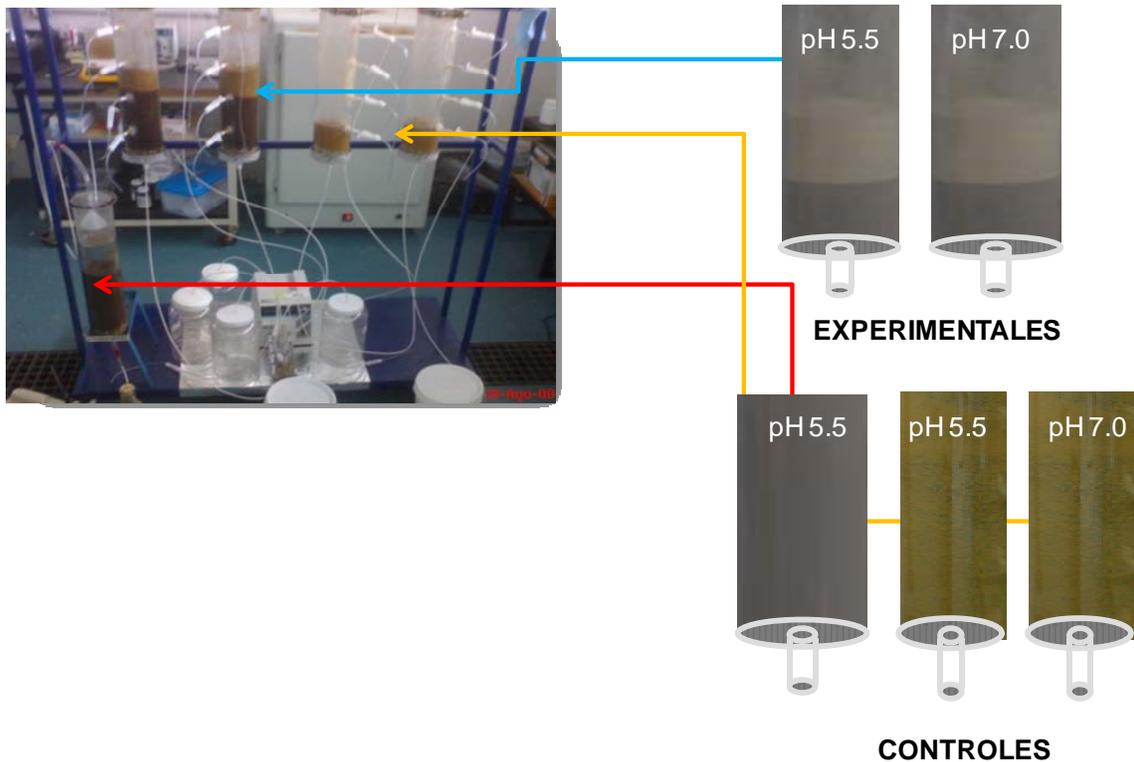


Fig. 7.12. Arreglo experimental en las pruebas de lixiviación en columnas.

7.7.1. Preparación de la muestra de lodos y biosólidos

Con el fin de evaluar el efecto la materia orgánica sobre la lixiviación de metales presentes en las muestras de jales se trabajó con 2 muestras: lodo residual y biosólidos (lodos sometidos a un proceso de compostaje). los cuales fueron obtenidos de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Con el objeto de favorecer los procesos de disolución y el contacto de los **materiales reactivos** (lodos y biosólidos), se procedió a cribar, triturar y tamizar el material hasta alcanzar un tamaño de partícula < 0.250 mm. El procedimiento para la obtención de los biosólidos se muestra en la Figura 7.13. Un proceso similar fue empleado para el lodo residual, después de haber sido secada durante 2 semanas al aire libre (Figura 7.14).

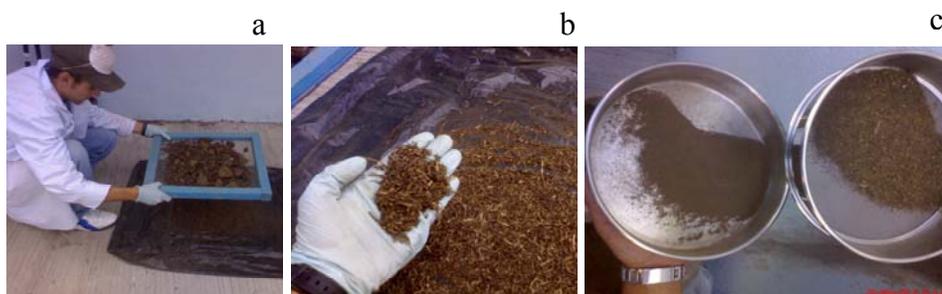


Figura 7.13. Obtención de la muestra de biosólido a) cribado, b) muestra homogeneizada y c) tamizado

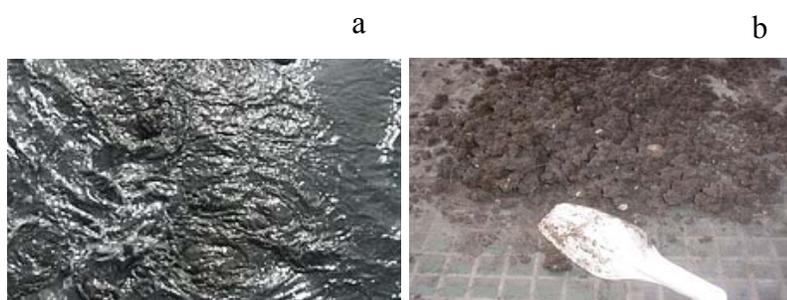


Figura 7.14. a) Lodo residual sin secar y b) lodo obtenido después de un proceso de secado.

7.8 Análisis del comportamiento químico de los lixiviados

El análisis de la calidad química de los lixiviados en las pruebas de estabilización de EPT por el uso de lodos y biosólidos como material reactivo se realizó tomando en cuenta los siguientes parámetros: metales, pH, conductividad eléctrica y carbono orgánico total (COT).

El análisis de carbono orgánico total permitió evaluar la cantidad de materia orgánica liberada bajo las condiciones utilizadas, por lo que un análisis por Cromatografía de Exclusión Molecular (SEC) fue considerado en la identificación de fracciones de bajo peso molecular presentes en la materia orgánica soluble.

El procedimiento para la determinación de pH y Conductividad eléctrica fueron descritos anteriormente, por lo que a continuación solo se menciona el procedimiento seguido en el análisis de Carbono Orgánico Total y Cromatografía de Exclusión Molecular (SEC).

7.8.1. Carbono Orgánico Total (TOC)

Los lixiviados obtenidos en cada una de las pruebas de lixiviación fueron centrifugados a 9,000 rpm en una centrifuga *Marca Fisher Cientific* y filtrados utilizando membranas de celulosa de 0.45 μ . Una vez obtenidos los filtrados, fueron sometidos a análisis de Carbono Orgánico Total en un equipo Shimadzu TOC-5050^a

7.8.2. Cromatografía de Exclusión Molecular

Los lixiviados obtenidos en las pruebas de extracción en columna en tratamientos de jales mineros con biosólidos fueron sometidos a análisis por cromatografía de exclusión molecular con la finalidad de identificar fracciones de diferente peso molecular que pudieran liberarse bajo las condiciones empleadas.

Se utilizó un cromatógrafo de líquidos de alta resolución HPLC marca Agilent (Agilent Technologies, Palo Alto, CA) serie 1100, equipado con un automuestreador y un detector con arreglo de diodo (DAD). La columna cromatográfica fue empacada con Toyopearl HW-50 F marca TOSOH.

La curva de calibración, se llevó acabo utilizando estándares de pesos moleculares específicos en Kda (Azul dextrano-2,000, albúmina-66, anhidraza-29, citocromo-12,4 y aprotinina-6,5) y el rango de UV-Visible para la detección de las fracciones moleculares correspondió a 254-600 nm.

El sistema fue estabilizado utilizando como fase móvil pirofosfato de sodio 10 mMol/L (pH 10.3) y como fase estacionaria gel Toyopearl HW-50 F marca TOSOH. Se utilizó un flujo de 0.5 mL/min y un volumen de inyección de 100 μ L.

CAPÍTULO VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en la caracterización química de las muestras de jales procedentes del distrito minero de Guanajuato. Los resultados que a continuación se presentan, corresponden a los análisis mineralógicos y químicos realizados en el proceso de análisis. Después de haber realizado la caracterización química se realizaron pruebas en columnas con el objetivo de evaluar el proceso de lixiviación de EPT presentes en los residuos mineros. La presa de jales evaluada en las pruebas de lixiviación corresponde a Pozuelos, seleccionada por presentar un pH ácido (4.9), así como minerales que incluyen la pirita, mineral que bajo condiciones de oxidación puede generar efluentes de carácter ácido lo que provocaría la movilización de los EPT presentes. Tomando en cuenta lo anterior, se muestran los resultados del análisis químico de los lixiviados obtenidos con el fin de evaluar el grado de lixiviación de los metales presentes.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos en pruebas de lixiviación utilizando lodos y biosólidos (lodos sometidos a un proceso de compostaje), materiales orgánicos cuyas fracciones coloidales ácidos húmicos y fúlvicos juegan un papel importante en la inmovilización de EPT presentes en jales mineros.

8.1. Caracterización química de jales mineros

En el presente estudio fueron analizadas cuatro presas de jales identificadas en el siguiente orden: Las Torres en operación, Las Torres fuera de operación, Bolañitos y Pozuelos. En todas las muestras de jales se realizaron análisis mineralógicos y químicos, que permitieron evaluar el posible riesgo que representan los EPT presentes en este tipo de residuos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los análisis considerados en la caracterización de las presas de jales evaluadas.

8.1.1. Microanálisis por Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDX)

Un análisis semicuantitativo o “microanálisis”, fue llevado a cabo en muestras sólidas de cada una de las presas de jales por medio de Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX), herramienta de análisis del microscopio electrónico de barrido a un voltaje de aceleración de 15 keV. El análisis permitió identificar en forma cualitativa los elementos presentes en fases sólidas. En el caso del jal proveniente de Las Torres en operación (Figura 8.1) se identificó la presencia de Si, Ca, Mg, K y Ti, así como EPT como son el Fe, Cu, Zn, y Mn. Sin embargo, elementos de carácter más tóxico como son Pb, Cr, As y Se no fueron identificados. Una observación importante es la presencia de Azufre (S), la cuál es atribuida a minerales de tipo primario posiblemente como los sulfuros.

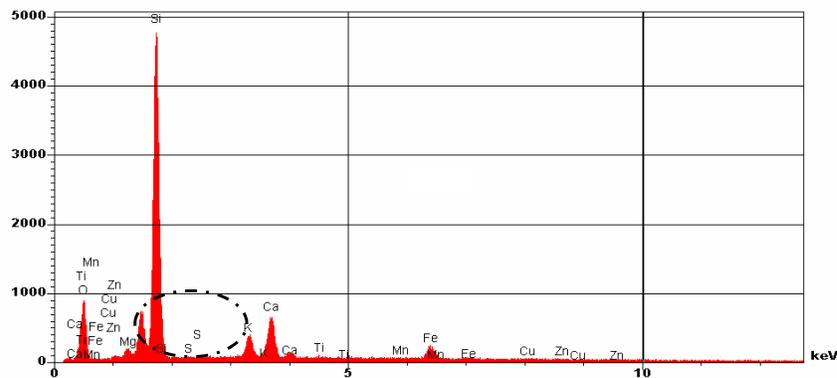


Figura 8.1. Microanálisis por EDX de jales recientes procedentes de la presa de jales en operación Las Torres.

Para el caso de la presa Las Torres fuera de operación (Figura 8.2) los EPT identificados son los mismos que para el sitio anterior además de Pb; la ausencia de Azufre en ésta presa es razonable ya que tiene un tiempo de abandono de 35 años, por lo que se infiere que ya han tenido lugar los procesos de oxidación y neutralización sobre los minerales tipo sulfuro que se encontraban presentes, así como de lixiviación, permeación y percolación.

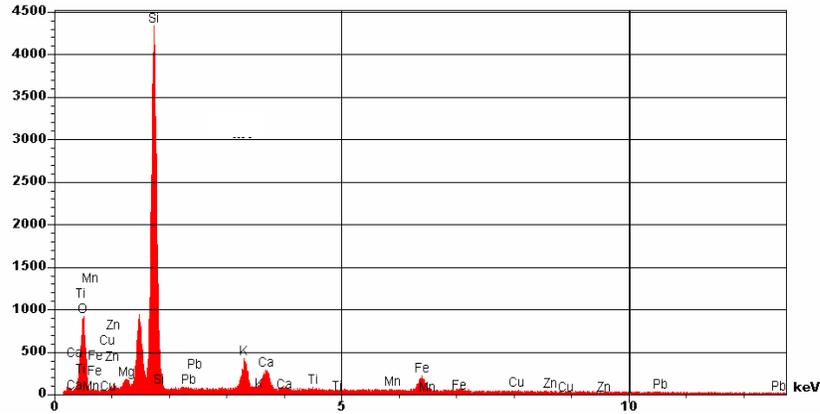


Figura 8.2. Microanálisis por EDX de jales históricos procedentes de la presa de jales Las Torres fuera de operación.

En la Presa de jales en operación Bolañitos (Figura 8.3), los elementos que se identificaron incluyen al Si, Ca, Ti, Mg y S. Los EPT en este depósito corresponden solo a Fe, Mn, Zn, Cu y Tl.

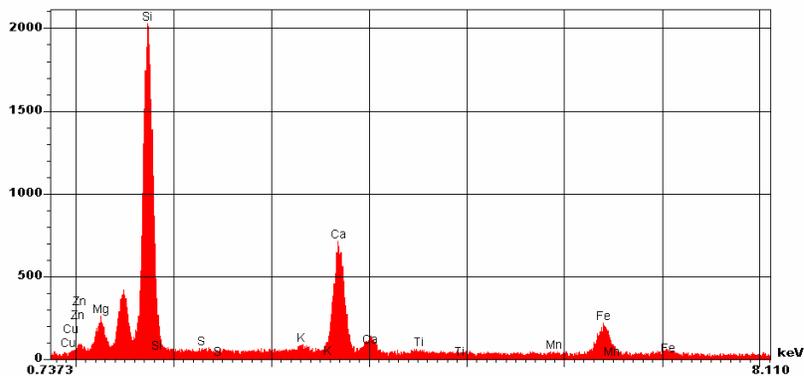


Figura 8.3 Microanálisis por EDX de jales recientes procedentes de la mina en operación Bolañitos.

Para el sitio de Pozuelos (Figura 8.4), los elementos identificados corresponden a Si, Ti, Ca, Al, S y K. Como EPT solo se identificó el Fe.

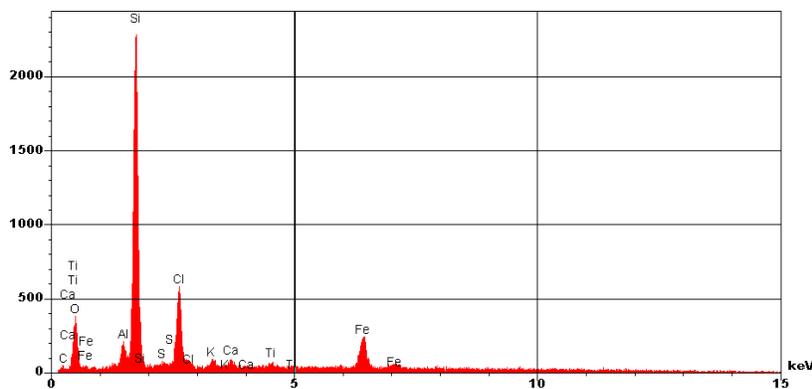


Figura 8.4 Microanálisis por EDX de jales recientes procedentes de Pozuelos.

Bajo las condiciones empleadas en este análisis (Voltaje de aceleración a 15 Kev), no fue posible la identificación de EPT como son As, Cd, Pb y Hg que aún en concentraciones bajas pueden causar efectos nocivos en los organismos vivos (Manahan, 1989).

8.1.2. Caracterización Mineralógica por Difracción de Rayos X

Para descartar o confirmar la presencia de minerales tipo sulfuro, que al oxidarse pudieran generar efluentes de carácter ácido, liberando los EPT presentes; las muestras fueron sometidas a un análisis mineralógico por Difracción de Rayos X (DRX).

Los resultados mostraron que en términos generales los residuos mineros están constituidos mayoritariamente por cuarzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) y en menor proporción covelita (CuS), en las primeras tres presas de jales: Las Torres en operación (Figura 8.5), Las Torres fuera de operación (Figura 8.6) y Bolañitos (Figura 8.7). La presencia de calcita indica que es poco probable la generación de acidez, dada la posible neutralización por este mineral el cual determina los valores de pH básicos característicos de estos depósitos.

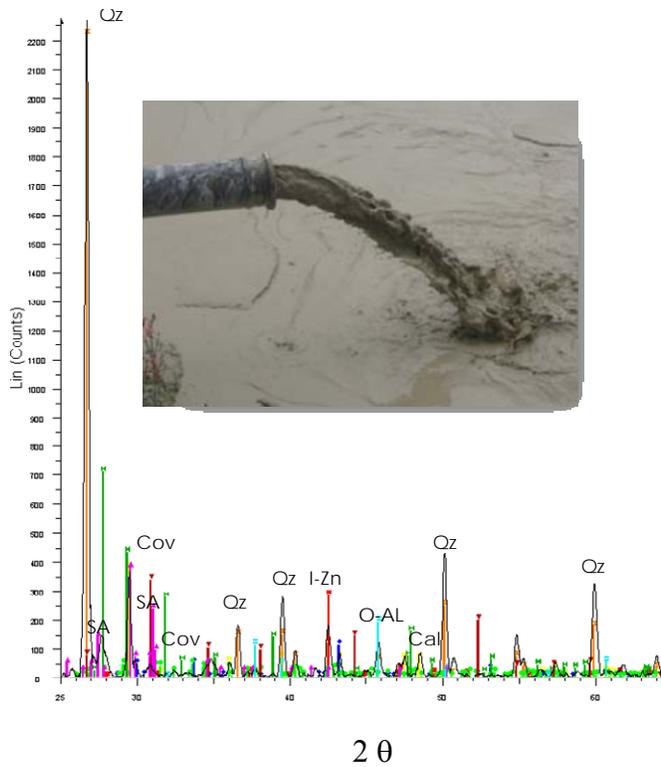


Figura 8.5. Espectro de Difracción de Rayos X de jales correspondientes a la mina Las Torres en operación. Cuarzo-Qz (SiO_2), Covelita-Cov (CuS), Calcita-Cal (CaCO_3), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ (I-Z)

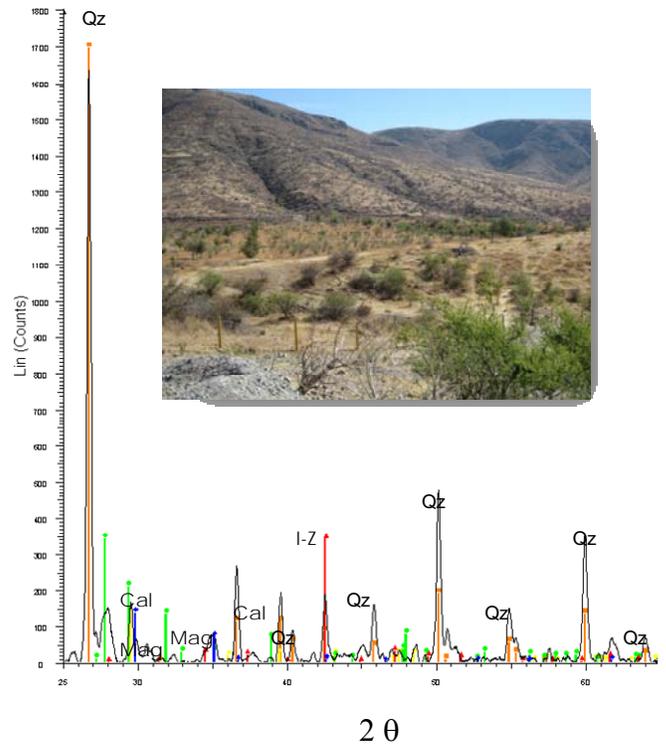


Figura 8.6. Espectros de Difracción de Rayos X de jales correspondientes a la mina Las Torres fuera de operación. Cuarzo-Qz (SiO_2), Calcita-Cal (CaCO_3), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ (I-Z) y Magnetita-Mag (Fe_3O_4)

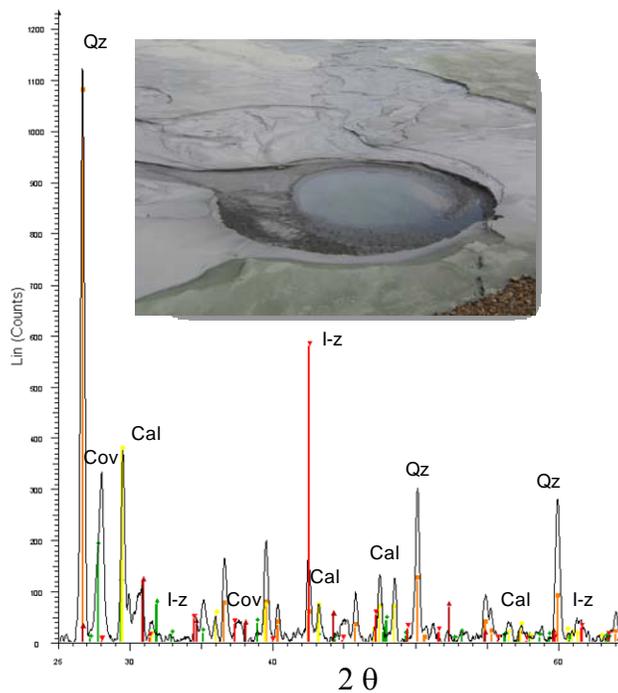


Figura 8.7. Espectro de Difracción de Rayos X de jales correspondientes a la mina Bolañitos. Cuarzo-Qz (SiO_2), Covelita-Cov (CuS), Calcita-Cal (CaCO_3), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ (I-Z).

Para el caso de Pozuelos, las pruebas de DRX realizadas a muestras superficiales (Figura 8.8) no identificaron la presencia de minerales tipo sulfuro lo cual era de suponerse debido posiblemente a los procesos de oxidación llevados a cabo. Sin embargo, en las muestras tomadas a 1 m de profundidad (Figura 8.9), se logró identificar la presencia de piritita (FeS_2), mineral tipo sulfuro que en contacto con oxígeno y agua es capaz de generar drenaje ácido de mina (DAM).

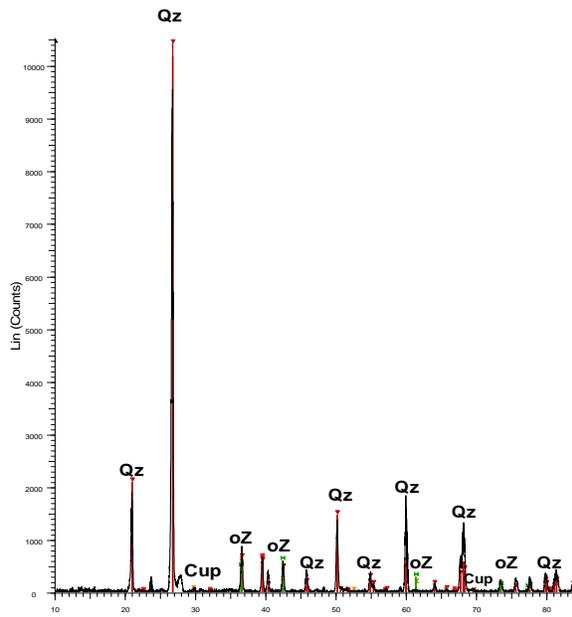


Figura 8.8. Espectro de Difracción de Rayos X de jales correspondientes a Pozuelos en muestra superficial. Cuarzo (Qz-SiO_2), cuprita ($\text{Cup-Cu}_2\text{O}$) y Oxido de Zinc (Oz-ZnO).

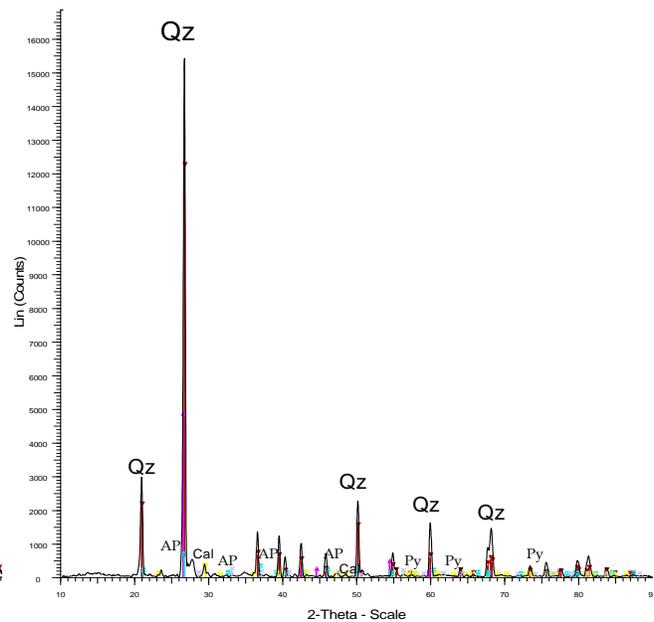


Figura 8.9. Espectro de Difracción de Rayos X de jales correspondientes a la mina Pozuelos a 1 m de profundidad. Cuarzo-Qz, Piritita-Py, Arseniato de Plomo-AP (PbAs_2O_6) y Calcita.

8.2. Análisis químico de jales mineros

8.2.1. Concentraciones solubles (Extracto PECT)

Otro punto a considerar en la evaluación de la peligrosidad de EPT presentes en jales es la presencia de EPT que puedan ser solubles bajo ciertas condiciones. Actualmente los jales mineros pueden ser caracterizados como residuos tóxicos en base a su concentración de

contaminantes tóxicos solubles de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Para la caracterización de los jales mineros como residuos peligrosos en base a su concentración soluble se llevó a cabo el procedimiento descrito en la Norma Oficial Mexicana-NOM-053-SEMARNAT-2003, el cuál consiste en la preparación de un extracto en el que los metales son cuantificados y si la concentración supera el límite máximo permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, los jales mineros son considerados como peligrosos.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8.1, indicando que la concentración soluble no excede el límite máximo permisible (LMP), por lo que ninguna de las muestras de jal se considera como residuo peligroso en base a este criterio.

Tabla 8.1. Determinación de EPT solubles en jales mineros por el método PECT.

EPT	LMP* (mg/L)	Presa de jales			
		Las Torres en operación	Las Torres fuera de operación	Bolañitos	Pozuelos
Arsénico*	5,00	<0,00105	<0,00105	<0,00105	<0,00105
Cadmio *	1,00	0,07	<0,062	0,068	<0,062
Cromo *	5,00	0,129	0,148	0,1	0,049
Níquel *	5,00	0,021	<0,018	<0,018	<0,018
Mercurio*	0,20	<0,00022	<0,00022	<0,00022	<0,00022
Plomo *	5,00	<0,049	<0,049	<0,049	0,164
Selenio *	1,00	<0,300	<0,300	<0,300	<0,300
Berilio	NE	<0,021	<0,021	<0,021	<0,021
Talio	NE	<0,124	<0,124	<0,124	<0,124
Vanadio	NE	<0,033	<0,033	<0,033	0,043
Cobre	NE	0,234	0,243	0,221	0,254
Zinc	NE	0,341	0,35	0,293	0,161
Fierro	NE	<0,021	<0,021	<0,021	<0,021
Cobalto	NE	<0,022	<0,022	<0,022	<0,022
Manganeso	NE	5,59	5,67	5,01	0,056

8.2.2. Concentraciones Totales de EPT en la muestra de jal

La concentración total de EPT presentes en jales mineros es de gran importancia porque permite estimar el grado de contaminación existente y a su vez establecer criterios de peligrosidad tomando en cuenta la normatividad.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las presas de jales evaluadas. En primer lugar se presentan los elementos encontrados en mayor proporción y después se realiza un análisis para identificar los metales que representan un riesgo a la salud humana, tomando como base criterios establecidos por algunos países, incluyendo México.

Atendiendo al primer punto, los resultados de los análisis de las muestras de jal mostraron altas concentraciones de Calcio, Potasio, Sodio y Aluminio, lo cual indica la posible presencia de minerales base como los feldespatos. A este grupo de minerales corresponden los silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio, o mezclas de estas bases y cuya meteorización permite la formación de carbonatos que son responsables de la neutralización de la acidez generada en los jales. Adicionalmente los carbonatos son capaces de adsorber en su superficie los EPT presentes en los jales.

De acuerdo a los resultados obtenidos para la presa de jales Las Torres en operación (Figura 8.10), los elementos identificados en mayor concentración corresponden a Al (59,176 mg/kg), K (28,188 mg/kg), Ca (26,989 mg/kg), Fe (21,591 mg/kg), Na (18,032 mg/kg) y Mg (7,097 mg/kg). De la lista anterior el Fe es el único EPT identificado en altas concentraciones.

Además de los elementos mencionados anteriormente, con el método de digestión empleado, se pudieron identificar otros metales de interés debido a su toxicidad en las siguientes concentraciones: Mn (745 mg/kg), Ba (553 mg/kg), Tl (273 mg/kg), Zn (76 mg/kg), Ni (53 mg/kg), V (48 mg/kg), Cr (42 mg/kg), Pb (39 mg/kg), Cu (15 mg/kg) y Be (5 mg/kg). Cabe mencionar que algunos de estos elementos como son Tl, Zn, Ni, V, Cr, Pb, Cu y Be, se encuentran actualmente regidos por la *Norma Oficial Mexicana NOM-052-*

SEMARNAT-1993 y la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, según se considere el material como residuo o como suelo, respectivamente.

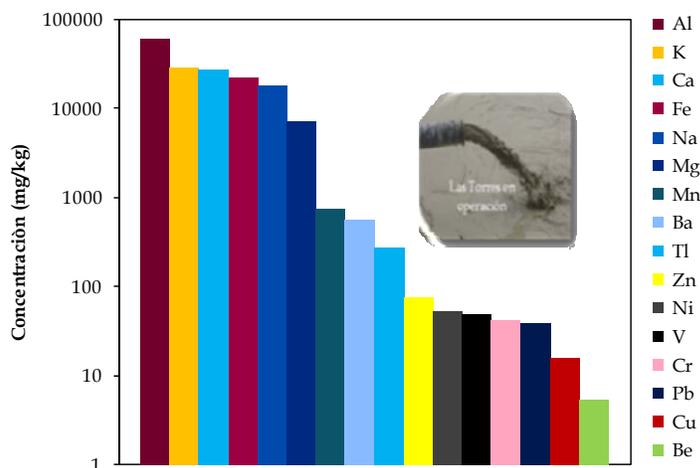


Figura 8.10. Principales elementos identificados en la presa Las Torres en operación.

En la presa de jales Las Torres fuera de operación (Figura 8.11) la tendencia fué similar; los elementos en mayor concentración fueron Ca (76,569 mg/kg), Al (40,383 mg/kg), K (22,590 mg/kg), Fe (17,852 mg/kg), Mg (8,396 mg/kg) y Na (5,757 mg/kg). Sin embargo la cantidad de Ca presente en este depósito, triplicó la concentración correspondiente a las Torres en operación con 76,569 y 26,989 mg/kg, respectivamente.

Dentro de los EPT además del Fe, fueron identificados los siguientes: Se (3,818 mg/kg), Mn (977 mg/kg), Tl (469 mg/kg), Ba (381 mg/kg), Ni (78 mg/kg), Zn (68 mg/kg), V (49 mg/kg), Cr (47 mg/kg), Pb (39 mg/kg), Cu (20 mg/kg) y Be (4 mg/kg). De los elementos anteriores, el Se destacó significativamente, mismo que no fue detectado en la presa de Las Torres en Operación.

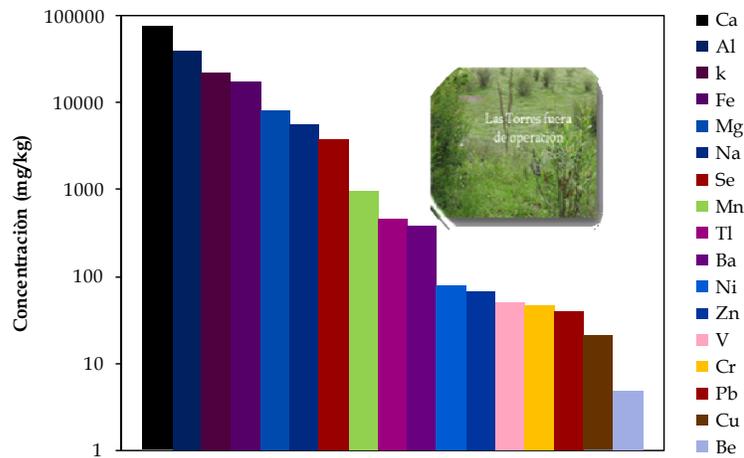


Fig. 8.11. Principales elementos identificados en la presa Las Torres fuera de operación.

Los resultados para la presa de jales en operación Bolañitos (Figura 8.12) correspondieron nuevamente a altas concentraciones de Ca (99,920 mg/kg), Na (73,741 mg/kg), Al (57,553 mg/kg), Fe (46,362 mg/kg), Mg (32,174) y K (6,794 mg/kg). En este depósito las concentraciones de Ca, K, Na, Fe, y Mg difirieron significativamente de los sitios correspondientes a las Torres. Las concentraciones de EPT fueron determinadas en el siguiente orden: Mn (1,153 mg/kg), Tl (499 mg/kg), Cr (174 mg/kg), V (127 mg/kg), Ba (103 mg/kg), Ni (84 mg/kg), Zn (47 mg/kg), Pb (28 mg/kg) y Cu (18 mg/kg). De éstos últimos Mn, Cr y V, superaron en concentración a los jales provenientes de Las Torres tanto en operación como fuera de operación.

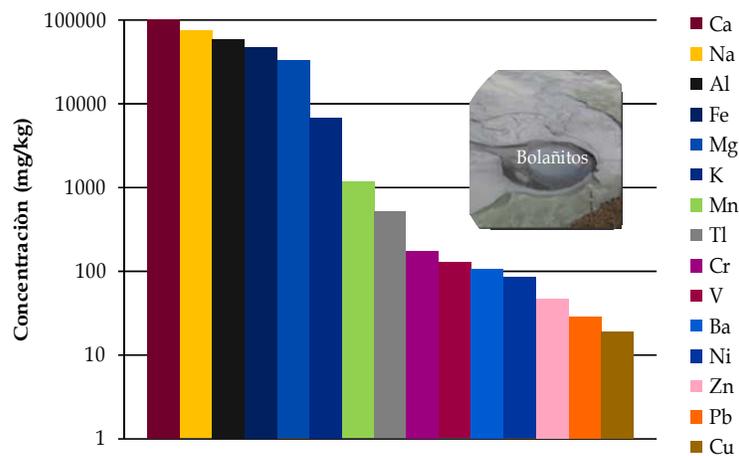


Figura 8.12. Principales elementos identificados en la presa en operación Bolañitos

Para el caso de Pozuelos (Figura 8.13), los elementos mayoritarios obedecen a Na (54,881 mg/kg), Fe (49,688 mg/kg), Al (30,886 mg/kg), Ca (11,991 mg/kg), K (14,462 mg/kg) y Mg (2,130 mg/kg). En éste depósito la concentración de Fe, fue superior a las presas de jales correspondientes a las Torres y Bolañitos.

Las concentraciones registradas para EPT son las siguientes: Mn (572 mg/kg), Ba (308 mg/kg), Tl (77 mg/kg), Se (66 mg/kg), V (59 mg/kg), Ni (59 mg/kg) y Cr (53 mg/kg). Un hecho importante y de interés ambiental es la presencia de EPT como son Cu (126 mg/kg), Pb (317 mg/kg) y Zn (316 mg/kg), cuyas concentraciones estuvieron por encima de los valores registrados para las presas de las Torres y Bolañitos.

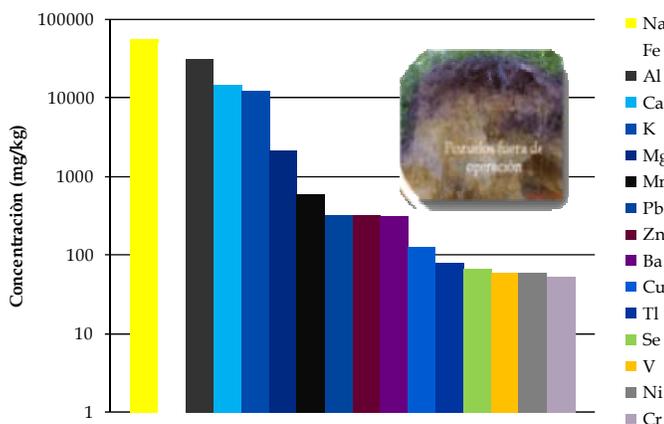


Fig. 8.13. Principales elementos identificados en la presa fuera de operación Pozuelos.

Con el fin de poder estimar el grado de contaminación que presentan los EPT presentes en jales mineros, se realizó un cuadro comparativo (Tabla 8.2), y se señalaron elementos que representan un problema de toxicidad en base a su concentración. Los resultados son expresados en mg/kg y se comparan con los valores límite establecidos por la normatividad en diferentes países. En México se toma como referencia los valores referidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA-2004), que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo (VI), mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio

En este análisis se consideran los criterios de limpieza para suelo industrial y residencial, debido a que existe población cercana a las presas de jales y tomando en cuenta el uso que actualmente se está dando a las presas de jales en abandono como lo es la construcción de centros deportivos.

Tabla 8.2 Concentración total de EPT en mg/kg y criterios de peligrosidad.

EPT	CONTENIDO TOTAL (mg/kg)				USO		CRITERIO-PAIS	
	Las Torres en operación	Las Torres fuera de operación	Bolañitos	Pozuelos	AG-RSD	IND	RSH	RE
Fe	21,591	17,852	46,362	49,688			23000³	
Ca	26,989	76,569	99,920	11,991				
K	28,188	22,590	6794	14,462				
Al	59,176	40,383	57,553	30,886				
Ba	553	381	103	308				
Mn	745	977	1,153	572				
Na	18,032	5,757	73,741	54,881				
Mg	7,097	8,396	32,174	2,130				
Co	< 9.12	<9.12	< 9.12	< 9.12				
Cr	42	47	174	53	280⁴	510⁴		
Cu	15	20	18	126			63¹	63¹,60²,50³,96⁵
Pb	39	39	28	317	400⁴	750⁴	140¹,300²,200⁴	70¹,300²,100³
Se	< 60	3,818	< 60	66	390⁴	5100⁴		
V	48	49	127	59	550⁴	7200⁴		
Zn	76	68	47	316	NR	NR	200¹.800⁴	200¹,300⁴,200³
Ni	53	78	84	59	1600⁴	20000⁴		
Cd	<25.64	<25.64	< 25.64	< 25.64	37⁴	450⁴	20⁴	20⁴
Tl	273	469	499	77	5.2⁴	67⁴		
Be	5	4.79	<3.8	<3.8	150⁴	1900⁴		
As	44	27	85	45	22	260⁴	20⁴	20⁴



¹Canada, ²Australia, ³EUA, ⁴Mexico y ⁵Holanda

RSH: Riesgo a la Salud Humana, RE: Riesgo Ecológico, AG-RSD: Agrícola-Residencial y IND: Industrial

De acuerdo a los criterios considerados, los EPT presentes en las presas de jales evaluadas que pueden ser fuente potencial de contaminación en base a su concentración son los siguientes: Para el caso de Las Torres en operación corresponden a Tl (273 mg/kg) y As (44 mg/kg). Para Las Torres fuera de operación son Se (3,818 mg/kg), Tl (469 mg/kg) y As (27 mg/kg). En Bolañitos se consideran Fe (46,362 mg/kg), Tl (499 mg/kg) y As (85 mg/kg) y

para Pozuelos, los EPT a considerar están representados por Fe (49,688 mg/kg), Cu (126 mg/kg), Pb (317 mg/kg), Zn (316 mg/kg), Tl (77 mg/kg) y As (45 mg/kg).

Es importante considerar la presencia de los EPT listados ya que actualmente los depósitos no poseen una cubierta que pueda disminuir el impacto en el ambiente por erosión eólica e hídrica.

Además, la concentración de EPT presentes en los jales mineros, puede representar un riesgo a la salud de la población ya que el material fino de los jales al ser erosionado puede ser transportado a los terrenos cercanos donde puede tomar diferentes vías: puede bioacumularse o si existe la presencia de partículas $< 2\mu\text{m}$ puede permanecer en el ambiente por tiempos prolongados.

8.2.3. Cianuros

El cianuro es un compuesto químico utilizado en la industria minera para disolver y extraer metales preciosos como lo son el Oro y la Plata a partir de minerales base por el proceso químico denominado lixiviación. Su presencia en los depósitos de jales mineros puede resultar altamente tóxica dependiendo de su concentración, además de que los compuestos formados tienen una alta movilidad. Su exposición por periodos breves a altas concentraciones causa daño al cerebro y al corazón que conduce a un estado de coma y a la muerte.

En base a lo anterior, los residuos fueron evaluados, determinando las concentraciones de cianuros reactivos o fácilmente liberables. El límite máximo permisible de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993 es de 250 mg de ácido cianhídrico por kilogramo de residuo. Las concentraciones de Cianuro en las muestras analizadas permanecieron por debajo del límite de detección (<0.374 mg/kg) en cada una de las muestras evaluadas (Tabla 8.3), por lo que los jales mineros se consideran no tóxicos en base a este criterio.

Tabla 8.3 Concentración de Cianuros Reactivos en jales.

Concentración (mg/kg)				
PRESA DE JALES				
	Las Torres en operación	Las Torres fuera de operación	Bolañitos	Pozuelos
CIANUROS	< 0.374	< 0.374	< 0.375	< 0.374

8.2.4. Especiación química

Aunque los resultados del análisis de concentración total mostraron cantidades significativas de EPT, es necesario conocer las especies químicas presentes, las cuales determinan el grado de movilidad de los elementos presentes.

Los resultados de la extracción secuencial, mostraron que dada la heterogeneidad de los residuos mineros, en base a su mineralogía y condiciones fisicoquímicas actuales, los metales pueden encontrarse en diferentes formas químicas, que bajo ciertas condiciones del medio en el que se encuentren, pueden movilizarse o quedar fuertemente retenidos sin representar un riesgo para el medio ambiente.

En el caso de la presa de jales en operación Las Torres, los metales se encuentran en formas muy estables (Figura 8.14). La distribución de los metales en las distintas fracciones consideradas se menciona a continuación: El Fe como fracción intercambiable solo fue identificado en un 0.08 %, como carbonatos 13.10 %, como óxidos 73.15%, como sulfuros 0.13% y residual 12.92%. Aunque el Fe es uno de los EPT encontrados en mayor concentración de acuerdo al análisis de concentración total (21,591 mg/kg), la fracción intercambiable es muy pequeña, predominando su asociación a óxidos los cuales retienen fuertemente al metal. Con respecto al Mn la fracción intercambiable correspondió a 11.76%, como carbonatos a un 47.98%, como óxidos a 28.57%, como sulfuros a 4.91% y residual a 12.92%. En este caso la fracción predominante correspondió a carbonatos, sin

embargo la fracción intercambiable correspondiente al 11.76%, fue muy significativa, por lo que se esperaría que este elemento participara en los procesos de lixiviación. Por otro lado, aunque en primer lugar la fracción intercambiable es la más importante en procesos de lixiviación, la presencia de metales en forma de carbonatos puede ser susceptible de lixiviación ante cambios de pH, de acuerdo a las condiciones del medio.

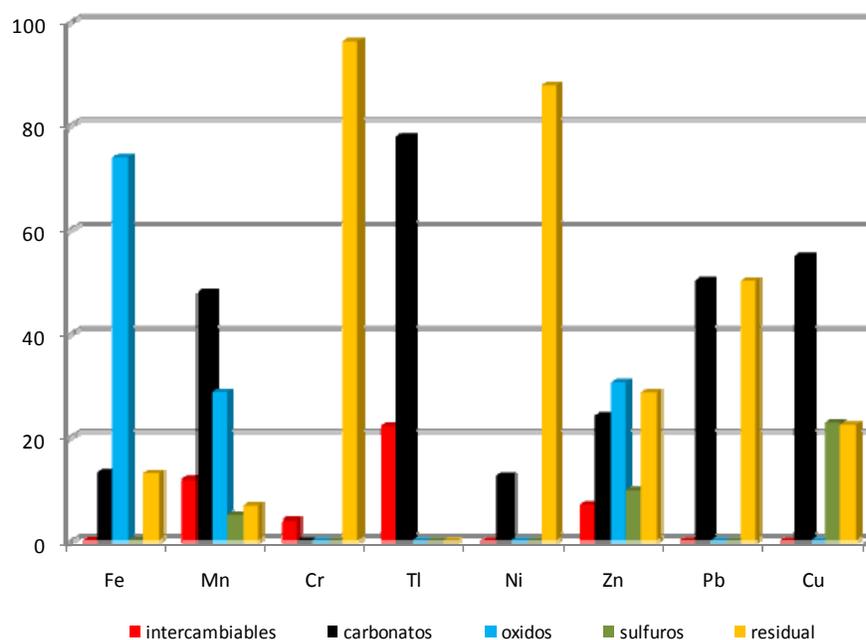


Figura 8.14. Distribución porcentual de EPT en jales mineros, Las Torres en operación.

Otro de los EPT de carácter tóxico es el Cr, su distribución en este depósito es representada por la fracción intercambiable con 3.92% y la fracción residual con 96.07%. Es importante mencionar que el esquema de especiación tiene como última fracción de análisis la residual y los metales presentes en esta forma difícilmente participan en procesos de lixiviación, lo que permite inferir que el Cr, no se lixivia fácilmente. Para el caso del Tl su distribución corresponde a un 22.09% como fracción intercambiable y 77.90% como carbonatos. El Ni solo fue identificado como carbonatos en un 12.39% y como fracción residual con 87.60%. La distribución del Zn es la siguiente: intercambiable-6.95%, carbonatos-24.17%, óxidos-30.52%, sulfuros 9.85% y residual-28.48%. El plomo es otro de los EPT comunes en jales mineros su distribución en este depósito esta representada únicamente por la

fracción unida a carbonatos-50.03% y la fracción residual-49.97%. El Cu permaneció en la fracción de carbonatos con 54.89 %, sulfuros-22.78% y residual-22.34%.

En el presente análisis la fracción intercambiable es muy importante para fines de lixiviación; los EPT presentes en ésta fracción y de consideración en la presa Las Torres en operación corresponden a Mn-11.76%, Cr-3.92 %, Tl-22.09 % y Zn-6.95%.

Para el caso de la presa Las Torres fuera de operación (Figura 8.15) las formas químicas en las que se encuentran los metales corresponden a la fracción de carbonatos, óxidos y residual. En el caso del Fe la fracción predominante es la residual con 82.65%, la fracción intercambiable corresponde solo a un 0.06%. Las fracciones predominantes para Mn están representadas por óxidos-59.22% y residual-22.58%. En cuanto a Cr, la mayor concentración se encuentra en la fracción residual con 93.81%. Para el Tl, la concentración máxima fue detectada en carbonatos-83.18% y el caso del Níquel, el mayor porcentaje se encuentra en la fracción residual con 83.13% y carbonatos-16.86%, la fracción intercambiable no fue detectada. El Zn se encuentra distribuido preferentemente en carbonatos-44.65%, sulfuros-25.80% y la fracción residual-20.05%. El plomo se encuentra distribuido en la fracción de carbonatos-37.07 % y en la fracción residual-62.92%. El Cu solo fue identificado en la fracción de carbonatos-79.30% y óxidos con un 20.71 %.

Los metales con posibilidad de lixiviación en la presa las Torres fuera de operación asociados a la fracción intercambiable corresponden a Mn-3.87%, Cr-6.18%, Tl-16.81%, y Zn-5.23%

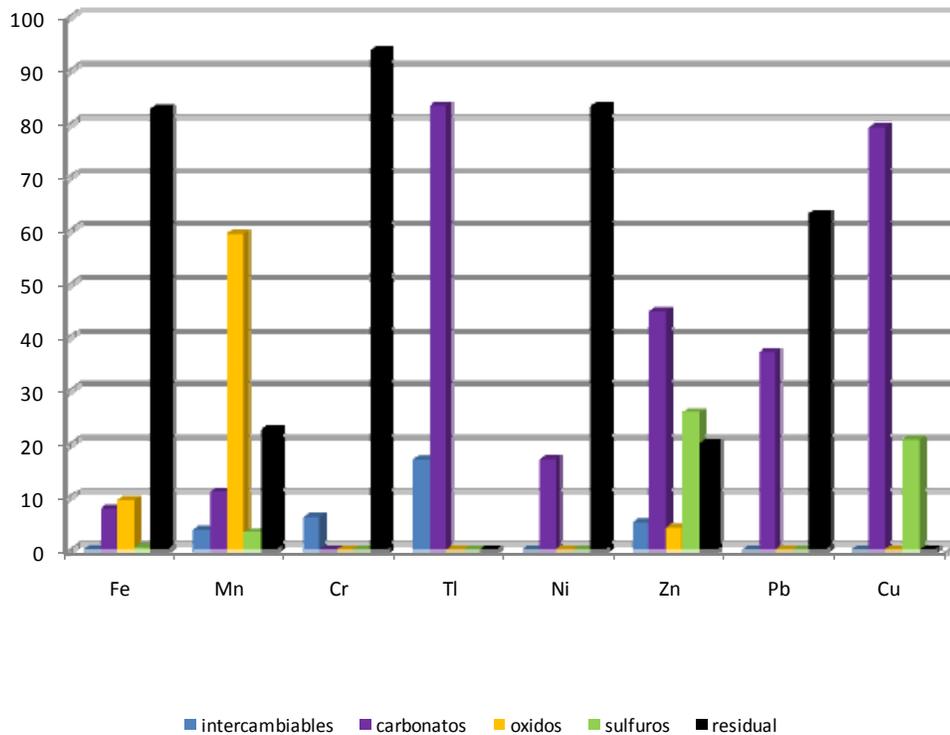


Figura 8.15. Distribución porcentual de EPT en jales mineros, Las Torres fuera de operación.

Con respecto a Bolañitos (Figura 8.16) la distribución de los metales es la siguiente: Fe se encuentra preferente distribuido en óxidos-29.78% y la fracción residual-64.85%. El Mn en óxidos-28.19% y residual-64.66%. Para el Cr la concentración casi en su totalidad corresponde a la fracción residual-98.58%. En el Tl se tienen 2 fracciones importantes que corresponden a carbonatos-58.46% y residual-33%. Para Ni, la concentración se encuentra principalmente en carbonatos-18.85% y la fracción residual-81.14%. La distribución de Zn está representada por carbonatos-31.29% y residual-49.22%. La concentración de Pb fue identificada en su totalidad en la fracción residual-100%. Para Cu, la mayor concentración se obtuvo en la fracción correspondiente a carbonatos-57.24%, seguida de la fracción de sulfuros-30.62%.

En este depósito los metales identificados en la fracción intercambiable en forma significativa corresponden a Mn-3.40%, Tl-5.14%, Zn-9.91% y V-40.72%.

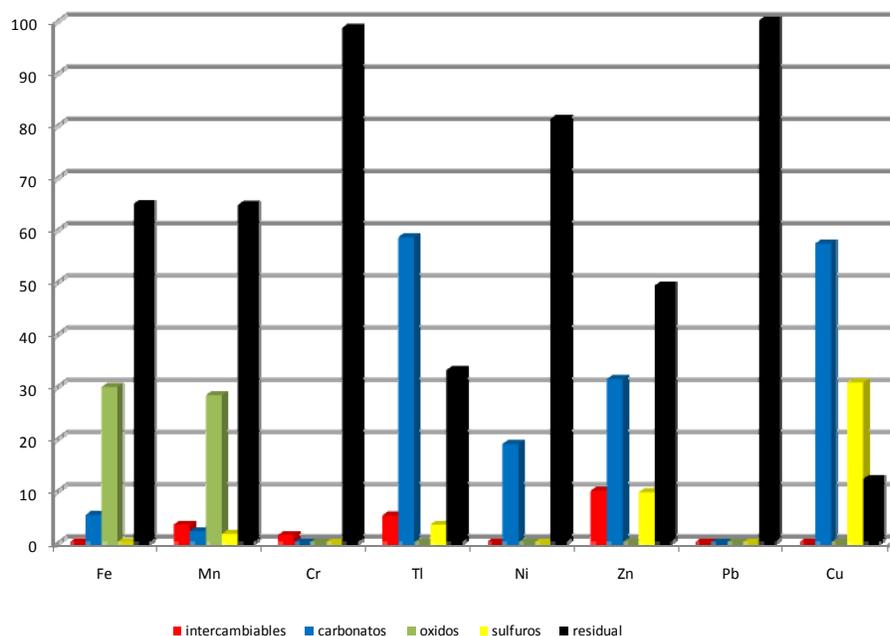


Figura 8.16. Distribución porcentual de EPT en jales mineros, Bolañitos.

Los resultados obtenidos para la presa de Pozuelos (Figura 8.17) se mencionan a continuación: para Fe, la concentración predominante es la residual-67.98 %, seguida de la fracción correspondiente a óxidos-23.94%. En el caso de Mn la mayor concentración se identificó en la fracción residual-68.07% y en la fracción de intercambiables-23.24%. El Cr destacó significativamente en la fracción residual con 92.71%, la fracción intercambiable corresponde a 7.36%. Para el Tl, las concentraciones fueron distribuidas en intercambiables-51.01%, carbonatos-31.61% y sulfuros-17.37%. En cuanto al Ni, la fracción predominante fue la residual-100%. Para Zn, las fracciones de mayor concentración corresponden a carbonatos-24.76%, sulfuros-18.73% y residual-52.14%. El Pb presentó la mayor concentración en la fracción residual-77.55%, seguida de carbonatos-22.44% y para el Cu, la distribución corresponde a residual-59.27%, sulfuros-16.46% y carbonatos-21.58%.

Cabe mencionar que de los metales identificados en la fracción intercambiable destacan principalmente Mn-23.24%, Tl-51.01%, además de Cr-7.36%, Zn-4.36% y Cu-2.69%, todos ellos con posibilidad de lixiviación en función de las características fisicoquímicas del medio en el que se encuentren.

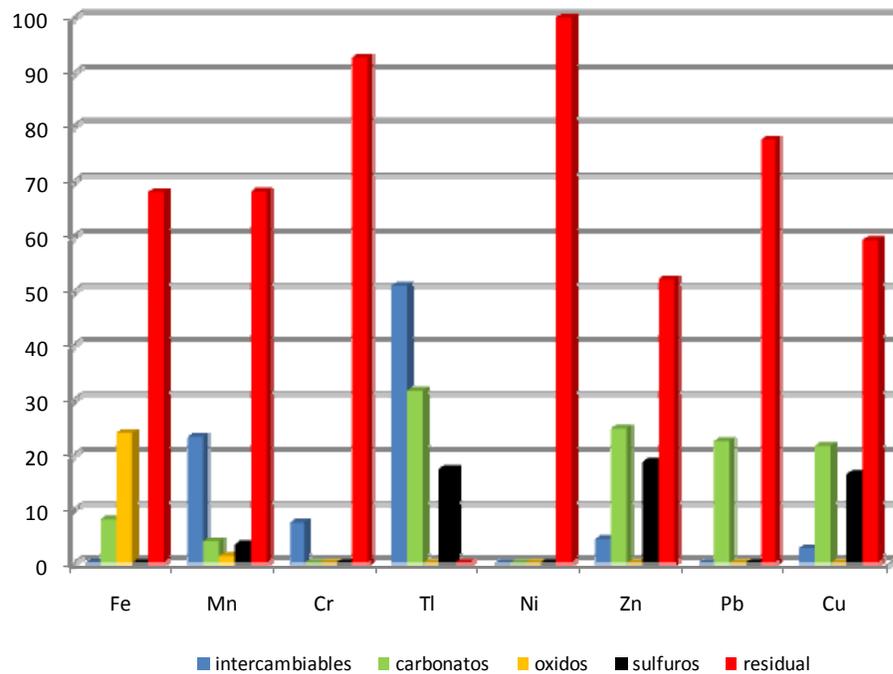


Figura 5.17. Distribución porcentual de EPT en jales mineros, Pozuelos.

La extracción secuencial indicó que a pesar de que hay cantidades importantes de metales presentes en las muestras de jal trabajadas, la fracción intercambiable es muy pequeña en todos los casos, con excepción de Mn, Talio y Vanadio, lo que permite inferir acerca de la estabilidad de los metales ante procesos de lixiviación.

8.3. Pruebas de Lixiviación

De manera inicial en cada una de las muestras de jales mineros se determinó el valor de pH en extractos preparados con muestras sólidas. Los resultados indicaron condiciones alcalinas en cada una de las presas de acuerdo a los siguientes valores: Las Torres en operación (7.73), Las Torres fuera de operación (7.86), Bolañitos (8.32) y en el caso de Pozuelos se obtuvo un valor de pH de 4.9 evidenciando condiciones ácidas. Los valores de pH alcalino, indican que actualmente las presas de jales no están generando acidez, sin embargo para el caso de Pozuelos el valor de pH registrado y la presencia de minerales tipo

sulfuro como la pirita (FeS_2), mineral identificado en las pruebas de DRX, sugieren que actualmente se están llevando a cabo procesos de oxidación que dan como resultado el pH de carácter ácido.

Tomando en cuenta lo anterior y considerando los resultados obtenidos en la extracción secuencial que indican que en Pozuelos se tienen porcentajes considerables de EPT que pueden ser lixiviados bajo condiciones ambientales características del medio éste depósito fue seleccionado para llevar a cabo pruebas de lixiviación en columnas con el fin de conocer el grado de lixiviación de EPT bajo condiciones de laboratorio que simulan a aquéllas que pueden presentarse de manera natural y ocasionar la liberación de los EPT presentes.

Antes de empacar las columnas los materiales de soporte como son grava y arena fueron sometidos a lavados ácidos, y la solución final fue evaluada con el fin de conocer los EPT que pudieran resultar un aporte al realizar las pruebas de lixiviación con los jales mineros.

A continuación se presentan los resultados obtenidos: primeramente se mencionan los resultados obtenidos en el análisis de la solución resultante del lavado de grava y arena y posteriormente, los resultados de las concentraciones de EPT solubles al realizar las pruebas de lixiviación así como los resultados del análisis del comportamiento químico de los lixiviados.

8.3.1. Lavado de grava y arena

Antes de empacar las columnas, la arena fué lavada previamente con HCl concentrado para eliminar las impurezas y trazas de metales que pudieran interferir en el análisis. Después de lavados sucesivos con agua deionizada y obtener un pH cercano al del agua utilizada, el sobrenadante fué analizado para descartar el aporte de EPT que pudieran estar presentes en la grava y arena. Los resultados mostrados en la Tabla 8.4, indicaron que los EPT de interés en el presente estudio como son Co, Cr, Cu, Pb, Zn, Ni y Cd permanecieron por debajo del Límite de detección.

Tabla 8.4. EPT en grava y arena lavada con HCl.



EPT	Fe	Al	Mn	Co	Cr	Cu	Pb	Se	V	Zn	Ni	Cd	TI	Ca	K	Mg
(mg/L)	1.22	2.24	0.04	<0.020	<0.027	<0.037	<0.044	0.25	<0.030	<0.025	<0.016	<0.056	<0.112	3.8	7.1	1.4

8.4. Pruebas de lixiviación en jales mineros procedentes de Pozuelos

Los resultados se muestran en la Tabla 8.5, utilizando como agente extractante agua deionizada a pH 7.0 indican que la lixiviación solo es significativa en el primer evento, con excepción del Fe, posiblemente debido a la oxidación de la pirita. A partir del segundo evento de lixiviación la concentración de metales lixiviables, disminuye considerablemente hasta encontrarse por debajo del límite de detección para la mayoría de los elementos.

Tabla 8.5. Lixiviación de EPT a pH 7.0

Evento de lixiviación	Solución lixiviante	Elementos Potencialmente Tóxicos (mg/L)								
		Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	V	TI
1	H ₂ O a pH 7.0	1.39	0.62	<0.037	0.27	0.28	0.17	0.22	<0.030	5.09
2	H ₂ O a pH 7.0	0.52	0.17	<0.037	0.16	0.09	<0.027	<0.016	<0.030	<0.112
3	H ₂ O a pH 7.0	1.54	0.07	<0.037	<0.044	<0.025	<0.027	<0.016	<0.030	<0.112
4	H ₂ O a pH 7.0	1.64	0.06	<0.037	<0.044	<0.025	<0.027	<0.016	<0.030	<0.112

Un comportamiento similar fue observado al usar como agente de lixiviación agua deionizada ajustada a pH 5.5. La concentración de metales lixiviables solo fué significativa

en el primer evento, indicando un ligero aumento en la concentración de elementos como son Fe, Mn, Pb, Ni y Tl para el primer evento en comparación con la prueba realizada a pH 7.0. (Tabla 8.6).

Tabla 8.6. Lixiviación de EPT a pH 5.5

Evento de lixiviación	Solución lixiviante	Elementos Potencialmente Tóxicos (mg/L)								
		Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	V	Tl
1	H ₂ O a pH 5.5	2.56	0.64	<0.037	0.27	0.25	0.13	0.25	<0.030	6.60
2	H ₂ O a pH 5.5	0.44	0.14	<0.037	<0.044	0.09	0.06	<0.016	<0.030	<0.112
3	H ₂ O a pH 5.5	0.62	0.04	<0.037	<0.044	<0.025	<0.027	<0.016	<0.030	<0.112
4	H ₂ O a pH 5.5	1.44	0.04	<0.037	<0.044	<0.025	<0.027	<0.016	<0.030	<0.112

8.4.1. Análisis del comportamiento químico de los lixiviados

Los lixiviados obtenidos fueron evaluados en base a cinco parámetros que muestran evidencia de la alteración causada durante el desarrollo de las pruebas en la que los procesos de disolución, precipitación y adsorción pueden tener un efecto significativo: pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, sulfatos y potencial de óxido-reducción. Se determinó el valor de pH en cada una de las muestras obtenidas en los diferentes eventos de lixiviación. La Figura 8.18 muestra los resultados obtenidos, los cuales permiten apreciar la capacidad tampón del sistema, es decir, la relativa estabilidad del pH del medio que imponen los jales mineros. Los valores de pH van de valores neutros a medianamente alcalinos, lo que indica que la disolución de minerales con potencial de neutralización durante el proceso de lixiviación, consumió la acidez generada por la oxidación de pirita (FeS₂), la cual fue identificada mediante el análisis de Difracción de Rayos X.

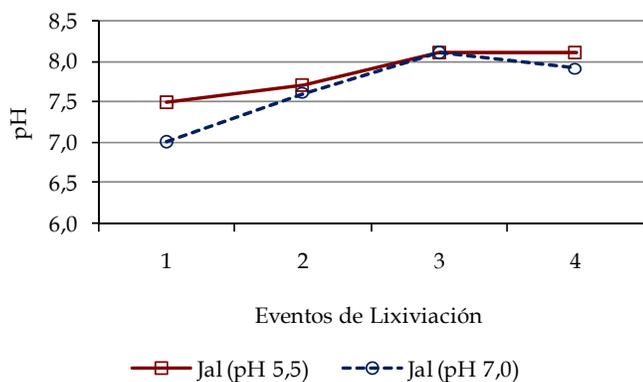


Figura 8.18. Comportamiento del pH en función del número de lixiviados.

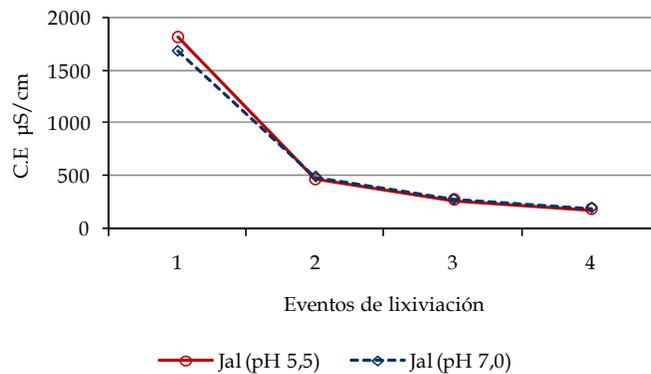


Figura 8.19. Comportamiento de la CE en función del número de lixiviados.

El grado de salinidad en los lixiviados, únicamente fue significativo en el primer evento de lixiviación, posteriormente la presencia de sales disminuyó considerablemente (Figura 8.19). Esta determinación también permite confirmar la limitada movilidad de los EPT bajo las condiciones empleadas.

Por otro lado la generación de acidez, evento conocido como Drenaje Acido de Mina (DAM), está caracterizado por altas concentraciones de sulfatos como principal producto de oxidación de minerales tipo sulfuro como lo es la pirita (FeS_2). Antes de llevar a cabo las pruebas de lixiviación y para descartar el aporte de sulfatos por otras fuentes, se determinó la concentración inicial de sulfatos solubles en la muestra de Pozuelos, la cual permaneció por debajo del límite de detección ($<1.08 \text{ mg/l}$).

Los resultados de las pruebas de lixiviación de los jales de Pozuelos, indicaron la presencia de sulfatos, en concentraciones muy bajas (Figura 8.20). Únicamente de manera inicial la concentración fué significativa y disminuyó considerablemente a partir del segundo evento, lo que indica que la presencia de minerales tipo sulfuro en la muestra no es lo suficientemente alta para lograr acidificar el medio permanentemente, resultado que concuerda con los valores de pH determinados.

La alcalinidad es expresada en mg/L de CaCO_3 (Figura 5.21), es atribuida a la disolución de minerales del tipo carbonatos, lo cual otorga la estabilidad de los valores de pH. El primer evento de lixiviación es el más significativo y posteriormente la concentración CaCO_3 de tiende a permanecer constante lo que permite apreciar su efecto en los valores de pH obtenidos.

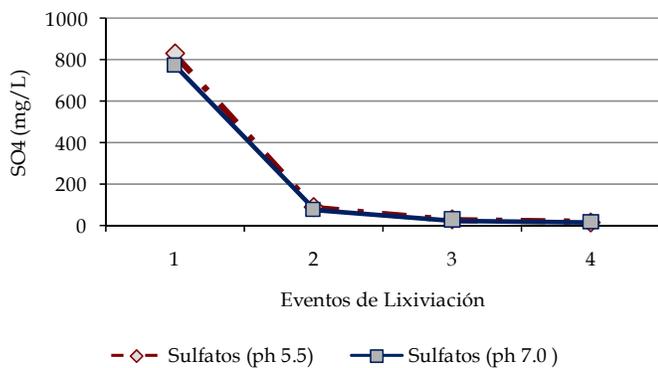


Figura 8.20. Liberación de sulfatos en los procesos de alteración simulada.

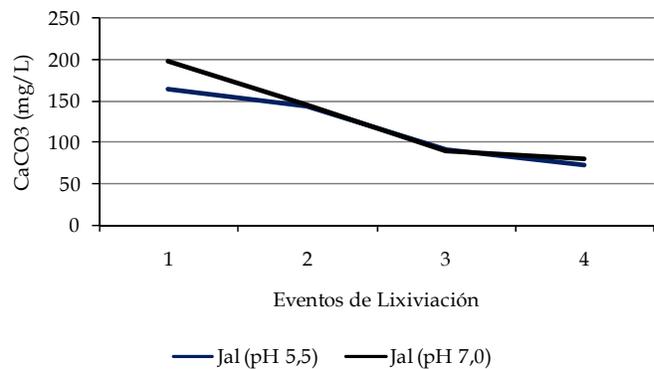


Figura 8.21. Comportamiento de la alcalinidad en función del número de lixiviados.

Las condiciones de oxidación-reducción están relacionadas con la disponibilidad de ciertos elementos potencialmente tóxicos. Los potenciales determinados en los eventos de lixiviación (Figura 8.22), indican un ambiente oxidante en el que los valores se mantienen en el rango de 0.479 a 0.499 V, en los lixiviados obtenidos a pH 5.5 y de 0.429 a 0.479 V, para los lixiviados obtenidos a pH 7.0. Estos resultados sumados a los valores de pH cuya tendencia es hacia la neutralidad, indica que los minerales presentes se encuentran en fases muy estables.

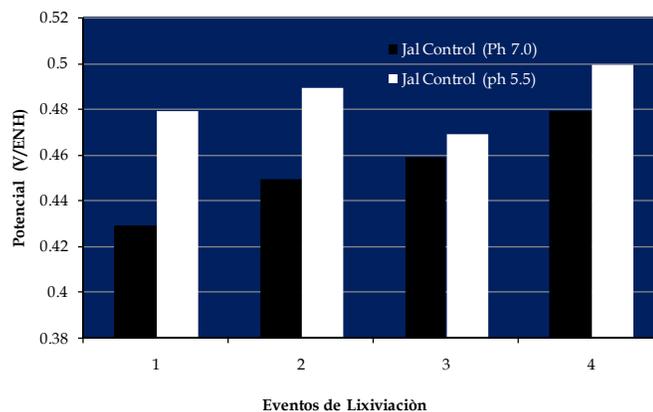


Figura 8.22. Comportamiento del Potencial de óxido-reducción en función del número de lixiviados.

8.5. Caracterización fisicoquímica de lodos y Biosólidos

Para evaluar el efecto de estabilización de los metales presentes en jales mineros, mediante uso de materia orgánica, específicamente sus fracciones: ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, se utilizaron lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales y biosólidos de esta misma planta. Para el primer caso los lodos únicamente fueron secados al aire durante 2 semanas y para el caso de los biosólidos, los lodos fueron sometidos a un proceso de compostaje durante un periodo aproximado de tres meses en un proyecto paralelo (Ramírez, 2008).

Los lodos y biosólidos empleados en el presente estudio fueron caracterizados con el fin de conocer sus características fisicoquímicas, así como la cantidad de EPT presentes que pudieran tener un aporte significativo por lixiviación en las pruebas de extracción realizadas.

8.5.1. Análisis mineralógico

Los resultados del análisis mineralógico por DRX, mostraron que los lodos y biosólidos, (Figura 8.23) se encuentran constituidos principalmente por cuarzo, feldespatos, yeso, pirita y calcita, a partir de lo cual se puede inferir que los metales presentes además de la unión a la materia orgánica, pueden encontrarse unidos fuertemente a los minerales presentes, por procesos de adsorción, lo cual puede limitar su aporte por lixiviación. Además la cantidad de feldespatos presentes de Na y K, bajo procesos de disolución contribuyen a mantener el pH en condiciones ligeramente alcalinas. Los lodos residuales poseen una mineralogía similar a la de los biosólidos, aunque la intensidad de los picos es más pronunciada en los primeros.

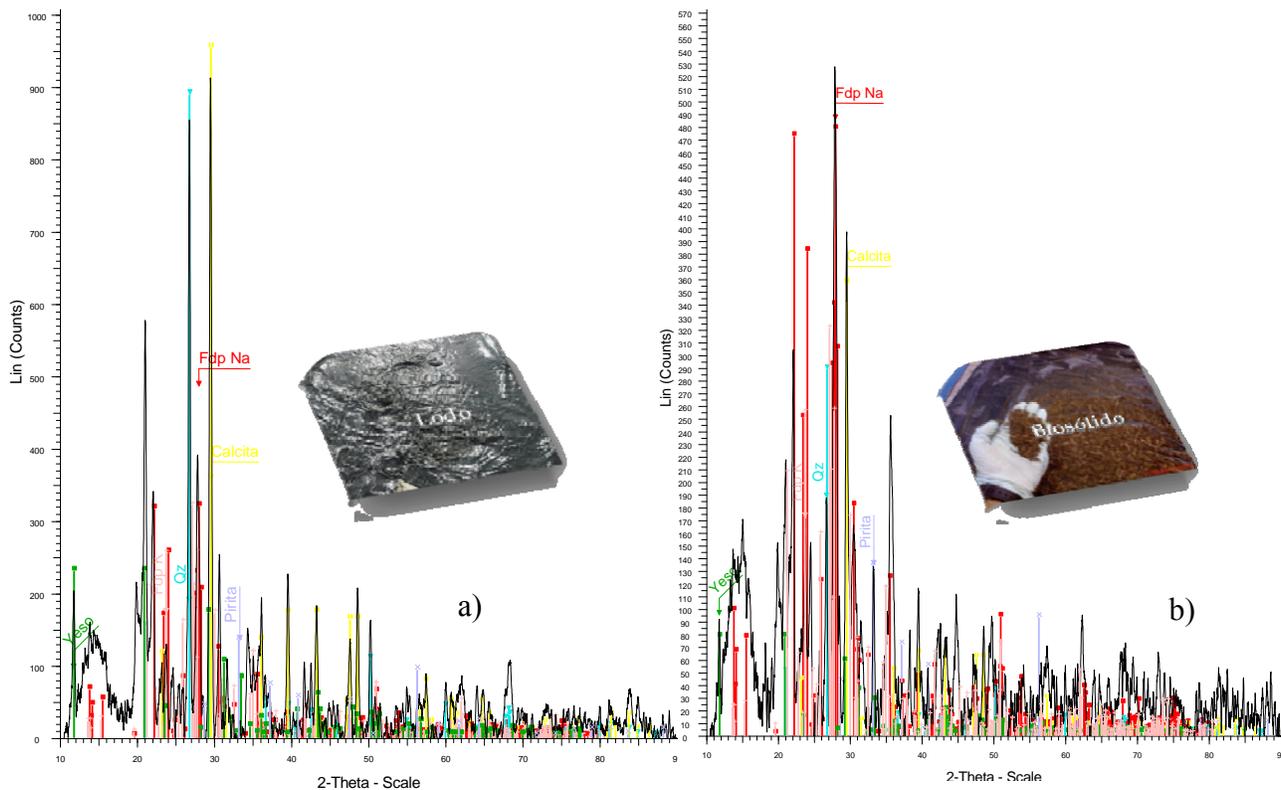


Figura 8.23 a) Espectro de Difracción de Rayos X de lodos. Qz-Quarzo (SiO_2), FdpNa-Feldespatos de Sodio-Na (AlSi_3O_8) o albita, Pirita (FeS_2), Calcita (CaCO_3), FdpK-Feldespato de Potasio-K (AlSi_3O_8) u ortoclasa y Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{SH}_2\text{O}$) y b) Espectro de Difracción de Rayos X de biosólidos.

8.5.2. Parámetros de movilidad

La determinación de parámetros como son pH y CE, en muestras sólidas es importante porque permite inferir sobre la estabilidad de los EPT que se encuentran presentes. Por lo anterior de manera inicial se determinaron los valores de pH y CE en lodos y biosólidos. En el primer caso se obtuvo un pH de 7.6 y una CE de 502 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), para el caso de biosólidos se obtuvo un valor de pH de 7.2 y una CE de 2830 ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La condición alcalina de ambos materiales es importante porque al ser aplicados en campo favorece condiciones de estabilidad para los metales presentes.

8.5.3. Concentración total de metales en biosólidos

Los biosólidos utilizados en las pruebas de lixiviación de jales mineros, en la evaluación del efecto de estabilización de la materia orgánica sobre EPT, fueron sometidos a un análisis para identificar los principales elementos presentes en biosólidos y su concentración total, con el fin de evaluar su aplicación en campo de acuerdo a la reglamentación vigente en México NOM-004-SEMARNAT-2002, “ que establece los límites máximos permisibles de metales contenidos en lodos y biosólidos ”.

Los elementos identificados en mayor proporción (Figura 8.24), corresponden a Ca (26,317 mg/kg), K (15,418 mg/kg), Al (12,120 mg/kg) y Mg (6,622 mg/kg). Así mismo se pudo identificar la presencia de EPT en las siguientes concentraciones: Fe (10,770 mg/kg), Ba (140 mg/kg), Mn (305 mg/kg), Tl (255 mg/kg), Zn (233 mg/kg), Cu (131 mg/kg), Se (80 mg/kg), V (32 mg/kg), Cr (22 mg/kg), Ni (17 mg/kg), Pb (12 mg/kg), Co (2 mg/kg) y Be (2 mg/kg). Aunque las concentraciones son bajas, es importante su consideración en las pruebas de lixiviación.

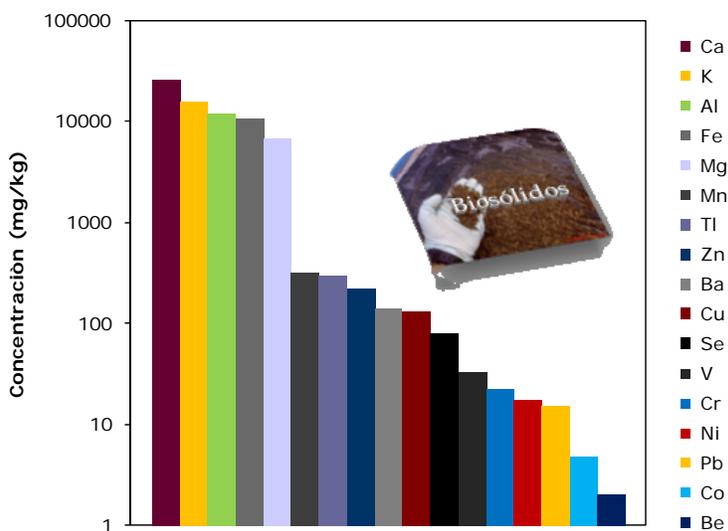


Fig. 8. 24. Elementos Potencialmente Tóxicos en biosólidos.

De acuerdo a los resultados obtenidos los biosólidos cumplen con la reglamentación vigente, NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece los límites máximos permisibles de metales contenidos en lodos y biosólidos. Las concentraciones de metales presentes permiten clasificarlos dentro de la categoría de excelentes (Tabla 8.7). Esta clasificación permite el uso de biosólidos en campo sin mayores restricciones.

Tabla 8.7. EPT presentes biosólidos

EPT*c	LMP * *(Excelentes)	LMP* (Buenos)	Concentración Total-Biosólido (mg/kg)	Clasificación
Arsénico*	41	75	4	E
Cadmio*	39	85	<25.54	E
Cromo*	1200	3000	22	E
Cobre*	1500	4300	131	E
Plomo*	300	840	12	E
Niquel*	420	420	17	E
Zinc*	2800	7500	233	E
Fe	NE	NE	10, 770	
Al	NE	NE	12, 120	
Ba	NE	NE	140	
Mn	NE	NE	305	
Co	NE	NE	2	
Ti	NE	NE	255	
Be	NE	NE	2	



*EPT en forma total, listados en la NOM-004-SEMARNAT-2002, Norma oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

8.6. Pruebas de lixiviación en jales en contacto con lodo residual en la estabilización de EPT presentes en jales de Pozuelos.

Las pruebas de lixiviación de metales en mezclas de jal-lodo y jal-biosólido se realizaron a condiciones de pH 7.0 y pH 5.5

Los resultados en condiciones de pH 7.0 (Tabla 8.8), indicaron que la concentración obtenida en los lixiviados para la muestra tratada supera en concentración a la muestra control. En el caso del Fe la concentración para la muestra de jales control en un primer

lixiviado es de 1.71 mg/L y después del tratamiento es 2.98 mg/L. Para el caso del Mn de una concentración inicial de 0.16 mg/L se da un aumento con 0.34 mg/L y para Zn de una concentración inicial de 0.28 mg/L después del tratamiento se obtienen una concentración de 0.36 mg/L. La mayoría de los EPT evaluados (Co, Cu, Pb, Cd, Cr y Ni) permanecieron por debajo del límite de detección en el primer evento de lixiviación tanto en jales como en lodos por lo que no se pudieron evaluar en la presente prueba.

Tabla 8.8. Tratamiento de jales mineros con lodo residual.

EVENTO	MUESTRA	ELEMENTOS POTENCIALMENTE TOXICO (EPT)								
		Fe	Mn	Co	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni
1	Control (jal)/Ph 7.0	1.71	0.16	<0.020	<0.037	<0.044	0.28	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + lodo)/pH 7.0	2.98	0.34	<0.020	<0.037	0.25	0.36	<0.056	0.04	<0.016
	Control (jal)/pH 5.5	1.64	0.15	<0.020	<0.037	<0.044	0.29	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + lodo)/pH 5.5	4.47	0.60	<0.020	0.06	0.20	0.48	<0.056	0.10	<0.016
2	Control (lodo)/pH 5.5	2.70	0.38	<0.020	0.05	0.18	0.16	<0.056	0.80	<0.016
	Control (jal)/Ph 7.0	2.31	<0.011	<0.020	<0.037	0.07	0.49	<0.056	0.19	<0.016
	Tratamiento (jal + lodo)/pH 7.0	3.71	0.44	<0.020	<0.037	0.11	0.27	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (jal)/pH 5.5	2.15	<0.011	<0.020	<0.037	<0.044	0.44	<0.056	0.13	<0.016
3	Tratamiento (jal + lodo)/pH 5.5	5.18	0.47	<0.020	<0.037	0.16	0.22	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (lodo)/pH 5.5	3.62	0.35	<0.020	0.38	0.14	0.29	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (jal)/Ph 7.0	2.93	0.80	<0.020	<0.037	0.14	0.10	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + lodo)/pH 7.0	2.96	0.23	<0.020	<0.037	<0.044	0.20	<0.056	<0.027	<0.016
4	Control (jal)/pH 5.5	1.84	<0.011	<0.020	<0.037	0.15	<LD	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + lodo)/pH 5.5	3.07	0.35	<0.020	<0.037	0.14	0.32	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (lodo)/pH 5.5	2.78	0.31	<0.020	<0.037	<0.044	0.24	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (jal)/Ph 7.0	1.92	<0.011	<0.020	<0.037	0.11	<0.025	<0.056	<0.027	<0.016
4	Tratamiento (jal + lodo)/pH 7.0	1.36	0.03	<0.020	<0.037	0.16	<0.025	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (jal)/pH 5.5	2.51	<0.011	<0.020	<0.037	0.11	0.07	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + lodo)/pH 5.5	4.16	0.39	<0.020	<0.037	0.22	0.20	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (lodo)/pH 5.5	4.13	0.26	<0.020	<0.037	<0.044	0.22	0.31	<0.027	<0.016

Al utilizar como extractante agua deionizada a pH 5.5 se obtiene un comportamiento similar que a pH 7.0, registrando un aumento en la concentración de algunos metales después del tratamiento. Para el caso del Fe la concentración inicial como control es de 1.64 mg/L y después del tratamiento es 4.47 mg/L, para Mn con 0.15 mg/L se da un aumento a 0.60 mg/L y para el Zn de 0.29 mg/L a 0.48 mg/L.

Una posible explicación a este comportamiento es la fracción Lixiviable por parte de lodos y jales, la cual es similar y no permite ver un efecto de estabilización.

8.6.1. Análisis del comportamiento químico de los lixiviados

El comportamiento químico de los lixiviados en esta prueba se determinó el pH y CE. Los valores de pH mostrados en la Figura 8.25 indican valores ligeramente ácidos a neutros en los lixiviados obtenidos después del tratamiento, sin embargo la tendencia es hacia la neutralidad.

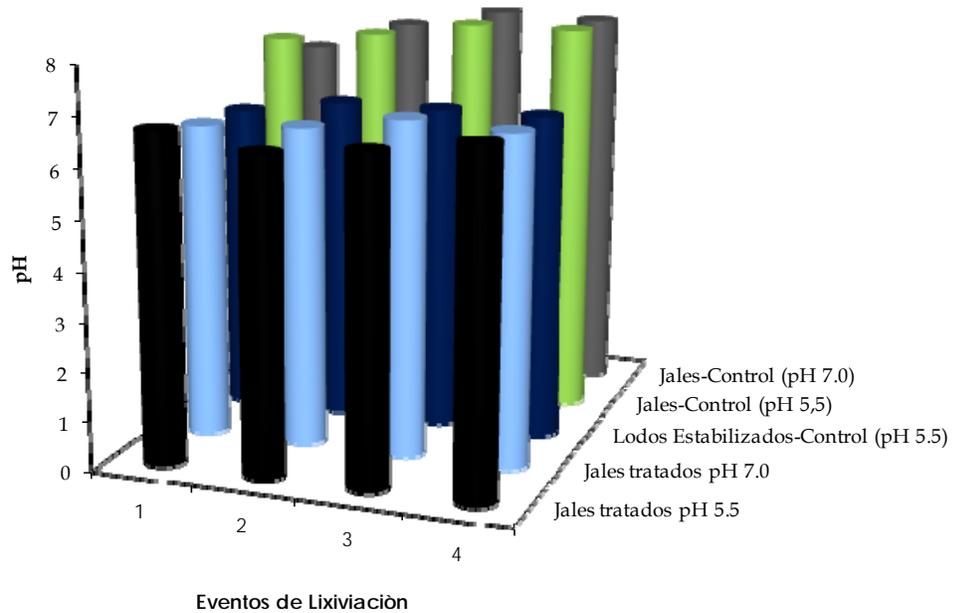


Figura 5.25. Comportamiento del pH en lixiviados utilizando Lodos residuales.

La conductividad (Figura 8.26) fué clasificada en el rango de Moderado – Salino con valores de 2856-6680 $\mu\text{s}/\text{cm}$, lo que indica la baja solubilidad de los EPT contenidos en los biosólidos aún en concentraciones significativas.

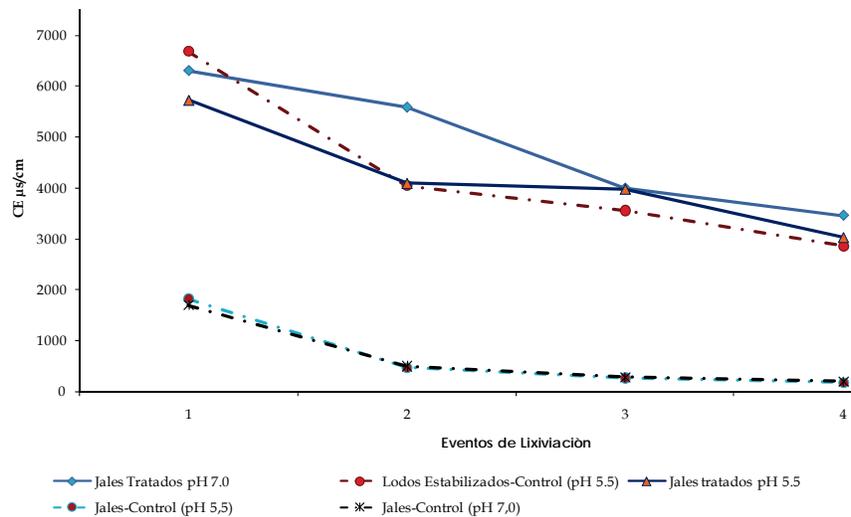


Figura 8.26. Comportamiento de la Conductividad eléctrica en lixiviados utilizando Lodos.

8.7. Pruebas de lixiviación en jales en contacto con biosólidos en la estabilización de EPT presentes en jales de Pozuelos.

La capacidad de los biosólidos en la estabilización de los metales presentes en jales mineros fue evaluada al igual que los lodos en pruebas de lixiviación en columnas, sin embargo se observó un comportamiento similar al de los lodos. Los resultados mostrados en la Tabla 8.9 indican una concentración mayor en el tratamiento con respecto al control. Para un primer evento de lixiviación, en el caso del Mn, se tiene una concentración de 0.62 mg/L y al aplicar el tratamiento se tiene una concentración de 1.52 mg/L; un caso similar se presenta con el Zn de una concentración de 0.28 mg/L en el control y 0.91mg/L en el tratamiento. Con respecto al Ni de una concentración inicial de 0.22 mg/L, se tienen un aumento a 0.26 mg/L. El Cr, fue el único elemento en el que se pudo observar un efecto de estabilización. La concentración inicial de 0.17 mg/L disminuyó a 0.15 mg/L en un primer evento de lixiviación y posteriormente permaneció por debajo del límite de detección.

Aunque para algunos elementos como el Fe y el Pb, con concentraciones iniciales de 1.39 y 0.27 mg/L respectivamente, se pudo observar un efecto de disminución con concentraciones de Fe por debajo del límite de detección (<0.019 mg/L) y de 0.13 mg/L

para el Pb después del tratamiento, en el segundo evento de lixiviación se vuelve a registrar un aumento en la concentración de la muestra tratada.

Los resultados de las pruebas de lixiviación a pH 5.5 mostraron una tendencia similar para Mn de una concentración inicial de 0.64 mg/L, se da un aumento después del tratamiento en 0.92 mg/L. Para el Zn de una concentración de 0.25 mg/L en el control después del tratamiento se obtiene un aumento a 0.70 mg/L. En el caso del Cr nuevamente se puede apreciar un efecto de estabilización de 0.13 mg/L en el control a 0.10 mg/L después del tratamiento. Para Fe y Pb la tendencia es similar que en el tratamiento a pH 7.0. De manera inicial se pudo observar un efecto de estabilización con una concentración en el control de 2.56 mg/L y 0.27 mg/L respectivamente y después del tratamiento el Fe permaneció por debajo del límite de detección (0.019 mg/L) y para el caso del Pb se obtuvo una concentración de 0.21 mg/L. Sin embargo nuevamente se registra un aumento de concentración en el tratamiento al llevar a cabo un segundo evento de lixiviación.

Tabla 8.9. Evaluación del efecto de estabilización de EPT con biosólidos.

EVENTO	MUESTRA	ELEMENTOS POTENCIALMENTE TOXICO (EPT)								
		Fe	Mn	Co	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni
1	Control (jal)/Ph7.0	1.39	0.62	<0.020	<0.037	0.27	0.28	<0.056	0.17	0.22
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH7.0	<0.019	1.52	<0.020	2.21	0.13	0.91	0.03	0.15	0.26
	Control (jal)/pH5.5	2.56	0.64	<0.020	<0.037	0.27	0.25	<0.056	0.13	0.25
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH5.5	<0.019	0.92	<0.020	2.19	0.21	0.70	<0.056	0.10	0.25
	Control (biosólido)/pH5.5	0.08	<0.011	<0.020	<0.037	0.18	<0.025	<0.056	0.07	0.16
2	Control (jal)/Ph7.0	0.52	0.17	<0.020	<0.037	0.16	0.09	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH7.0	10.22	0.64	<0.020	1.59	0.23	0.98	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (jal)/pH5.5	0.44	0.14	<0.020	<0.037	<0.044	0.09	<0.056	0.06	<0.016
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH5.5	12.98	0.90	<0.020	0.82	0.16	0.71	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (biosólido)/pH5.5	15.96	0.89	<0.020	1.46	0.18	1.14	<0.056	<0.027	<0.016
3	Control (jal)/Ph7.0	1.54	0.07	<0.020	<0.037	<0.044	<0.025	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH7.0	10.00	0.54	<0.020	0.30	<0.044	0.26	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (jal)/pH5.5	0.62	0.04	<0.020	<0.037	<0.044	<0.025	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH5.5	8.58	0.44	<0.020	0.26	<0.044	0.24	<0.056	0.21	<0.016
	Control (biosólido)/pH5.5	10.96	0.45	<0.020	0.53	<0.044	0.51	<0.056	<0.027	<0.016
4	Control (jal)/Ph7.0	1.64	0.06	<0.020	<0.037	<0.044	<0.025	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH7.0	5.11	0.38	<0.020	0.12	<0.044	0.12	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (jal)/pH5.5	1.44	0.04	<0.020	<0.037	<0.044	<0.025	<0.056	<0.027	<0.016
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH5.5	6.71	0.46	<0.020	0.19	<0.044	0.17	<0.056	<0.027	<0.016
	Control (biosólido)/pH5.5	3.91	0.27	<0.020	0.14	<0.044	0.12	<0.056	<0.027	<0.016

8.7.1. Análisis del comportamiento químico de los lixiviados

Los valores de pH (Figura 8.27) se mantuvieron en condiciones cercanas a la alcalinidad al utilizar biosólidos, lo que indica que en este caso el material orgánico se encuentra en un avanzado estado de estabilización en comparación con los lodos residuales, donde los valores determinados registraron una ligera acidificación del medio.

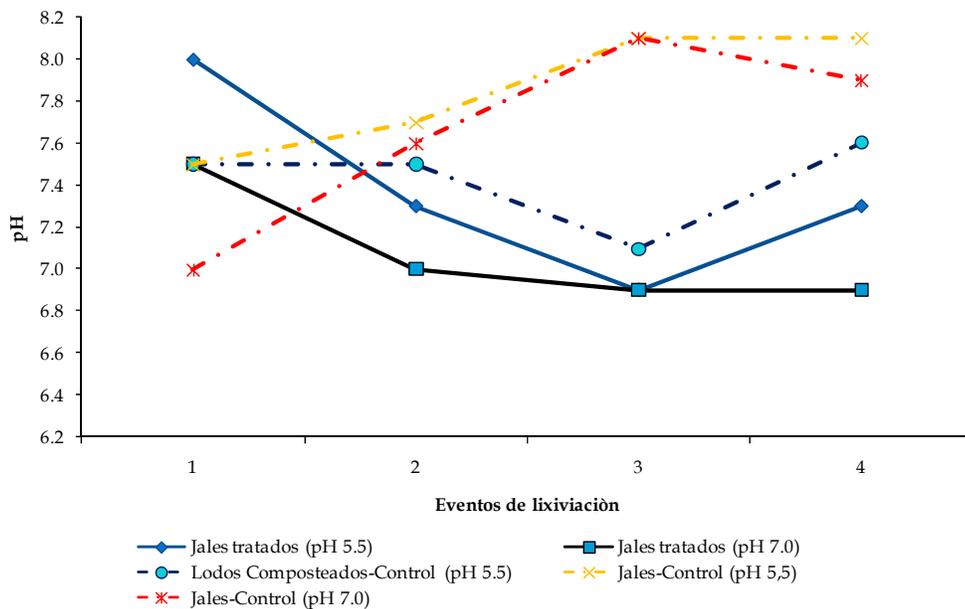


Figura 8.27. Comportamiento del pH en lixiviados utilizando biosólidos.

Otra diferencia muy significativa entre lodos residuales y biosólidos es la conductividad eléctrica (Figura 8.28), que aunque en estos últimos inicialmente es más alta, sólo se ve un efecto marcado en el primer evento y posteriormente es más baja que en el caso de los lodos residuales, lo que pone de manifiesto la importancia del proceso de estabilización que ambos materiales reciben, lo cual determina la estabilidad de los iones presentes.

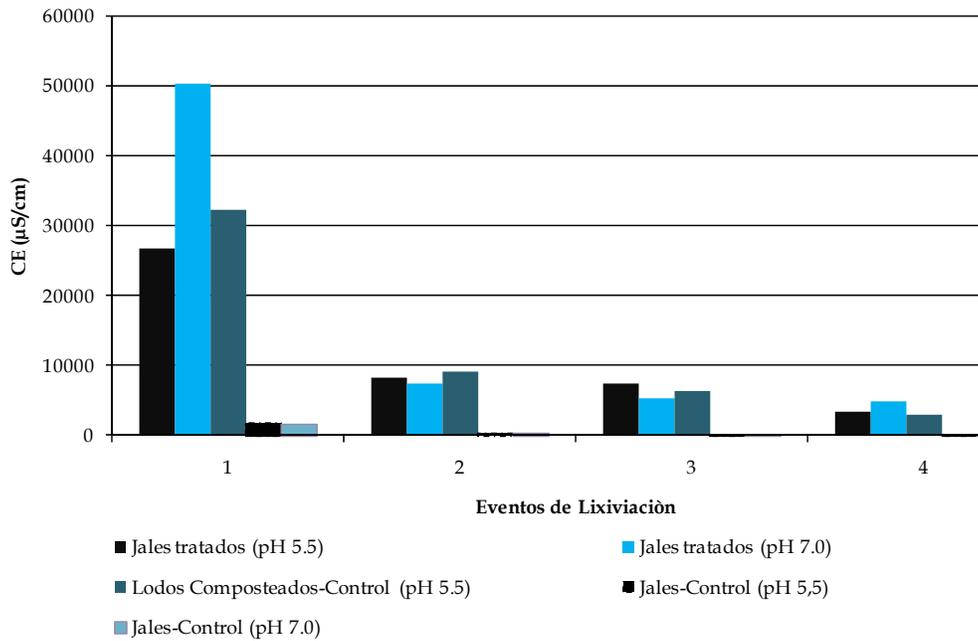


Figura 8.28. Comportamiento de la CE en lixiviados utilizando biosólidos.

Bajo las condiciones utilizadas, tomando en cuenta la solubilidad de la materia orgánica en diferentes valores de pH, los lixiviados obtenidos en el tratamiento de jales mineros con lodos y biosólidos fueron sometidos a un análisis de Carbono Orgánico Total (Figura 8.29), lo cual permitió dar un seguimiento a la materia orgánica soluble que bajo las condiciones utilizadas (agua desionizada ajustada a pH 5.5 y 7.0) fue liberada. A pesar del avanzado estado de estabilización de la materia orgánica en el caso de los biosólidos (lodos sometidos a un proceso de compostaje), se observa que a pH 7.0 se da una mayor liberación de materia orgánica soluble, que a pH 5.5, sin embargo cabe mencionar que el efecto de liberación de materia orgánica bajo las condiciones utilizadas es mucho menor que en el caso del lodo residual. La presencia de materia orgánica soluble es importante porque permite inferir acerca de la solubilidad que pueden tener los EPT, debido a su unión a ácidos fúlvicos.

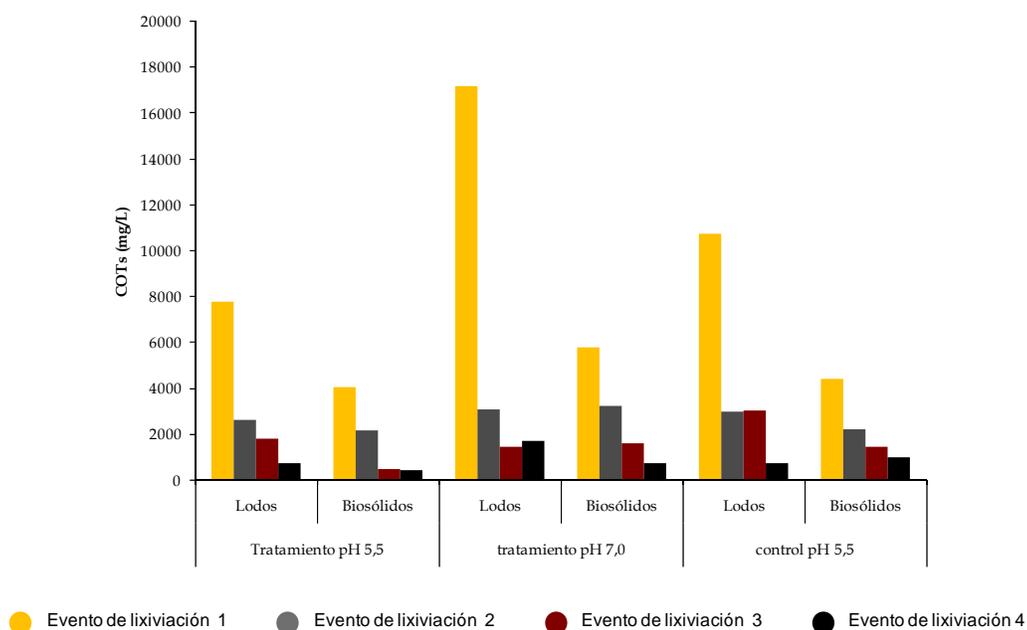


Figura 8.29. COT en lixiviados obtenidos en el tratamiento de jales mineros con lodos y biosólidos.

Para identificar la presencia de fracciones de bajo peso molecular de la materia orgánica, como son los ácidos fúlvicos, que permitieran la formación de complejos solubles bajo las condiciones empleadas en la aplicación de biosólidos sobre jales mineros, los lixiviados obtenidos después de tratar los jales con biosólidos, fueron sometidos a pruebas de Cromatografía de Exclusión Molecular con detección UV/Visible. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de las fracciones moleculares presentes en los lixiviados analizados.

8.8. Análisis por Cromatografía de Exclusión Molecular con detección UV-Visible

En la realización de la curva de calibración se obtuvo (Figura 8.30) una correlación lineal (R^2) de 0.9978. Los tiempos de elución permanecieron en el rango de 11.838-18.105 min.

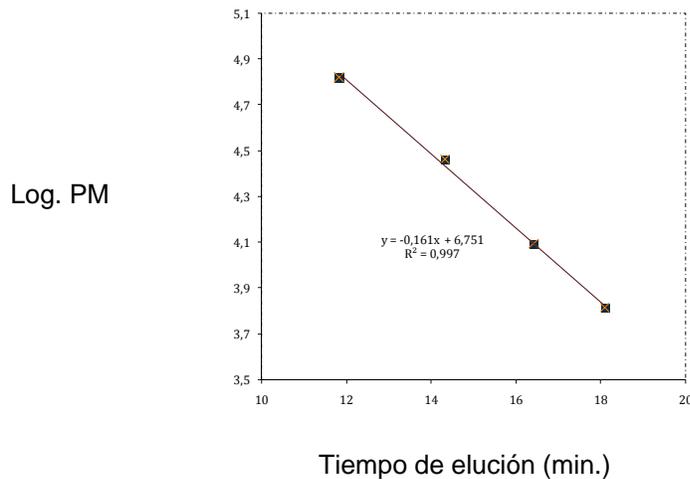


Figura 8.30. Curva de calibración para el análisis de fracciones moleculares presentes en los lixiviados de jales tratados con biosólidos.

Las muestras analizadas corresponden a los lixiviados obtenidos en el tratamiento de los jales mineros del sitio Pozuelos utilizando biosólidos. Los extractos fueron filtrados previamente con membranas de celulosa de 0.45 μm y centrifugadas a una velocidad de 9,000 rpm.

Los resultados obtenidos en el análisis utilizando H_2O acidificada a pH 5.5 (Figura 8.31) indicaron una liberación alta de fracciones de bajo PM (tiempo de elución mayor) en un rango de 41.44 kda a 67.62 kda, en comparación con aquellas fracciones de alto PM (tiempo de elución corto) en un rango de 15.24 a 14.65 Kda.

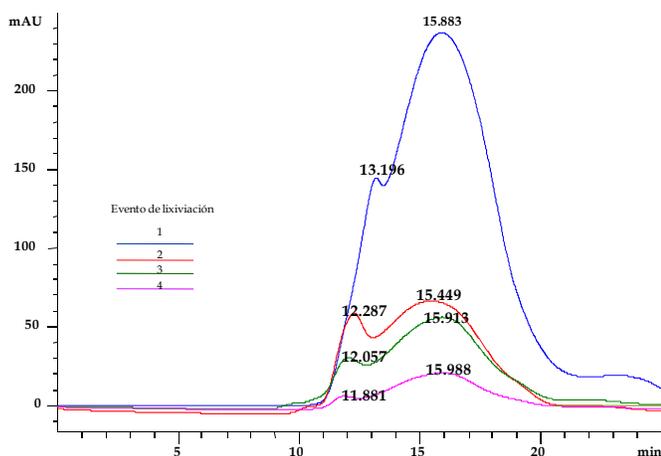


Figura 8.31. Señal registrada por el detector UV-Vis (mAU) frente al tiempo de retención en la columna cromatográfica (min.) para los extractos obtenidos del tratamiento de jales mineros con biosólidos a pH 5.5.

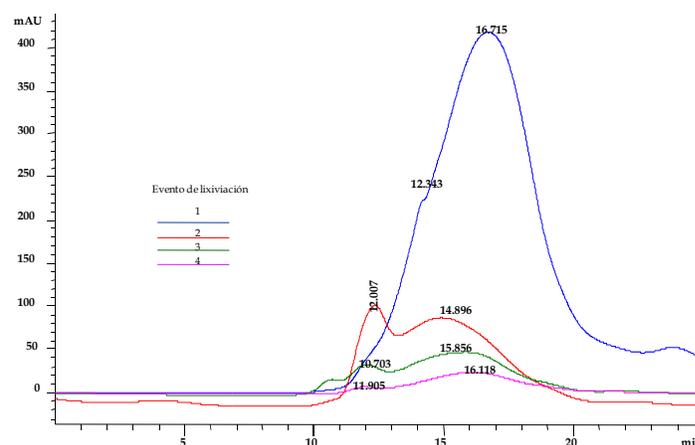


Figura 8.32. Señal registrada por el detector UV-Vis (mAU) frente al tiempo de retención en la columna cromatográfica (min.) para los extractos obtenidos del tratamiento de jales mineros con biosólidos a pH 7.0.

En el caso de los lixiviados obtenidos utilizando H₂O a pH 7.0 (Figura 8.32) la liberación de fracciones de bajo peso molecular es más alta en comparación con la prueba anterior en el rango de 11.16 a 22 kDa, resultado que coincide con las pruebas de COT y que sugieren la presencia de Ácidos Fúlvicos, para el caso de aquellas fracciones de mayor PM (tiempo de elución corto) el rango permaneció de 56.93 a 67.019 Kda, registrándose un aumento en comparación con las pruebas de lixiviación a pH 5.5.

En base a los resultados anteriores; el aumento de EPT en los lixiviados obtenidos en el tratamiento de jales mineros con lodos y biosólidos en comparación con el control, puede ser atribuida a la materia orgánica soluble (ácidos fúlvicos), reflejado en las altas concentraciones de carbono orgánico soluble en los extractos obtenidos en los primeros eventos de lixiviación. Cabe mencionar que resultados similares han sido reportados recientemente en el tratamiento de jales mineros utilizando diferentes materiales orgánicos (Schwab y col., 2007)

8.9. Contaminación artificial de jales mineros

Los análisis anteriores mostraron que las concentraciones en los lixiviados de las muestras control en jales mineros, lodos y biosólidos era similar, por lo cual no se observaba claramente un efecto de estabilización por parte del material reactivo. Para evaluar el efecto de estabilización que la materia orgánica ejerce sobre los metales, se decidió probar únicamente el uso de biosólidos en una muestra de jales mineros contaminados de manera artificial a partir de sus sales solubles con los siguientes elementos: Pb (C₂H₃O₂)₂.3H₂O, Cd (CdCl₂.2.5 H₂O), Cr (CrO₃), Cu (CuSO₄.5 H₂O) y Co (CoCl₂.6H₂O).

La presa de jales seleccionada en esta prueba correspondió a Bolañitos, misma que fue contaminada de forma artificial con EPT tomando en cuenta la afinidad de las sustancias húmicas (contenidas en los biosólidos) por dichos elementos. La muestra se mantuvo en agitación durante 2 meses, posteriormente se mantuvo en reposo durante 4 meses y finalmente se separó el sobrenadante y la muestra se sometió a un secado al aire libre durante 2 semanas y tamizado para obtener el tamaño de partícula requerido.

Antes de llevar a cabo la contaminación artificial, se determinó la concentración existente en la muestra original, los resultados de las concentraciones totales obtenidas para esta presa de jales (Tabla 5.10), indicaron la presencia de los EPT considerados en cantidades muy bajas: Cr (175 mg/kg), Pb (29 mg/kg), Cu (19 mg/kg) y en el caso de Cd y Co las concentraciones permanecieron por debajo del límite de detección. Las concentraciones obtenidas después del proceso de contaminación artificial (C_{final}) se indican en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Concentración total en jales contaminados artificialmente.

EPT	Concentración (mg/kg)	
	$C_{inicial}$	C_{final}
Cr	175	4,030
Pb	29	4,700
Cu	19	4,535
Cd	<25.4	2,934
Co	<9.12	1,521

* $C_{inicial}$ = concentración real

** C_{final} = concentración después del proceso de contaminación artificial

8.10. Efecto del uso de biosólidos en jales contaminados artificialmente

8.10.1. Sistema Experimental para pruebas de lixiviación en miniceldas

Las pruebas fueron realizadas utilizando la técnica propuesta por Cruz y Col., (2003), basada en el uso de miniceldas de alteración (Figura 8.33), que consiste en la utilización de embudos Buchner, donde la muestra es puesta en contacto con la solución Lixivante (agua deionizada ajustada a pH 7.0 y pH 5.5). La muestra de jal utilizada corresponde a la mina Bolañitos y la solución lixivante fué adicionada con la ayuda de una bomba peristáltica a una velocidad de 80 rpm.



Figura 8.33. Uso de miniceldas de alteración en la evaluación del efecto de estabilización de lodos composteados sobre los EPT presentes en jales mineros.

El procedimiento experimental consistió en los siguientes pasos:

1. Evaluación de 2 controles para la muestra de jal contaminado, que consistió en colocar 30 g., de muestra mezclada con arena sílica (90 g), sobre la cual se adicionaron 200 ml de H₂O destilada a pH 5.5 y 7.0 respectivamente.
2. Evaluación de 2 controles para los biosólidos utilizando las mismas condiciones que para la muestra de jal contaminado.
3. La evaluación del efecto del material orgánico en la estabilización de EPT fue realizado colocando 30 g de biosólido con un tamaño de partícula < 250 μm en la parte inferior de la celda y por encima el jal contaminado (30 g) con un tamaño de partícula < 250 μm , cada material por separado fué mezclado con la arena sílica (90 g.) para asegurar que el agente lixivante interactuara con los materiales presentes. En el fondo de la celda se colocó un filtro watman número 90 el cuál es lo suficientemente cerrado, evitando pasar la muestra. La salida inferior del embudo se tapa con un tapón de hule para evitar que la solución lixivante salga a través de ella.

El tiempo de evaluación fue de una semana y los lixiviados obtenidos, fueron filtrados utilizando membranas de celulosa 0.45 μ . La calidad química de los mismos fue evaluada

con los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, COT, potencial de oxidación y los cationes metálicos de interés.

8.10.2. Análisis del comportamiento químico de los lixiviados

Los lixiviados obtenidos en las pruebas realizadas fueron analizados para conocer los efectos de la adición de los biosólidos sobre los jales contaminados artificialmente. Los parámetros evaluados fueron: Metales, pH, conductividad eléctrica, COT y potencial de oxidación-reducción,

Experimentalmente se llevaron a cabo 5 eventos de lixiviación, aunque solo se reportan 2 atendiendo a la concentración en los lixiviados la cual se encontró por debajo del límite de detección a partir del segundo evento.

El análisis de EPT lixiviados de la muestra contaminada artificialmente (Tabla 8.11), para un primer evento de lixiviación (control a pH 7.0) se mencionan a continuación: Co (13.10 mg/L), Cu (1.55 mg/L), Pb (1.22 mg/L), Cd (38.80 mg/L) y Cr (17.33 mg/L). La influencia del pH en las pruebas de lixiviación juega un papel muy importante sobre la movilidad de los metales presentes. En este sentido las mayores concentraciones en los lixiviados corresponden a aquellos obtenidos utilizando agua ajustada a pH 5.5 como control: Co (16.10 mg/L), Cu (1.79 mg/L), Cd (54.10 mg/L) y Cr (23.33 mg/L). La única excepción a la condición anterior fue el plomo con una concentración 1.22 mg/L en la muestra control del jal a un pH de 7.0 y de 0.66 mg/L para un pH de 5.5.

Como resultado de la aplicación de biosólidos sobre la muestra contaminada artificialmente se observó claramente un efecto de estabilización sobre los metales presentes: para el primer evento a pH 7.0, la concentración inicial de Cobalto de 13.10 mg/L, disminuyó a 1.59 mg/L, lo que representa un porcentaje de estabilización del 87.86 %, el Cu de 1.55 mg/L disminuyó a 0.57 mg/L, lo que corresponde a un porcentaje de estabilización del 63.15 %. Para el caso del Pb con una concentración inicial de 1.22 mg/L disminuyó a 0.08

mg/L, lo que representa un porcentaje del 93.43 %. Para Cd la concentración inicial (38.80 mg/L) disminuyó a 3.18 mg/L representado por un porcentaje de estabilización igual a 91.80 %. El único EPT en el que no se observó un efecto de estabilización de forma considerable fue el Cromo (Cr). La concentración inicial (17.33 mg/L), disminuyó a 13.80 mg/L, la estabilización solo correspondió a un 20.38 %.

En las pruebas de lixiviación utilizando agua a pH 5.5, la tendencia fue similar: en el caso del Co su concentración inicial de 16.60 mg/L disminuyó a 1.82 mg/L lo que representa un porcentaje de estabilización del 89.04 %, para Cu de 1.79 mg/L la concentración después del tratamiento disminuyó a 0.51 mg/L representado un porcentaje de estabilización del 71.53 %. Con respecto al Pb de una concentración de 0.66 mg/L disminuyó a 0.18 mg/L, el porcentaje de estabilización correspondió a 72.91 %. El porcentaje de estabilización del Cd fue de 90.04 %, al disminuir la concentración inicial de 45.10 mg/L a 4.49 mg/L. En esta prueba al igual que las pruebas de lixiviación a pH 7.0 el Cr fue el único EPT que no mostró un efecto de estabilización significativo. Su concentración inicial fue de 23.33 mg/L y disminuyó a 15.90 mg/L. El porcentaje de estabilización solo fue de 31.86 %.

Tabla 8.11 Evaluación del uso de biosólidos en la estabilización de EPT.

EVENTO	Concentración (mg/L)	ELEMENTOS POTENCIALMENTE TOXICOS (EPT)				
		Co	Cu	Pb	Cd	Cr
1	Control (jal)/pH7.0	13.10	1.55	1.22	38.80	17.33
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH7.0	1.59	0.57	0.08	3.18	13.80
	Control (biosólido)/pH7.0	<0.020	0.36	<0.044	<0.056	<0.027
	Control (jal)/pH5.5	16.60	1.79	0.66	45.10	23.33
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH5.5	1.82	0.51	0.18	4.49	15.90
	Control (biosólido)/pH5.5	<0.020	0.44	0.11	<0.056	<0.027
2	Control (jal)/pH7.0	<0.020	<0.037	<0.044	<0.056	<0.027
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH7.0	0.19	0.28	0.17	0.14	17.47
	Control (biosólido)/pH7.0	<0.020	0.15	<0.044	<0.056	<0.027
	Control (jal)/pH5.5	<0.020	<0.037	<0.044	<0.056	<0.027
	Tratamiento (jal + biosólido)/pH5.5	0.08	0.25	0.35	<0.056	14.07
	Control (biosólido)/pH5.5	<0.020	0.21	<0.044	<0.056	<0.027
1	% Estabilización pH 7.0	87.86	63.15	93.43	91.80	20.38
	% Estabilización pH 5.5	89.04	71.53	72.91	90.04	31.86

Es importante mencionar también que los resultados obtenidos permitieron evidenciar que al tener concentraciones más altas de metales en solución en comparación a las que liberan los biosólidos se puede apreciar un efecto de estabilización más claro en comparación con los resultados de las pruebas anteriores donde las concentraciones en los lixiviados obtenidos de los jales tratados y las muestras control eran similares. En la Figura 8.34 se muestran los elementos evaluados y el porcentaje de estabilización al utilizar biosólidos para el primer evento de lixiviación.

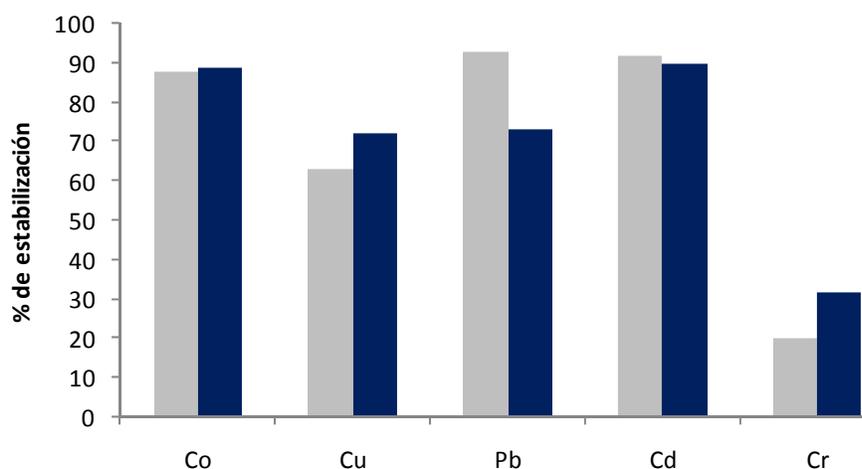


Figura 8.35. Estabilización de EPT en una muestra de jal contaminado artificialmente por el uso de biosólidos.

Por otro lado los resultados del análisis químico de los lixiviados en función de parámetros como son pH, Conductividad eléctrica, Carbono Orgánico Total y Potencial de oxido reducción se mencionan a continuación.

La tendencia del pH (Figura 8.35) en los lixiviados de jales tratados con los biosólidos fue hacia condiciones alcalinas, aún bajo las condiciones ácidas empleadas, lo cual es favorable porque contribuye a la estabilización de los complejos formados por la materia orgánica. La presencia de sales determinada como conductividad eléctrica (Figura 8.36) es significativa en el primer evento y disminuye considerablemente lo cual es favorable atendiendo a la retención de los EPT por la materia orgánica.

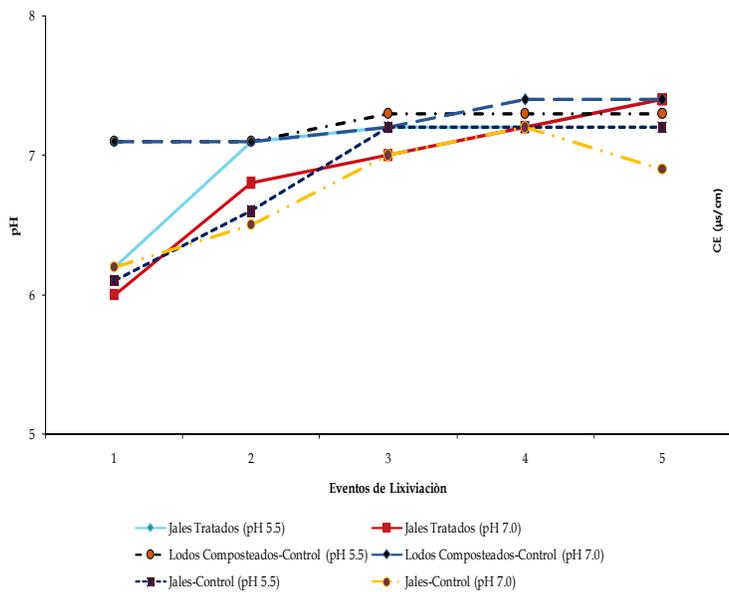


Figura 8.35. Comportamiento del ph en jales contaminados artificialmente tratados con biosólidos.

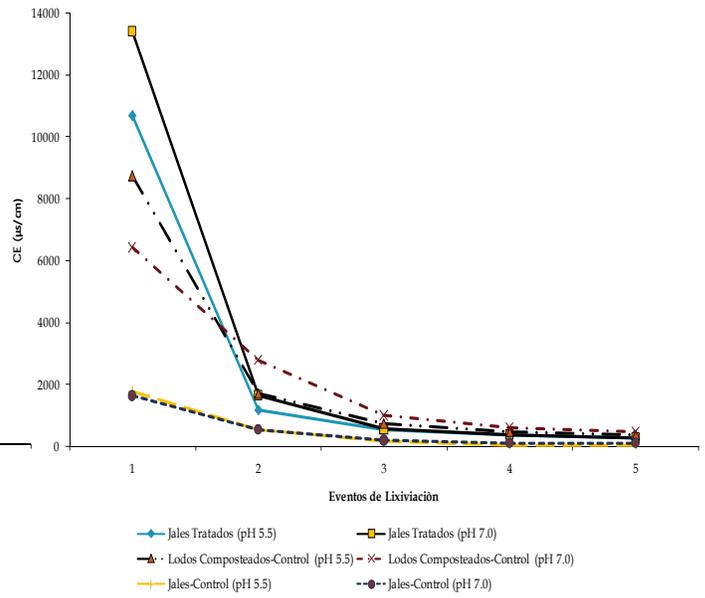


Figura 8.36. Comportamiento de la CE en jales contaminados artificialmente tratados con biosólidos.

Es importante mencionar que la presencia de EPT en los lixiviados correspondiente a la muestra de jales control solo fué significativa en los 2 primeros eventos y después la concentración permaneció por debajo del límite de detección, resultado que concuerda con los valores obtenidos de Conductividad eléctrica.

El análisis de COT (Figura 8.37) mostró nuevamente una mayor liberación de materia orgánica soluble a pH 7.0, lo cual se explica atendiendo al conocimiento de que la materia orgánica es más soluble en condiciones cercanas a la alcalinidad.

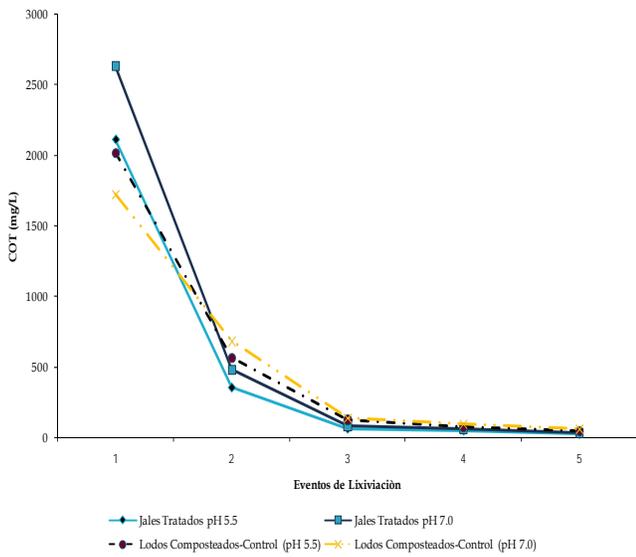


Figura 8.38. Determinación de COT en los lixiviados de jales contaminados artificialmente tratados con biosólidos.

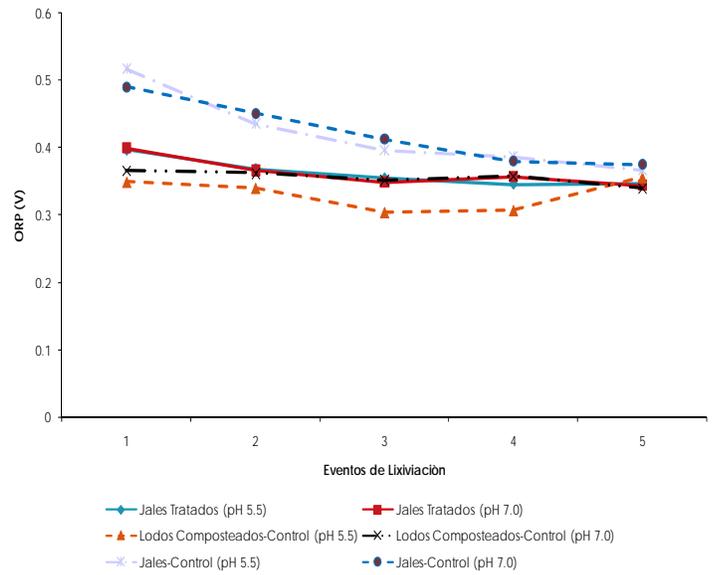


Figura 8.39. Determinación del potencial de óxido-reducción en jales contaminados artificialmente tratados con biosólidos.

Bajo las condiciones empleadas, el potencial de óxido-reducción (Figura 8.38) de la solución presenta condiciones oxidantes, lo que pone de manifiesto la estabilidad de los metales aún ante la presencia de fracciones orgánicas de bajo peso molecular.

CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES

- Las muestras de jales evaluados contienen cantidades importantes de metales, aunque la lixiviación bajo las condiciones actuales no representa gran riesgo ya que tienen una forma muy estable.
- La estabilidad de los metales presentes en los jales está relacionada con la composición química del jal, ya que tiene una cantidad importante de cuarzo y calcita que pueden interactuar con los metales.
- Las pruebas de DRX, indican que la presencia de minerales tipo sulfuro es muy baja, predominando los carbonatos, por lo que el potencial de generación de drenaje ácido es bajo.
- Las pruebas de extracción secuencial muestran que los EPT se encuentran preferentemente asociados a las fracciones de carbonatos y residual, y en poca proporción en la fracción intercambiable.
- Las pruebas de estabilización de metales por parte de los lodos residuales y biosólidos en la muestra original, no fueron concluyentes debido a que la concentración de EPT en lixiviados por parte de los biosólidos es similar a la concentración que liberan los jales mineros.
- Las pruebas de estabilización utilizando biosólidos sobre los jales contaminados artificialmente muestran que éstos son capaces de estabilizar cantidades considerables de EPT.
- Se considera que las pruebas de estabilización con lodos y biosólidos requiere ser estudiada con más detalle aun en muestras de jales contaminadas artificialmente.

CAPÍTULO X. PERSPECTIVAS

- Se hace necesario evaluar el efecto de estabilización utilizando muestras de jales que actualmente presenten problemas de contaminación por lixiviación y generación de drenaje ácido de mina con elevadas concentraciones de EPT en solución.
- Evaluar diferentes arreglos experimentales de biosólidos en contacto con los jales a fin de determinar su aplicación en campo.

CAPÍTULO XI. REFERENCIAS

1. Abbott D. E., Essington M.E., Mullen M.D., Ammons J.T., (2001). Fly ash and lime-stabilized biosolids mixtures in mine spoil reclamation: simulated weathering. *Journal of Environmental Quality* 30: 608-616.
2. Andreoli L.A.R., de Castro A.G., Picinatto A.G., Pegorinin E.S., (2002). Effect of the employments of biosolids as a recovery agent for degraded areas. *Water Science and Technology* 46: 209-216.
3. Armienta María Aurora., Villaseñor Cabral G., y Romero Francisco Martin, (2005). Propuesta de estrategia metodológica para la evaluación de la peligrosidad de jales mineros en México. AIMMGM XXVI Convención Internacional de Minería, Veracruz, Ver.
4. Barrios J. A., (2001). Quality of Sludge generated in wastewater treatment plants in México: meeting the proposed regulation. IWA Specialized Conference on Sludge Management: regulation, treatment, utilization and disposal. Acapulco, México, pp 54-61.
5. Campos Valquiria, 2003. *Estudio de un método alternativo para la purificación de Arsénico en agua*. *Revista de la Sociedad Química de México*, Vol. 47, Núm. 3, 2183-286.
6. Cardoso Vigueros Lina, (2002). Aplicación en un suelo agrícola de lodos residuales tratados. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México 27-31 Octubre 2002.
7. Cruz Roel, Mendez Blanca A., Monroy Marcos y González Ignacio, 2001. *Cyclic Voltammetry applied to evaluate reactivity in sulfide mining residues*. *Applied Geochemistry* 16, 1631-1640.
8. Cuevas B. José, Seguel S. Oscar, Ellies Sch. Achim y Dôrner F. Josè, (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con

- especial referencias a la adición de lodos urbanos. *J. Soil Sc. Plant. Nutr.* 6 (2) (1-12).
9. Doménech C., Ayora C., De Pablo J., (2002). Sludge weathering and mobility of contaminants in soil affected by the Aznalcóllar tailings dam spill (SW Spain): *Chemical Geology*, 190, 355-370.
 10. Doménech X., (1997): *Química del suelo. El impacto de los contaminantes*. Ed. Miraguano. Madrid, España. 11-18, 29-52, 119-122.
 11. Ehlers L. J. y Luthy R. G., (2003). Contaminant bioavailability in soil and sediment. *Environmental Science and Technology*. August: 292-302
 12. Gerriste R.G. y Van Driel W., (1984): The relationship between adsorption of trace metals, organic matter and pH in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 13,197-204.
 13. Gutiérrez Ruiz Margarita, Romero Francisco Martín y González Galia Hernández, (2007). *Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V. 24, núm. 2. p. 170-184
 14. Illera V., Walter I., Souza P., Cala V., (2000). Short-term effects of biosolids and municipal solid waste application on heavy metals distribution in a degraded soil under a semi-arid environment. *The Science of the total Environment* 255:29-34.
- Jjemba P.K. (2004). *Environmental Microbiology: Principles and Applications*. Science Publishers, Inc., Enfield New Hampshire.
15. Kiekens L., (1984): Behaviour of heavy metals in soils En "Utilisation of sewage sludge of land: Rates of application and long-term effects of metals". Eds S. Berglung, R.D. Davis y P. L'Hermite, D. Reidel Publis. Co. Dordercht, pp 126-134.
 16. Lawrence R.W. y Wang Y., (1997). "Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage" Fourth International Conference on Acid Rock Drainage. Vancouver, Canadá.
 17. Manahan, S.E., 1989. *Toxicological Chemistry. A guide to toxic substances in chemistry*: Michigan, USA, Lewis Publishers, Inc., 317 p.

18. Méndez Ortiz Blanca Adriana, 2003. Caracterización y modelamiento hidrogeoquímico de la oxidación de sulfuros durante la alteración simulada de jales mineros procedentes de una mineralización tipo skarn pb-zn-ag, Tesis de Maestría, UASLP.
19. Méndez-Ortiz B.A, Carrillo-Chávez A. y Monroy-Fernández M.G., (2007). Acid rock drainage and metal leaching from mine waste material (tailings) of a Pb-Zn-Ag skarn deposit: environmental assessment through static and kinetic laboratory test. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V. 24, núm. 2, p. 161-169.
20. Martínez Yadira y Rivero Carmen, (2005). *Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo*. *Revista de Ingeniería UC*. Vol. 12, No. 3, 14-20.
21. Mendoza Amézquita E., Armienta María A., Ayora Carlos, Soler Albert y Ramos Estela, (2006). Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres , en el distrito minero de Guanajuato, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. 1. 75-83.
22. Naidu R., Bolan N.S., Kookana R.S. y Tiller K.G. (1994): Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. *J. Soil Sci.* 45, 419-429.
23. Navarro Flores Andrés, Martínez Sola Francisco, (2008). Effects of sewage sludge application on heavy metal leaching from mine tailings impoundments. *Bioresource Technology* 99, 7521-7530.
24. Oropeza García Norma, (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia* 1: 51-58.
25. Puga Soraya, Sosa Manuel, Lebgue Toutcha, Quintana Cesar y Campos Alfredo, (2006). *Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera*. *Ecología Aplicada*, 5(1,2).

26. Ramírez Coutiño Víctor A., 2008. Implementación de un proceso de compostaje con lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales para su estabilización y seguimiento de la generación de materiales húmicos. Tesis de Maestría. Querétaro, México.
27. Ramos Yann y Siebe C., (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el distrito minero de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. (1). 54-74
28. Ramos-Arroyo Y.R., Prol Ledesma R.M. y 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*, v. 23, núm. 2. 268-284.
29. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002, Norma oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece los requisitos para la caracterización del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. *Diario Oficial de la Federación*, 14 enero de 2004. México.
30. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002, Norma oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
31. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2000, Norma oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis
32. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 1993, Norma oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993 (antes NOM-052-ECOL-1993), que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

33. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 1993, Norma oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 (antes NOM-053-ECOL-1993), que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
34. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2004, Norma oficial Mexicana NOM-147-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio.
35. Sobek A. A., Schuller, W.A. Freeman J.R. y Smith R.M., (1978). Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. EPA-600/2-78-054 (U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio).
36. Stevenson F. J 1994. Humus, Chemistry. Génesis, Composición, Reactions. 2nd ed., Ed. Wiley.
37. Schwab Paul, Zhu D., Banks M.K., 2007. Heavy metal leaching from mine tailings as affected by organic amendments. *Bioresource Technology* 98, 2935-2941.
38. Tessier A. (1979). Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical*, Vol. 51, No. 7
39. United Status Environmental Protection Agency (US-EPA), 1994, Method 3051: Microwave assisted acid digestion/sludges, soils, in SW-846, Test Methods For Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods: United Status Environmental Protection Agency, sp.
40. Volke Sepúlveda T., Velazco Trejo J. A. y De la Rosa Perez D.A., (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Primera Ed. Mexico, D.F
41. Walter I., Martinez F. y Cuevas G., (2003). *Dinámica de los metales pesados en un suelo degradado enmendado con residuos orgánicos urbanos*. Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. VI.

42. Wizotsky F. y N. Cremer, (2003). Sequential Extraction Procedure in Columns. Part 1: Development and description of a new method, Environmental Geology 44 (2003) 799-804.
43. Wizotsky F. y N. Cremer, (2003). Sequential Extraction Procedure in Columns. Part 2: Application of a new method, Environmental Geology 44 (2003) 805-810.