

# Evaluación de las alternativas para la disminución del impacto ambiental por jales históricos en el distrito minero de Zimapán.

Victor Esteban Reyes Cruz, María Aurora Veloz Rodríguez, Marissa Vargas Ramírez.

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

[vreyes@uaeh.reduaeh.mx](mailto:vreyes@uaeh.reduaeh.mx), [mveloz@uaeh.reduaeh.mx](mailto:mveloz@uaeh.reduaeh.mx), [marissav@uaeh.reduaeh.mx](mailto:marissav@uaeh.reduaeh.mx).

Marcos Gustavo Monroy Fernández, Roel Cruz Gaona, Roberto Briones Gallardo

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

[monroyma@uaslp.mx](mailto:monroyma@uaslp.mx), [rcruz@uaslp.mx](mailto:rcruz@uaslp.mx), [briones@uaslp.mx](mailto:briones@uaslp.mx)

Ignacio González Martínez, María Maura Margarita Teutli León

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

[igm@xanum.uam.mx](mailto:igm@xanum.uam.mx)

René Gómez Mercado

INIFAP sección Hidalgo

[rene\\_gomez@terra.com.mx](mailto:rene_gomez@terra.com.mx)

## Resumen

En este proyecto de investigación se planteó el desarrollo de un estudio que permita ofrecer la propuesta de una iniciativa para resolver el problema concreto del impacto ambiental provocado por jales históricos y la presencia de arsénico y los metales tóxicos en el distrito minero de Zimapán. Las primeras etapas contemplan la determinación de un modelo geoambiental que permita identificar las áreas mayormente impactadas en el sitio y que provea la información de base relacionada a las variaciones naturales geoquímicas asociadas con el tipo de depósito, así como las variaciones antropogénicas asociadas con los pasivos ambientales. Por otro lado, se encuentra también el estudio de las condiciones y mecanismos de la reactividad de los sulfuros minerales que contienen As, Pb, Zn, Cu y Fe en suelos contaminados y residuos mineros, bajo las condiciones de alteración predominantes en el sitio. Los resultados más relevantes obtenidos hasta el momento muestran la presencia de los elementos potencialmente tóxicos en concentraciones que sobrepasan las recomendadas para el uso residencial o industrial de suelos. Además se ha

observado la generación de drenajes ácidos provenientes de los jales incrementando con ello el riesgo en la salud de la población expuesta.

## **Introducción**

En México, la minería es una de las actividades económicas de mayor tradición, la cual se ha desarrollado por casi cinco siglos. Siendo relevante este tipo de actividad por la evolución tecnológica en el beneficio y recuperación de metales, desde los procesos primitivos de fundición, amalgamación (método de patio), cianuración, flotación, hasta los métodos modernos de lixiviación. Sin embargo, esta actividad también conlleva un problema de actualidad: la acumulación de residuos mineros (jales y estériles) que se ha producido durante todo ese de tiempo [1]. El manejo inadecuado y la disposición de estos residuos han generado problemas de tipo ambiental, entre los cuales podemos mencionar la generación de drenaje ácido de roca acompañado de la lixiviación de metales pesados [2-3] y la falla en estructuras de retención (diques) de los depósitos que contienen a los jales, ocasionando por su naturaleza (tamaño de partículas, viscosidad y contenido de agua) avalanchas que cubren las partes más bajas de valles y algunas veces se depositan en ríos [4].

Dentro de los residuos (jales) que se generan durante esta explotación minera se encuentran los sulfuros generalmente sin valor económico como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{FeS}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ); los minerales de ganga (silicatos, carbonatos, etc.), además de bajas cantidades de los sulfuros con algún valor económico ( $\text{PbS}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{FeCuS}_2$ , etc.) que no fueron recuperados por las plantas concentradoras. Estos residuos constituyen en este tipo de menas hasta 85% del material procesado, por lo cual, la cantidad de mineral que se envía a la presa de jales es de miles de toneladas.

En el distrito minero de Zimapán estos residuos están constituidos por jales históricos y recientes, donde las características climáticas del sitio han provocado que se dispersen o movilicen en una extensa área urbana y rural, con suelos superficiales contaminados por arsénico y metales pesados con alto potencial contaminante (plomo, zinc y cadmio, principalmente), que merecen ser remediados para disminuir los altos riesgos ecológicos y en la salud de la comunidad expuesta. Este proyecto de investigación planteó el estudio y la propuesta de una iniciativa para resolver el problema concreto del impacto ambiental provocado por jales históricos en el distrito minero de Zimapán. Lo anterior, a través del desarrollo de un proceso que permita

caracterizar y controlar la movilidad química del arsénico y los metales tóxicos contenidos en los suelos contaminados, aun cuando estos permanezcan in situ, con el fin de hacer el proceso técnica y económicamente viable. El proyecto está integrado con investigadores de tres instituciones nacionales, algunos de ellos con importante experiencia científica y aplicada en el campo de especialidad de esta propuesta. Cada institución lleva a cabo estudios particulares dentro del proyecto que coadyuvan a la realización del mismo. Dichas estudios se pueden concentrar en lo siguiente:

[i] El estudio del modelo geoambiental, en el que se asocian las características químicas y mineralógicas de los residuos con la naturaleza metalogénica del depósito mineral y con las condiciones geoambientales del sitio.

[ii] El estudio de las condiciones y mecanismos de la reactividad de los sulfuros de As, Pb, Zn, Cu y Fe en suelos contaminados y residuos mineros, bajo condiciones de alteración, predominantes en el sitio

[iii] El estudio y desarrollo de un proceso de electroremediación de sitios contaminados, basado en los resultados que se obtengan de la reactividad de los metales tóxicos.

[iv] La generación de un modelo matemático que prediga la posibilidad del uso de la electroremediación en diferentes residuos mineros (jales) y suelos contaminados expuestos.

## **Metodología**

1. Implementar un procedimiento metodológico para identificar al modelo geoambiental que caracteriza al distrito minero histórico de Zimapán, basado en las características geoquímicas de los residuos, las características climáticas y geomorfológicas del sitio y el historial y características de la actividad minera en el sitio.

- ◆ Realizar la caracterización de la mineralogía primaria, secundaria y terciaria asociada a la alteración de los residuos y a la movilidad/fijación de EPT's. Para ello se realizan análisis mineralógicos por microscopía óptica, DRX, MEB y microsonda electrónica.
- ◆ Realizar el estudio de la dispersión de los contaminantes, medios de transporte y medios receptores, como apoyo a la determinación de los parámetros de referencia del modelo geoambiental, mediante la combinación de análisis

químicos de muestras, representativas y suficientes, de residuos y suelos superficiales y su representación geográfica en una malla de muestreo.

2. Identificación de los productos de reacción (sólidos y en solución) asociados a la alteración de los minerales portadores de los elementos contaminantes y de los procesos implicados en la movilidad y/o concentración de contaminantes en suelos y sedimentos de medios receptores.
  - ◆ Realizar pruebas diagnósticas de movilidad de EPT's de acuerdo a procedimientos (según norma EPA 1312) y de predicción de drenajes ácidos (según prueba EPA 600 ABA), los cuales ya están considerados dentro del proyecto de la NOM para la caracterización de jales mineros.
  - ◆ Realizar pruebas cinéticas en celdas húmedas y columnas que simulan la alteración de residuos mineros y suelos contaminados para determinar los procesos geoquímicos e hidrogenoquímicos implicados en la movilidad/inmovilidad de los contaminantes (este punto se sustituyó por pruebas de bioaccesibilidad que se explican más adelante).
3. Identificar la reactividad de los jales portadores de los EPT's a través de técnicas electroquímicas.
  - ◆ Estudio voltamperométrico, utilizando electrodos de pasta de carbono, para determinar la reactividad de los sulfuros puros (PbS, ZnS, FeAsS) y de los sulfuros contenidos en jales, así como las interacciones entre sulfuros que afectan la reactividad de los mismos.
  - ◆ Caracterizar los productos formados durante la reacción electroquímica a través de microscopía electrónica de barrido y si así se requiere, por técnicas de espectroscopía moderna.
4. Determinar las contribuciones debidas al suelo y aquéllas debidas a los metales contaminantes y en general a los EPT's.
  - ◆ Estudio mediante voltamperometrías cíclicas, en un amplio intervalo de potenciales, para determinar la ventana electroactiva inherente a cada uno de los EPT's.
  - ◆ Determinación de los procesos característicos de los EPT's.
  - ◆ Identificar la interacción que existe entre los EPT's con el fin de determinar la posible interferencia en la reactividad de los mismos.

5. Determinación de un modelo matemático de la electroremediación de los jales, contaminados por EPT's, del distrito minero de Zimapán.
- ◆ Estudio de un sistema de dos fases (suelo-medio acuoso).
  - ◆ Estudio de las propiedades físicas y químicas de ambas fases.
  - ◆ Estudio de las relaciones de equilibrio químico que describen la interacción iónica de cada fase y entre las fases.
  - ◆ Estudio de la influencia del potencial eléctrico en las reacciones que ocurren en la interfase sólido-líquido.
  - ◆ Estudio de la dependencia de la carga superficial del suelo respecto del contenido iónico en el medio acuoso.

## **Resultados y Discusión**

Se realizó la caracterización de la mineralogía primaria, secundaria y terciaria asociada a la alteración de los residuos y a la movilidad/fijación de metales tóxicos de jales históricos del distrito minero de Zimapán. Para ello, después de realizar un muestreo superficial de estos jales, se realizaron análisis mineralógicos por difracción de rayos-X, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Además, se realizó un estudio por microsonda electrónica en el laboratorio de Metalogenia y Materiales de la Universidad de Orleáns (Francia) para determinar la composición química promedio de fases portadoras de elementos potencialmente tóxicos al ambiente.

Se realizó un estudio de gabinete a partir de cartas e imágenes del INEGI para seleccionar perfiles de muestreo de suelos basales y potencialmente contaminados en el área de estudio. Este análisis estuvo fundamentado en la identificación de las fuentes potenciales de contaminación y sus medios de transporte y depósito, así como de los sitios de exposición a los cuales puede asociarse el riesgo en salud.

Como parte del estudio de la dispersión de los contaminantes, medios de transporte y medios receptores y como apoyo a la determinación de los parámetros de referencia del modelo geoambiental, se realizó una campaña de muestreo en el área de estudio. Se tomaron muestras en perfiles de suelo y sedimento de arroyos aledaños a las presas de jales históricos. Las muestras colectadas se prepararon de acuerdo con protocolos ambientales estrictos (en condiciones de secado, homogenización,

preparación y digestión). Los análisis químicos de las muestras representativas de los perfiles se realizaron por espectrometría de absorción atómica (EAA) para elementos mayores, con horno de grafito acoplado al EAA para metales traza y por generador de hidruros acoplado al EAA para metaloides que forman hidruros (As, Se y Sb).

Se realizó el estudio de la movilidad de los elementos tóxicos solubles con agua al equilibrio con CO<sub>2</sub> (agua meteórica simulada), así como un estudio sobre la bioaccesibilidad de Pb, Cd y As (elementos con mayor significado ambiental por su potencial toxicidad) contenidos en suelos contaminados por los jales históricos, como criterio primario para la estimación del riesgo en salud. Es importante mencionar que en el proyecto no estaba inicialmente involucrado el concepto de bioaccesibilidad, que es un indicador de la biodisponibilidad de los contaminantes en el tracto gastrointestinal después de ingesta, como criterio geoquímico incorporado en las evaluaciones de riesgo a la salud por exposición en suelos contaminados. Este concepto fue integrado, una vez que ha alcanzado cierta validez científica e interinstitucional, siendo el concepto incluido en el anteproyecto de Norma Oficial Mexicana que establece los criterios para la remediación de suelos contaminados por metales y metaloides. De esta manera, este criterio fue considerado con un mayor significado ambiental para el proyecto, respecto al criterio de movilidad basado en las pruebas cinéticas en celdas húmedas.

Se realizó un estudio mineralógico por difracción de rayos-X de las muestras de suelo para determinar las fases minerales mayores a las cuales se asocian los portadores de contaminantes y que tienen potencial de inhibir o promover su movilidad en los medios del ambiente.

Se realizaron pruebas diagnósticas de movilidad de metales tóxicos de acuerdo a procedimientos según norma EPA 1312 y de predicción de drenajes ácidos según prueba EPA 600 ABA, los cuales ya están considerados dentro de la NOM para la caracterización de jales mineros, en muestras representativas de residuos sulfurosos procedentes de las presas de jales históricas del distrito Zimapán.

La información de los estudios realizados a los jales históricos y suelos del distrito minero forma parte de 2 trabajos realizados en la UASLP titulados: *“Evaluación geoquímico - ambiental de residuos (jales) de mineralizaciones poliméricas del estado*

*de Hidalgo, México* [5] y *“Evaluación de la dispersión y movilidad de elementos potencialmente tóxicos (arsénico, plomo y cadmio) en suelos de Zimapán, Hgo”* [6].

En el primero de estos trabajos se tienen los resultados de los estudios realizados a los jales históricos y en el segundo los resultados de los estudios realizados a los suelos aledaños a los residuos mineros.

A continuación se presenta un resumen de la información generada por estos trabajos de las dos primeras etapas de este proyecto:

## **I. *Evaluación geoquímico- ambiental de residuos (jales) de mineralizaciones poliméricas del estado de Hidalgo, México***

### **Diagnóstico Geoambiental del sitio**

Las presas de jales estudiadas (San Miguel y Sta. María) del distrito minero de Zimapán están constituidas principalmente por una mineralización metálica abundante (sulfuros, sulfosales, etc.) y una no metálica formada por minerales calcosilicatados (típicos de un metamorfismo de contacto), calcita y cuarzo. Dichas mineralogías fueron confirmadas por los estudios de microscopía óptica y electrónica de barrido y por difracción de rayos X, donde se determinaron las fases minerales primarias mayoritarias (calcita y cuarzo), así como las fases minerales mayoritarias secundarias (yeso).

### **Análisis químico de muestras de jales históricos**

En los resultados obtenidos de la química de residuos mineros, se observa que los residuos contienen concentraciones relativamente importantes de metales que podrían clasificarse como potencialmente tóxicos (As, Cr, Sb, Se, Zn, Cu, Pb, Cd, Bi y Mn). Así mismo, se observó que la concentración de estos elementos es heterogénea tanto de una muestra a otra en la misma presa, como de una presa a otra en el mismo distrito. Esto es consecuencia de los distintos tipos y composiciones químicas y mineralógicas de los cuerpos mineralizados explotados dentro de un mismo distrito, así como de sus distintas épocas de explotación y beneficio lo cual impactó también en las características de los residuos depositados (granulometría, grado de humedad, forma de disposición, etc.). También se puede notar que los contenidos de arsénico son relevantes por su abundancia (valor promedio de 13 000 ppm) principalmente en la presa San Miguel, así como las concentraciones de Cd que están en un setenta y cinco por ciento más abundante en esta presa en comparación con la de Sta. María.

### **Movilidad química de metales en los jales históricos.**

Respecto a las pruebas realizadas en 40 muestras de jales de este distrito para determinar la movilidad de los elementos por los métodos CRETIB y EPA 1312, se observó que las concentraciones de los lixiviados obtenidos para el primer método (CRETIB), presentan concentraciones en ETP's como Cd, Ni, Ag y As que no rebasan los límites máximos permisibles por la NOM-053 ECOL en las dos presas del distrito (San Miguel y Sta. María), mientras que con los resultados del método EPA 1312, se observó una mayor movilidad de los seis metales analizados (Cd, Ni, Pb, Mn, Zn, As), presentándose que el As, Cd y Ni son más móviles en la presa San Miguel. La mayor movilidad del arsénico en estos residuos podría estar asociada en su origen a la presencia de arsenopirita y sulfosales contenidos en la mineralogía primaria del yacimiento (característico del tipo skarn). Sin embargo, esta prueba se realiza bajo condiciones no oxidantes, de ahí que su fuente real de movilidad debe estar asociada a una fase secundaria o terciaria soluble, producto seguramente de la oxidación in situ de los minerales primarios.

El plomo representaría también una fuente potencial de contaminación en la presa San Miguel, como se verá más adelante en los análisis químicos realizados en los suelos aledaños a este sitio.

### **Predicción de drenaje ácido de roca (DAR)**

Respecto a la predicción del drenaje ácido de roca (DAR), las muestras presentan una heterogeneidad en el pH de la mezcla (pasta), ya que se obtuvieron valores que van desde 2.5 hasta 7.5, sin embargo de manera individual (por presa) se tiene un valor de 6.8 para la presa Santa María y 5.5 para la presa San Miguel. De manera global (las dos presas), el criterio ABA universal para la evaluación o predicción de la clasificación de pH del drenaje del sitio, las muestras están en un intervalo de  $5.0 \leq \text{pH de pasta} \leq 10.0$ , que significa que están cerca de la neutralidad. De acuerdo a la relación del potencial de neutralización contra pH de pasta las muestras representan una etapa temprana de acidez (pH entre 6.0 y 8.0), que significa una variación de acidez hasta la neutralidad.



Por los resultados obtenidos para el potencial de acidez (PA), se requiere un promedio de 453.30 kg de carbonato de calcio para neutralizar el ácido generado por la alteración de una tonelada de residuo; mientras que el potencial de neutralización (PN) con un promedio de 137 t  $\text{CaCO}_3$ /1000 t de residuo, equivale a la cantidad de carbonato de calcio disponible en cada muestra para neutralizar el ácido generado por la misma muestra, además, las muestras de los residuos tienen un promedio de potencial neto de neutralización (NNP) de -316.0 t  $\text{CaCO}_3$ /1000 t, por lo que el potencial de generación de ácido equivale a esta cantidad para neutralizar el ácido generado por la alteración total del residuo.

De acuerdo al criterio universal ABA, que establece valores de relación del potencial de neutralización (NPR)  $< 1.0$  o  $\text{NNP} < 0$  t  $\text{CaCO}_3$ /1000 t, algunas de estas muestras son eventualmente ácidas (déficit neto de capacidad de neutralización), sin embargo, se observa que algunas muestras presentan valores de  $\text{NPR} > 1.0$  y  $\text{NNP} > 20$  t  $\text{CaCO}_3$ /1000 t, que significa que están indefinidamente cerca de la neutralidad o alcalinas, esto puede deberse a la naturaleza alcalina del material encajonante.

Por tanto, si se considera la potencial movilidad de arsénico en lixiviados a partir de la alteración de los residuos, existe efectivamente un gran posibilidad de encontrar una alta concentración de arsénico disuelto, puesto que aun a los valores de pH cercanos de la neutralidad encontrados, especies de arsénico en solución son estables. En cambio, bajo estas mismas condiciones de neutralidad, las especies solubles de plomo y de la mayoría de los otros metales potencialmente tóxicos no serían estables, favoreciendo su permanencia en fase sólida como fases secundarias tipo óxidos, sulfatos o minerales secundarios complejos.

## ***II. Evaluación de la dispersión y movilidad de elementos potencialmente tóxicos (arsénico, plomo y cadmio) en suelos de Zimapán, Hgo.***

En el sitio de estudio, se ha relacionado la variación de la peligrosidad de los jales a las diferencias en la movilidad de los EPT's, donde la fracción soluble es la de mayor peligro, ya que podría ser movilizada o incluso presentar alto riesgo de biodisponibilidad para los seres vivos [7]. Considerando como principales EPT's, por el riesgo toxicológico que representan, al arsénico, plomo y cadmio, se realizó un estudio para determinar la bioaccesibilidad en fase gástrica e intestinal de estos tres contaminantes en 9 muestras de jales del distrito minero de Zimapán [8]. El porcentaje

de bioaccesibilidad en fase gástrica e intestinal del arsénico en las nueve muestras fue significativamente baja (<5%), lo que implica que los contenidos de arsénico biodisponible en el tracto gastrointestinal son notablemente inferiores al arsénico total inicialmente disponible en los jales. Esto se atribuye a que el arsénico está mayormente contenido como arsenopirita (FeAsS), la cual prácticamente no es soluble bajo las condiciones del tracto gastrointestinal [8-9]. Sin embargo, en condiciones de suelo, la arsenopirita seguramente no será estable por lo que probablemente su bioaccesibilidad se verá incrementada al cambiar la especie portadora del arsénico, sobre todo aquel asociado a los óxidos de Fe-Mn y carbonatos.

En cuanto a la bioaccesibilidad del plomo, este EPT presenta porcentajes entre 50 y 75% en fase gástrica para algunas muestras, mientras que para otras su bioaccesibilidad es menor de 5% [8]. En cualquier caso, la bioaccesibilidad del Pb en la fase intestinal disminuye hasta valores menores de 14%, puesto que este EPT forma complejos insolubles a las condiciones de pH de la fase intestinal. Las diferencias importantes en el porcentaje de bioaccesibilidad en fase gástrica obtenidas para el plomo en los jales de Zimapán, se atribuyó a diferencias en la especiación de los compuestos portadores de plomo: galena (PbS) en las muestras con bajo porcentaje de bioaccesibilidad, y cerusita (PbCO<sub>3</sub>) en las muestras con porcentajes de bioaccesibilidad superiores de 20% [8].

### **Evaluación hidrológica**

El municipio de Zimapán se encuentra dividido por dos provincias geológicas y fisiográficas: la provincia de la Sierra Madre Oriental y la provincia del Eje Neovolcánico, lo que define las características litológicas y estructurales de las rocas que afloran en el sitio de estudio. La evolución de los fenómenos volcánicos propició las condiciones para la formación de cuencas endorreicas, que posteriormente fueron rellenadas con aportes de materiales volcanoclásticos, los cuales tienen características litológicas de rocas volcánicas depositadas en un medio lacustre y aparentemente estratificados (INEGI, 1992). Los ríos principales que delimitan estas cuencas son el Moctezuma y el Tolimán. A partir de esta información y como parte del estudio, se delimitó una cuenca hidrológica global que surge del margen derecho del río Moctezuma, el cual sirve de límite entre los estados de Hidalgo y Querétaro, misma que abarca 6 subcuencas primarias dentro de las cuales se encuentra la

cuenca del río Tolimán, la cual cubre una superficie aproximada de 650 km<sup>2</sup> [10] y que fue subdividida para efecto de este trabajo en 7 subcuencas secundarias.

### **Muestreo exploratorio en perfiles**

Una vez realizada la evaluación hidrológica, se tomó la decisión de ubicar el área de estudio en las subcuencas 1 y 6, considerando que son las cuencas donde se desarrolló principalmente la actividad minera histórica y se depositaron los residuos tipo jales. En esta área de estudio, se tomaron 28 muestras de suelo por horizonte a través de 6 perfiles de suelo.

### **Análisis granulométrico y clasificación textural**

Mediante el análisis granulométrico se determinó que una gran parte de las muestras de suelo, tiene tendencia a la arena, clasificándose dentro de la categoría “Franco arenosa” un promedio de 70% de arena, 26% de limo y 4% de arcilla en las muestras. En general, mientras mayor es la profundidad del horizonte en el perfil, mayor será su contenido de la fracción de arena.

### **Análisis mineralógico por difracción de rayos-X (DRX)**

El estudio por DRX de las muestras de suelo, proporciona información sobre la composición mineralógica de la matriz no metálica en la que se encuentran los EPT's. Prácticamente en todas las muestras estudiadas, la calcita (CaCO<sub>3</sub>) es la especie mineral más abundante, siguiendo en orden de abundancia el cuarzo (SiO<sub>2</sub>) y yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). Estos minerales son característicos de suelos en un ambiente geológico carbonatado, aunque se refleja la mineralización skarn a través de la presencia del cuarzo y la wollastonita (CaSiO<sub>3</sub>). También se destaca que al menos en los horizontes más superficiales de los perfiles 1 y 3, se identificó la presencia de pirita (FeS<sub>2</sub>) y hedembergita (CaFeSiO<sub>6</sub>), que podrían ser un indicador del impacto de jales en los suelos, donde la hedembergita es un mineral típico de ganga de las mineralizaciones polimetálicas beneficiadas en la localidad.

Sólo en un horizonte del perfil 3 se identificó por esta técnica una especie mineral con contenidos de EPT's, en este caso, la anglesita (PbSO<sub>4</sub>). Debe destacarse ya que precisamente el horizonte de donde proviene esta muestra parece corresponder a un horizonte constituido exclusivamente por jales mineros, los cuales probablemente impactaron ese perfil de suelo durante algún derrame histórico.

### **Análisis químico de muestras de suelo**

De las concentraciones totales (recuperables) obtenidas mediante la digestión de los EPT's analizados, se destacan sobre todo las concentraciones del perfil 3 como el de mayor impacto y el del perfil 2 como de posible zona de referencia. En los seis perfiles se destaca que la concentración de la mayoría de los EPT's es mayor en las muestras del horizonte más superficial, sobre todo para arsénico, plomo y zinc, así como en menor medida para el cobre. Esto podría ser indicativo de un posible impacto de los suelos a partir de los jales mineros, considerando que las concentraciones de estos EPT's en los horizontes superiores son equivalentes a los reportados para los jales del área [11].

Las concentraciones de As, Pb y Zn pueden alcanzar hasta las 3000 mg/Kg para el perfil 3 mientras que para el perfil 2 la concentración de estos elementos no es superior a 300 mg/Kg. A reserva de que deberá determinarse para el área las concentraciones geoquímicas de fondo de EPT's en suelos, estas concentraciones de arsénico en el suelo superficial colectado en todos los perfiles de suelo, son superiores a las concentraciones de referencia para suelos de uso agrícola y residencial (22 mg/Kg) y para suelos de uso industrial (260 mg/Kg), que se proponen en el anteproyecto de Norma Oficial Mexicana que establece los criterios para la remediación de suelos contaminados por metales y metaloides. En cuanto al plomo, a excepción del perfil 2, las concentraciones de este metal en los horizontes superficiales son superiores a las concentraciones de referencia para suelos de uso agrícola y residencial (400 mg/Kg) y para suelos de uso industrial (750 mg/Kg), que se proponen en el citado anteproyecto de Norma Oficial Mexicana. La concentración del cadmio está por debajo de los valores de referencia para ambos tipos de suelo, mientras que el resto de EPT's analizados no están incluidos en el proyecto de NOM.

Por otra parte, sobresale en el perfil 3 un horizonte identificado como H-3 (a 35-40 cm de profundidad), que podría corresponder también a residuos mineros que impactaron históricamente a los suelos en el área. La concentración de EPT's y la textura de la muestra, así lo sugieren.

Además de la fracción <250 $\mu$ m, también se analizó la fracción -2mm+250 $\mu$ m y a partir de ambos análisis, se calculó por ponderación (tomando en cuenta los porcentajes en peso de cada fracción) los contenidos de EPT's para la fracción <2mm. A partir de estos valores, se determinó la correlación existente para cada EPT analizado entre los tamaños de partícula (<2mm y <250 $\mu$ m). Los resultados indican que hay una alta

correlación lineal ( $r^2 > 0.95$ ) entre los contenidos de EPT's para ambas fracciones, lo que sugiere que estos elementos se encuentran mayoritariamente distribuidos en la fracción  $< 250\mu\text{m}$ . Esto sería explicado fácilmente puesto que los jales, típicamente con granulometría menor de 250 micras, son la principal fuente de estos potenciales contaminantes.

### **Bioaccesibilidad de EPT's en el suelo**

Para cada muestra de suelo por horizonte en los seis perfiles colectados, fue determinada la bioaccesibilidad característica de la fase gástrica, empleando el método SBRC [12], con el propósito de tener un criterio más de referencia para la estimación del riesgo en salud por la posible ingesta de los suelos contaminados. Los resultados obtenidos se presentan respecto al porcentaje de arsénico y plomo bioaccesibles en fase gástrica (F.G.) para las muestras colectadas en los 6 perfiles de suelo. Aun cuando se calcularon los porcentajes de bioaccesibilidad también para Cd, Zn y Cu, sólo se reportan los de Pb y As debido a que el método utilizado sólo ha sido validado por estos EPT's con ensayos in vivo [12]. En general, el porcentaje de As bioaccesible es significativamente inferior en el horizonte superficial respecto a los horizontes más profundos. Esto implicaría que la especie portadora del EPT es distinta para el horizonte superficial, considerando que el porcentaje de bioaccesibilidad es diferente para cada compuesto [9].

A diferencia del arsénico, el plomo presenta porcentajes de bioaccesibilidad relativamente similares a través de los perfiles, en valores cercanos o ligeramente superiores de 50%, por lo que probablemente las especies portadoras de Pb son similares en todas las muestras. Sin embargo, se anticipa que estos valores de porcentaje de bioaccesibilidad son representativos de especies secundarias de plomo, puesto que la galena ( $\text{PbS}$ ) presenta porcentajes de bioaccesibilidad comúnmente menores de 15% en F.G. [8].

De los resultados de los contenidos bioaccesibles de arsénico y plomo para los 6 perfiles de suelo colectados durante el muestreo, se observa que las concentraciones de As bioaccesible en los horizontes superficiales son significativamente menores a las concentraciones totales del EPT.

Esto implicaría que la concentración de As para tomar en cuenta en la evaluación de riesgo en salud es menor a la concentración total del EPT. Cabe señalar sin embargo, que aun cuando el contenido bioaccesible de As es menor que el total, estas

concentraciones bioaccesibles en los horizontes superficiales siguen siendo mayores a la concentración de referencia para suelos de uso agrícola y residencial (22 mg/Kg As). Sólo en los perfiles 3 y 6, la concentración bioaccesible de As sobrepasa la concentración de referencia (cerca de 4 y 2 veces más, respectivamente) para un suelo de uso industrial (260 mg/Kg As).

La concentración bioaccesible de Pb en los horizontes superficiales permanece superior a las concentraciones de referencia para suelos de cualquier tipo de uso (400 mg/Kg en suelos de uso residencial y 750 mg/Kg en suelos de uso industrial), para los perfiles 1, 3, 4 y 6.

## **Conclusiones**

Las primeras etapas de este proyecto han permitido corroborar el grado de contaminación que se tiene en las zonas aledañas a las presas de los jales históricos de Zimapán, generado por la movilidad de los contaminantes. Además, se han podido establecer las áreas más afectadas en función de las características climatológicas y estructurales propias de la región. Se han determinado también las composiciones mineralógicas a partir de las cuales se tienen las principales fuentes de contaminación de EPT's. Se ha observado que a pesar de las grandes cantidades que hay de EPT's en los minerales no todas son biodisponibles, sin embargo los valores permanecen muy por encima de los recomendados para uso de suelos ya sea residenciales o industriales, por lo que se hace patente una remediación que permita que el riesgo a la salud disminuya considerablemente.

## **Referencias**

1. Moreno Tovar, R., 1998. Caracterización mineralógica y química de desechos mineros (jales), aplicada a la recuperación de valores económicos en Zimapán y Pachuca, Edo. de Hidalgo. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, México, D. F., 89 p.
2. Freeze, R, and Cherry, J. A., 1979. Groundwater. Prentice - Hall, Inc. EngleWood Cliffs, New Jersey.
3. Blowes, D.W., and Ptacek , C. J., 1994. Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. In: Jambor, J. L. and Blowes, D. W. (Eds.). Short course handbook

on environmental geochemistry of sulfide mine-waste Mineralogical Association of Canada. Nepean, v. 22, p. 271-291.

4. Kelly, E. G. and Spottiswod, D. J., 1990. Disposición de la colas. en: Introducción al procesamiento de minerales. (traducción al español por la Ed. Limusa) p.p. 423-427.
5. Moreno Tovar, R., 2005. Evaluación geoquímico - ambiental de residuos (jales) de mineralizaciones poliméricas del estado de Hidalgo, México. Tesis Doctoral, UASLP, México.
6. Jiménez Arévalo, I. Y., 2005 Evaluación de la dispersión y movilidad de elementos potencialmente tóxicos (arsénico, plomo y cadmio) en suelos de Zimapán, Hgo. Protocolo de proyecto de maestría, UASLP, México.
7. Mendez, O, B.A., 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 en Ingeniería de Minerales. CIEP-Facultad de Ingeniería, UASLP, San Luis Potosí, SLP.
8. Tellez, H.J., 2005. Determinación de la Bioaccesibilidad in Vitro de metales tóxicos en muestras de naturaleza mineral. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas, UASLP. San Luis Potosí, SLP.
9. Ruby, M.V., Schoof, R., Brattin, W., Goldade, M., Post, G., Harnois, M., Mosby, D.E., Casteel, S.W., Berti, W., Carpenter, M., Edwards, D., Cragin, D., y Chappell, W., 1999. Advances in Evaluating the Oral Bioavailability of Inorganics in Soil for use in Human Health Risk Assessment. Environ. Sci. Technol, 33: 3697-3705.
10. Ramos, L. J. A., 1996. Parámetros estructurales que controlan la hidrodinámica de las aguas subterráneas en el área de Zimapán, Hgo. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, México, D.F.
11. Moreno, T.R., Tellez, H.J., Monroy, F.M., 2003. Caracterización de Jales Sulfurosos del Estado de Hidalgo como apoyo a la identificación de Modelos Geoambientales. Memoria XXV Convención internacional de Minería de la AIMMGM en CD. Acapulco (México).
12. Kelley, M.E., Brauling, S.E., Schoof, R.A., Ruby, M.V., 2002,. Assessing oral bioavailability of metals in soil, Columbus, OH. Battelle Press.