



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**BIODISPONIBILIDAD Y ACUMULACIÓN DE PLOMO Y  
COBRE EN *Prosopis laevigata* ESTABLECIDA EN  
RESIDUOS MINEROS DE ZIMAPÁN, HIDALGO**

**TESIS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES**

Presenta:

VICTORIA SABRINA PÉREZ HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de

Dra. ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA

Chapingo, México, Mayo de 2019



**BIODISPONIBILIDAD Y ACUMULACIÓN DE PLOMO Y COBRE EN *Prosopis laevigata* ESTABLECIDA EN RESIDUOS MINEROS EN ZIMAPÁN, HIDALGO**

Tesis realizada por Victoria Sabrina Pérez Hernández bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestra en Ciencias Forestales**

DIRECTORA:



Dra. Elizabeth Hernández Acosta

ASESOR:



Dr. Victor Manuel Duarte Zaragoza

ASESOR:



M.C. Antonio Villanueva Morales

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>VI</b>
<b>DATOS BIOGRÁFICOS .....</b>	<b>VII</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos particulares.....	3
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>4</b>
<b>MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes .....	4
2.2. Minerales, su uso e importancia.....	4
2.3. Normatividad en exploración minera.....	5
2.4. Procesos de un proyecto minero.....	7
2.5. Efectos ambientales de las operaciones mineras .....	8
2.6. Remediación de los sitios mineros.....	10
2.7. Minería de Zimapán, Hidalgo .....	11
2.8. Movilidad de los contaminantes de residuos de mina .....	16
2.8.2. Plomo y cobre en residuos de mina y su afectación en las plantas ...	17

2.9. Fitorremediación aplicada a residuos de mina .....	18
2.10. Mezquite, descripción y usos .....	19
<b>Capítulo III BIODISPONIBILIDAD Y ACUMULACIÓN DE PLOMO Y COBRE EN Prosopis laevigata ESTABLECIDA EN DEPÓSITOS MINEROS .....</b>	<b>21</b>
3.1. RESUMEN .....	21
3.2. ABSTRACT .....	22
3.3. INTRODUCCIÓN .....	23
3.4. MATERIALES Y METODOS .....	24
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
3.6. CONCLUSIONES .....	38
3.7. REFERENCIAS.....	39
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>44</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ejemplo de restauración para escombrera o depósito de jal. Fuente: Oyarsun et al., (2011). .....	11
<b>Figura 2.</b> Principales regiones mineras en Hidalgo. Fuente: Elaboración propia .....	12
<b>Figura 3.</b> Depósito de residuos mineros de Zimapán (Fotografía: V. Pérez). ..	13

<b>Figura 4.</b> Viviendas encontradas en las cercanías de los depósitos de residuos mineros de Zimapán (Fotografía: V. Pérez).....	14
<b>Figura 5.</b> Depósito de residuos mineros de Zimapán en estado de oxidación (Fotografía: V. Pérez). .....	15
<b>Figura 6.</b> Lixiviado ácido derivado de los residuos de mina de Zimapán (Fotografía: V. Pérez). .....	15

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para financiar mis estudios.

Al Dr. Víctor Manuel Duarte Zaragoza, por su amabilidad, paciencia, conocimientos brindados y tiempo durante el proceso de mi formación de posgrado y el desarrollo de la investigación. Un gran mentor en esta loable formación, mi admiración y respeto.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta, por su dedicación y apoyo a esta investigación.

Al Dr. Antonio Villanueva Morales, por su apoyo, dedicación durante el desarrollo y culminación de esta investigación.

A la coordinación general de posgrado por el apoyo brindado en el transcurso del posgrado y en especial a la secretaria Magaly por su apoyo en todos los aspectos académicos, una persona de gran corazón.

A mi compañera y amiga de grupo Ilyzel, por su apoyo, ayuda y compañía a lo largo de estos dos años en el posgrado, por siempre darme las palabras de aliento necesarias para seguir trabajando por mis metas, gracias.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su amor incondicional, por su apoyo y motivación para que siga adelante con mis proyectos de vida, gracias a mi mamá Guadalupe Hernández Torres por siempre estar a mi lado, dando las palabras de aliento y la fuerza necesaria para culminar un grado académico más, que a pesar de las adversidades ha sabido guiarme en este camino de la vida.

A todos los seres de luz que siempre guían mi camino y me dan las herramientas para seguir en esta labor, que siempre me dan su protección, su amor incondicional y sus consejos para escalar otro peldaño más.

A aquellas personas que estuvieron conmigo en los momentos difíciles y felices de mi vida, cada una de ellas ha significado una parte importante de mi vida, un motivo de esfuerzo y superación.

## DATOS BIOGRÁFICOS



Victoria Sabrina Pérez Hernández (4 de noviembre de 1992) originaria de Ecatepec de Morelos, Edo. Méx. Estudio su bachillerato del año 2007 al 2010 en la Escuela Preparatoria Oficial No.7 de Los Reyes, La Paz, Edo. Méx. Un año después cursó la licenciatura en Ingeniería Ambiental en el Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México. Obteniendo el título de Ingeniera Ambiental en agosto del 2016, con la tesis titulada CONTENIDO Y BIODISPONIBILIDAD DE Pb, Y Cr, EN UN SUELO AGRÍCOLA REGADO CON AGUAS RESIDUALES Y SU ACUMULACIÓN EN *Medicago sativa*. En el 2017 ingresó al el Programa de Posgrado en Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, en donde concluyó sus estudios de Maestría en 2 años.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN GENERAL: MINERÍA EN MÉXICO**

La minería ha sido tradicionalmente una actividad de importancia económica en México, desde tiempos precolombinos, con el uso de rocas como obsidiana y jade, minerales como turquesa, ópalo y metales como oro, plata y cobre, entre otros (Sánchez y Camprubí, 2010).

Se conocen algunas obras mineras precolombinas en México, por ejemplo, en Amatepec, Sultepec, Temascaltepec y Zacualpan (Estado de México); Taxco y Zumpango (Guerrero); Tlalpujahuá (Michoacán); Fresnillo, Mazapil, Sombrerete y Zacatecas (Zacatecas); Santa Bárbara (Chihuahua); Pachuca (Hidalgo); Guanajuato y en la Sierra de Querétaro (Canet y Camprubí, 2006).

El modo de operación de dicha actividad, más allá de las pautas de exploración basadas en identificar recursos ya conocidos por la población autóctona y de algunos nuevos descubrimientos, varió poco desde sus inicios, asimismo, la escala de la minería de la época Colonial y de los inicios del México independiente no alcanzó las dimensiones de la minería moderna, a excepción de distritos con yacimientos especialmente ricos, como Pachuca – Real del Monte o Guanajuato (Sánchez y Camprubí, 2010).

Actualmente la minería en México ocupa el primer lugar en la producción de plata a nivel mundial, es el primer destino en inversión en exploración minera en América Latina, también contribuye al cuatro por ciento del Producto Interno Bruto nacional y en el mes de julio de 2015, generó 352 mil 666 empleos directos y más de 1.6 millones de empleos indirectos (Secretaría de Economía, 2018).

Sin duda alguna, la actividad minera produce beneficios en las zonas donde se realiza, como son la generación de nuevos empleos, mejoras en carreteras y vialidades, entre otras más, pero puede llegar a generar un severo impacto ambiental, así como conflictos por el uso de la tierra y oposición a la explotación

minera por grupos ambientalistas, sobre todo en países más poblados (Oyarzun, 2011).

La minería es un proyecto de gran impacto en muchos sentidos, desde el uso de la zona a explotar, comúnmente aprovechada por empresas transnacionales; los impactos al ambiente, la biodiversidad, los suelos, la salud y la vivienda. Los minerales se encuentran presentes en nuestra vida, puesto que casi todo lo que se consume contiene un derivado de estos, pero esto no justifica un modelo extractivista desmesurado (Castro, 2013).

Por lo cual es importante regular las actividades mineras y sus procesos, con la finalidad de reducir al máximo los daños al ambiente, ya que los trabajos mineros modifican completamente la zona explotada, como la pérdida de la cobertura vegetal, desvió de cauces de ríos para el procesamiento del mineral, y la generación de residuos mineros que al dispersarse afecta el aire, el suelo y el agua (ELAW, 2010).

Debido a los problemas ambientales que genera la minería, ha incrementado la importancia de recuperar las zonas afectadas y en países desarrollados ya no es permisible la presencia de minas abandonadas, por lo que, las normas de estos países obligan a la recuperación de lugares minados y logran que se apliquen algunas medidas de rehabilitación, como son la recuperación de efluentes de cianuro mediante agentes químicos, el manejo de los drenajes ácidos, la confinación de residuos peligrosos y el uso de agentes biológicos para el control de los metales pesados (Coll *et al.*, 2002).

Zimapán, Hidalgo, México, es un municipio con una población de 37,500 habitantes, se encuentra ubicado en una región minera donde se extraen elementos como oro, plata, mercurio, cobre, plomo y zinc (Servicio Geológico Mexicano, 2011). Los residuos de mina o jales como también son llamados, están constituidos por partículas de sulfuros metálicos, tales como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) (Romero *et al.*, 2007; Moreno-tovar *et al.*, 2009).

Estos minerales al intemperizarse liberan arsénico (As) y metales pesados (Mendez y Armieta, 2003; Ongley *et al.*, 2007). En los residuos de mina de Zimapán, se han reportado concentraciones hasta de 38,700 mg kg<sup>-1</sup> de As, 16,00 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, 22,400 mg kg<sup>-1</sup> de Zn, 1750 mg kg<sup>-1</sup> de Cd, 182 mg kg<sup>-1</sup> de níquel y 990 mg kg<sup>-1</sup> de cobre (Moreno-Tovar *et al.*, 2009). Los residuos de minas suelen ser muy susceptibles a la dispersión por la lluvia y el viento, afectando grandes extensiones de suelo al ser esparcidos (Lee *et al.*, 2006).

### **1.1. Objetivo general**

- Conocer la concentración y disponibilidad de Plomo y Cobre en plantas de *Prosopis laevigata* establecidas en depósitos de residuos mineros en Zimapán, Hidalgo.

### **1.2. Objetivos particulares**

- Realizar una caracterización física y química de los residuos de mina de Zimapán, Hidalgo.
- Conocer la concentración de metales pesados en residuos de mina de Zimapán, Hidalgo.
- Analizar la concentración de metales pesados en hoja de *Prosopis laevigata*.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO CONCEPTUAL**

#### **2.1. Antecedentes**

De acuerdo con el INEGI (2009) y Lavandaio (2008), La minería es una actividad extractiva, por lo que los minerales deben ser desprendidos del depósito en que se encuentra, ya sea al aire libre o en excavaciones subterráneas, teniendo procesos de cribado o cernido previos a la venta o transferencia del mineral.

Las actividades del sector minero generan aumentos en la economía de la región de al menos 24 estados de México donde se desarrolla la minería concesible y las inversiones pueden ser a largo plazo de acuerdo a su beneficio obtenido, un proyecto de este tipo puede llegar a generar infraestructura básica de caminos, drenaje, alumbrado y la generación de nuevos empleos (Luévanos, 2011).

Los yacimientos minerales tienen un valor focalizado, mientras se cuentan con reservas de material a extraer, esto va relacionado al beneficio económico que lo haga viable y dependiendo de la cantidad de reservas minerales o su calidad, la minería puede incrementarse o cesar.

Las inversiones de la actividad minera pueden ser más grandes que los productos económicos que genera, ya que puede haber problemas de altos costes de explotación, que el mineral no pueda ser extraído por cuestiones geopolíticas o ambientales y el mayor problema, la cantidad de residuos generados por la extracción y procesamiento de minerales (Oyarzun, 2011).

#### **2.2. Minerales, su uso e importancia**

Los minerales son sustancias inanimadas que componen el planeta, compuestos por químicos inorgánicos y algunos con sustancias químicas como hidrocarburos. Algunos minerales se encuentran en formas cristalinas y otros en forma de agregados que componen las rocas. La mayoría de productos consumidos en la vida cotidiana son derivados de minerales como son: ladrillos, cerámicas, baldosas, hormigones, vidrios, plásticos, hierros, chapas, alambres, bronces,

caños, cables, herrajes, pinturas, sanitarios, herramientas, vajilla y utensilios están hechos con materias primas de origen mineral (Lavandaio, 2008).

La corteza terrestre se encuentra formada por minerales de todo tipo, pero solo en ciertos lugares estos elementos son concentrados y por su volumen, es posible las explotaciones por su valor económico y los recursos que pueden ser considerados explotables, son aquellos que se encuentran en los cuerpos geológicos denominados yacimientos o depósitos minerales de los cuales se puede extraer uno o más minerales para su comercialización (Coll *et al.*, 2002).

La exploración minera tiene una serie de actividades para poder ser realizada, como son los estudios geológicos y geofísicos del terreno, para localizar el mineral, a partir de la exploración se valoran las reservas minerales con base a las características físico-químicas del yacimiento y el terreno, se determina el costo-beneficio de tal modo que sea sustentable para el desarrollo de la mina y se analiza la infraestructura requerida, suministro de agua, energía eléctrica, combustible, vías de transporte, comunicación y estudios de impacto ambiental de acuerdo con la legislación vigente (INEGI, 2009).

### **2.3. Normatividad en exploración minera**

La minería cuenta con normas aplicadas a procesos, manejo de desechos y confinamiento de los mismos en materia de protección ambiental que son:

NOM-120-SEMARNAT-2011, que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera, en zonas agrícolas, ganaderas o ejidales, en zonas con climas secos y templados, donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos. De acuerdo al artículo 4.1.18 se menciona que posterior a los trabajos de beneficio y que el proyecto minero sea abandonado, el responsable del proyecto deberá aplicar el programa de restauración que contemple acciones tales como la estabilización de taludes, relleno de pozos de exploración, relleno de zanjas, la inhabilitación de caminos nuevos y la restauración forestal. El programa deberá contener el calendario de actividades,

incluyendo las de mantenimiento, sitios a restaurar y como medida de compensación se deberá restaurar alguna área vecina.

NOM-141-SEMARNAT-2003, establece el procedimiento para caracterizar los residuos mineros, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales. Es importante la aplicación de esta norma debido a que los residuos mineros, por sus características tóxicas, determinadas por su composición u oxidación y por su forma de manejo, pueden representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general, por lo que es necesario establecer los criterios y procedimientos para su correcta disposición.

NOM-157-SEMARNAT-2009, establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. La generación de residuos de mineral procesado, pueden contener elementos potencialmente peligrosos y representar un alto riesgo a la población, al ambiente o a los recursos naturales.

Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR):

Regula los residuos desde una perspectiva de protección al ambiente y a la salud, establece las bases para prevenir la contaminación de sitios por residuos peligrosos y llevar a cabo su remediación. En particular, esta Ley establece que es de competencia federal la expedición de reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones jurídicas para regular el manejo de los residuos de la industria minero-metalúrgica, los cuales en su artículo 17 se definen como: “los provenientes del minado y tratamiento de minerales tales como residuos mineros, residuos de los patios de lixiviación abandonados, así como los metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y transformación de metales, que se definirán en forma genérica en el reglamento según lo estipulado en el artículo 7 fracción III de esta ley, son de regulación y competencia federal. Podrán disponerse finalmente en el sitio de su generación; su peligrosidad y manejo integral, se determinará conforme a las normas oficiales mexicanas aplicables, y estarán sujetos a los planes de manejo previstos en esta

Ley”. De igual manera los residuos de las rocas o productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, y no provengan de trabajos subterráneos, son considerados residuos de manejo especial, siendo las Entidades Federativas las competentes para su regulación (LGPGIR, 2003).

#### **2.4. Procesos de un proyecto minero**

De acuerdo a Carvajal (2008), los principales procesos que componen el proyecto minero son:

- **Prospección:** el objetivo es lograr un conocimiento general del área de interés, se analiza las anomalías geológicas donde puede existir un depósito mineral, las técnicas más usadas son la geología regional, mapas, minas antiguas y presentes, geoquímica y geofísica, fotografías aéreas e imágenes de satélite.
- **Exploración:** se pretende un conocimiento más detallado del depósito mineral, consiste en delimitar las dimensiones exactas y cantidades aproximadas del depósito mineral, para determinar su valor. Son aplicados los muestreos de túneles, zanjas, caminos. Se debe hacer un estudio pre-factibilidad para tomar la decisión de seguir adelante con el proyecto.
- **Evaluación del proyecto:** se realiza un estudio técnico-económico o de factibilidad del proyecto. Las principales actividades de esta evaluación son: selección del tamaño de la mina y la planta; selección del método de explotación y procesamiento; determinación de las reservas (recursos económicamente explotables); plan minero (desarrollo, extracción y producción); determinación del equipamiento e infraestructura; determinación de inversiones; determinación de costos de operación y comercialización; aspectos legales (propiedad, agua, energía, accesos, etc.); aspectos sociales; estudio de Impacto ambiental (EIA), el EIA debe demostrar a la autoridad que las operaciones que se realizarán no alteran el entorno y que los residuos que se produzcan, no contengan elementos nocivos más allá de los permitidos.

- **Desarrollo y construcción:** consiste en los trabajos previos que se realizan en la mina para llegar al mineral desde la superficie y asegurar la alimentación sostenida del mineral a la planta de proceso. Se realiza la etapa de Construcción, destinada a establecer las instalaciones para la extracción, procesamiento, transporte, abastecimiento energético y acceso vial (camino, vías férreas, puertos, aeropuertos) al yacimiento.
- **Producción o explotación:** Los principales procesos que componen esta etapa son: Extracción del mineral; procesamiento, reducción de tamaño por métodos físicos para liberar las partículas metálicas desde la roca; aumento de la concentración de los metales por métodos físico-químicos; fundición y refinación separación de los metales contenidos en los concentrados; purificación de los metales producto de la fundición, para su transformación industrial.
- **Cierre:** es la preparación y ejecución de actividades necesarias (desde el inicio de las operaciones) para restaurar las áreas afectadas por la explotación. Algunas medidas correctivas son el desmantelamiento de instalaciones, compactación del terreno, reforestación, monitoreo y tratamiento de efluentes de la mina.

## **2.5. Efectos ambientales de las operaciones mineras**

De acuerdo a la Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (2002), los daños al ambiente derivados de la acción minera son:

- **Desechos mineros:** Una de las consideraciones ambientales más importantes en cualquier mina es cómo manejar estos grandes volúmenes de desecho de modo de reducir al mínimo los impactos a largo plazo y maximizar cualquier beneficio a largo plazo. Cuando estas operaciones ocupan tierras que previamente eran productivas como hábitat de vida natural, tierras de cultivos, etc., puede pasar un tiempo muy largo antes de que vuelva a alcanzar el nivel anterior de productividad si no son rehabilitadas de manera apropiada.
- **Eliminación en el Suelo:** el lugar más común para eliminar el desecho minero es el suelo. Para esto se utilizan una diversidad de métodos que dependen, entre

otros aspectos, del tipo de desecho. Las consideraciones más importantes son producir laderas estables y controlar el flujo de agua en y alrededor de los desechos para reducir al mínimo la erosión, proteger la estructura e intentar prevenir la infiltración. El problema más frecuente relacionado con los cerros de desecho es el drenaje de ácido.

- Relaves: son roca finamente molida desde la cual los valores minerales deseados han sido extraídos mediante el uso de reactivos químicos. Este residuo toma la forma de una solución acuosa compuesta al menos en un 50% de agua y puede ser transportada a través de cañerías. Por lo general son vaciados en instalaciones de almacenamiento donde son retenidos en estanques o diques contruidos con los mismos relaves, desechos de minas rellenos de tierra o roca.
- Mineral Residual de la Pila de Lixiviación: Aquí el mineral triturado es colocado sobre una plataforma de tuberías perforadas e irrigado con el reactivo apropiado cianuro en caso del oro y plata y ácido sulfúrico en el caso del cobre o uranio, para separar el excedente de roca del mineral.
- Drenaje ácido: se produce en muchas regiones mineras importantes, en especial en aquellas en que ocurren precipitaciones templadas, y a las pilas de minerales de están expuestos, algunos minerales como el sulfuro de hierro reaccionan al oxígeno y el agua, creando estos drenajes ácidos.

Con la modernización de los procesos mineros para un trabajo más eficiente y en menor tiempo, ha generado problemas, debido a la generación de grandes cantidades de residuos derivados de la obtención de los minerales, por lo que en México la industria minera ha generado gran cantidad de desechos y dejado muchos sitios contaminados en variadas zonas del país (Sánchez, 2014).

Debido a que la minería lleva a cabo procesos fisicoquímicos que repercuten significativamente al medio ambiente, es importante que sea aplicado el marco legal de manera eficiente, garantizando el aprovechamiento adecuado de los recursos minerales, en conjunto con procesos de mitigación al ambiente que prevengan futuros impactos, reduciendo en gran medida los daños al ecosistema (Elizondo, 2016).

En zonas desérticas donde se lleva a cabo la minería, se cuenta con cantidades disponibles de aguas subterráneas muchas veces a gran profundidad que han recorrido largas distancias desde su fuente de origen en las montañas. Estas aguas usualmente se pueden valorizar bajo condiciones de escasez, siempre que se permita a los mercados operar libremente. El agua también puede ser llevada desde lugares a muchos kilómetros de las minas, para abastecer las diversas necesidades de procesamiento de minerales, tales desviaciones son la causa de competencia con otros sectores por este recurso natural, posiblemente reduciendo los suministros a pueblos, ciudades y grupos indígenas. Además, pueden crear impactos negativos en lagos o salares debido a la reducción de los niveles de agua, o dañar la flora y fauna silvestre local (Moran, 2001).

## **2.6. Remediación de los sitios mineros**

La minería consta de un gran trabajo, ya que después de proceder a la extracción de los recursos minerales, si no hay una restauración, los terrenos abandonados quedan en una situación de degradación sin posibilidades de aprovechamiento. Por lo que es necesario reacondicionar los terrenos afectados para alcanzar un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación de la naturaleza, el reacondicionamiento de esos terrenos puede ir desde la restauración total del terreno, independientemente del uso previsto para los terrenos afectados por las labores mineras, se deben seguir los siguientes puntos para una rehabilitación del ambiente adecuado: la restauración de la producción biológica del suelo; la reducción y control de la erosión; la estabilización de los terrenos sin consolidar; la protección de los recursos hídricos y la integración paisajística (Instituto Tecnológico GoMinero de España, 1989).

Por lo que la restauración tiene como objetivo proteger la salud Humana y la seguridad ambiental, la reconstrucción de ecosistemas degradados recuperando en la medida posible el suelo y agua, así como crear sistemas resilientes que puedan tolerar altas concentraciones de contaminantes en el ambiente; restaurar los terrenos contaminados, rediseñando los depósitos de jal y la cobertura para

los mismos (Figura 1); por ultimo dejar los sitios si es posible en condiciones equivalentes a las que había antes de la minería.

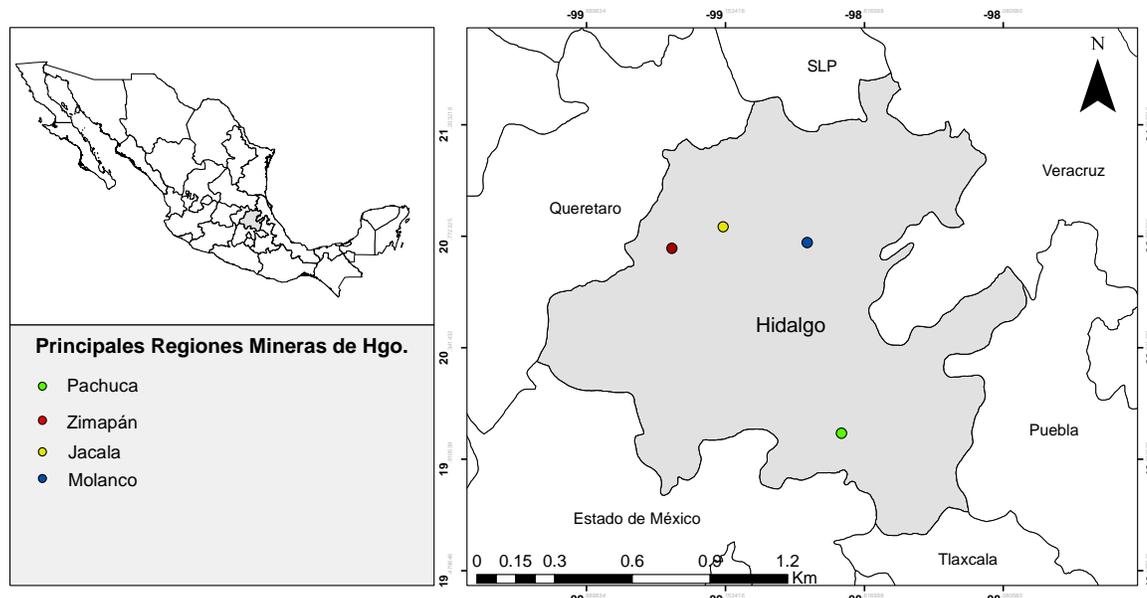


**Figura 1.** Ejemplo de restauración para escombrera o depósito de jal.  
Fuente: Oyarsun *et al.*, (2011).

## 2.7. Minería de Zimapán, Hidalgo

El estado de hidalgo está constituido por ochenta y cuatro municipios, de los cuales Zimapán es el más grande, se localiza a 144 kilómetros de Pachuca, entre los paralelos 20° 44' de latitud norte y 99° 23' de longitud oeste, a una altura de 1,780 metros sobre el nivel del mar. Sus colindancias son: Al norte, con los municipios de Pacula y Jacala; al sur, con los de Tecozautla y Tasquillo; al este, con los de Nicolás Flores e Ixmiquilpan y al oeste, con el Estado de Querétaro. Sus principales comunidades son: Xaha, Aguas Blancas, Xitha, el Cerrote, Morelos, Encarnación y Durango (Gobierno del estado de Hidalgo, 2018).

El clima en la región de Zimapán es generalmente árido/semiárido, con temperaturas promedio de 21° C y precipitaciones media anuales de 1,020 mm y con vegetación compuesta por arbustos de tipo matorral, como leguminosas, cactáceas, agaves, euforbiáceas, *Acacia* y *Prosopis* (Learita,2015)



**Figura 2.** Principales regiones mineras en Hidalgo.  
Fuente: Elaboración propia

Hidalgo se ha caracterizado por ser una entidad minera con un historial de 500 años de minería, es una de las entidades federativas más importantes en el desarrollo minero de México. La ciudad de Pachuca, capital del estado, es una de las más antiguas del país y fue fundada a partir de la actividad minera que se desarrolló en sus cercanías. Actualmente el estado es un importante productor de manganeso en el país y ocupa el primer lugar en la producción y en menor proporción la extracción de oro, plata, plomo y zinc, estos últimos se han incrementado sus extracciones durante el 2016 (SGM, 2017)

Los antecedentes de minería en Hidalgo muestran que los habitantes nativos explotaban minerales metálicos y no metálicos, por lo que remonta a muchos años atrás esta actividad de la zona (Elizondo, 2016).

El distrito minero de Zimapán comenzó con el descubrimiento de minerales oxidados en el área El Carrizal, desarrollando la mina Lomo de Toro, la cual inicio la historia minera de Zimapán en el año de 1632, con Don Lorenzo de Labra como personaje central (SGM, 2017).

### **2.7.1. Importancia de las actividades mineras de Zimapán**

Para el estado de Hidalgo, la minería es una actividad que tiene un gran aporte económico, ya que se produce una importante cantidad del total del mineral de país, entre los metales producidos se encuentran: magnesio, cadmio, oro, plata, cobre, plomo y zinc, así mismo, algunos minerales no metálicos como las arcillas, gravas, calcita, caolinita y caliza, también es productor de yeso, dolomita, piedra pómez y mármol, aunque a menor escala (SGM, 2017)

En el distrito minero de Zimapán la principal fuente de ingresos en el municipio es generada por la minería y los minerales producidos son: plata, zinc, plomo oro y minerales no metálicos como wollastonita, fosforita, fluoroapatita y mármol (SGM, 2017).

### **2.7.2. Problemas ambientales en Zimapán Hidalgo**

La principal problemática asociada a la minería, es la generación de residuos mineros, los cuales son susceptibles a su dispersión provocada por el viento a las zonas aledañas de los depósitos (Elizondo, 2016).



**Figura 3.** Depósito de residuos mineros de Zimapán (Fotografía: V. Pérez).

Los principales contaminantes que se pueden encontrar en sitios cercanos a minas, son el cobre, cadmio, arsénico, plomo entre otros, los cuales en altas concentraciones tienen efectos tóxicos y que son considerados contaminantes capaces de modificar el ambiente en el que se encuentran (Elizondo, 2016).



**Figura 4.** Viviendas en las cercanías de los depósitos de residuos mineros de Zimapán (Fotografía: V. Pérez).

Los residuos mineros de Zimapán tienen una composición de minerales secundarios de Fe como lepidocrocita, jarosita, rosenita y beundantila, estos minerales secundarios indican que el proceso de oxidación/neutralización ha sido intenso y se ve reflejado en la presencia de Fe, As, y Pb que forman parte de los minerales identificados, también es estos residuos mineros se puede encontrar pirita, que cuya oxidación puede generar una gran acidez, lo que implica que estos residuos aún podrían seguirse oxidando y generando acidez en la zona (Romero, *et al.*, 2008).



**Figura 5.** Depósito de residuos mineros de Zimapán en estado de oxidación (Fotografía: V. Pérez).



**Figura 6.** Lixiviado ácido derivado de los residuos de mina de Zimapán (Fotografía: V. Pérez)

## **2.8. Movilidad de los contaminantes de residuos de mina**

Los metales o metaloides contenidos en los residuos mineros se pueden movilizar o lixiviar al ambiente, esto se determina mediante ciertas propiedades fisicoquímicas, como puede ser el pH, la conductividad eléctrica, la concentración de metales, la materia orgánica, entre otros (Learita, 2015).

La movilidad de los metales aumenta con un pH bajo, por lo que la acidificación del suelo es uno de los factores que permite una mayor concentración de metales y su disponibilidad a ser absorbidos por la vegetación, lo cual limita la actividad biológica del suelo y los ciclos bioquímicos (Learita, 2015).

Las compañías mineras llegan a producir grandes cantidades de residuos, como son lixiviados de la obtención de los minerales, residuos de roca y los residuos de mina. Los residuos mineros contienen altas concentraciones de sulfuros metálicos que no fueron extraídos durante el proceso de producción (Ortiz *et al.*, 2007).

Los metales tienden a acumularse en la superficie de los residuos de mina, siendo accesibles a la absorción de la vegetación que logra establecerse en estos depósitos, así como también se pueden reducir lentamente mediante su lixiviación (Puga *et al.*, 2006).

### **2.8.1. Riesgos para los suelos**

Porta *et al.*, (2003) menciona que los efectos desfavorables de los contaminantes en el suelo como sistema pueden ser:

- Destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales, al haberse superado la capacidad de aceptación del suelo. Se ve afectado el ciclo biogeoquímico y la función de biofiltro.
- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento normal de los microorganismos del suelo, o bien alteración de su diversidad, lo que hace aumentar la fragilidad del sistema.

- Disminución del rendimiento de los cultivos con posibles cambios en la composición de los productos, con riesgo para la salud de los consumidores, al entrar determinados elementos en la cadena trófica.
- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.
- Disminución de las funciones de soporte de actividades de ocio. Los espacios contaminados presentan problemas de salubridad para los usuarios.

### **2.8.2. Plomo y cobre en residuos de mina y su afectación en las plantas**

Los efectos de la toxicidad por metales pesados en las plantas se ven reflejados directamente en el estrés oxidativo, lo que causa daños en las estructuras celulares, clorosis, inhibición del crecimiento de la planta y muerte de las plantas (Yadav, 2010).

El plomo en las plantas afecta su morfología, el crecimiento y la fotosíntesis, altos niveles de plomo generan un desequilibrio hídrico, alteraciones en la permeabilidad de la membrana y desequilibrio en la nutrición mineral (Yadav, 2010).

El cobre es uno de los micronutrientes esenciales para las plantas, es importante para la asimilación de CO<sub>2</sub> y la síntesis de ATP, pero en altas concentraciones se vuelve tóxico para las plantas, ocasionando disturbios en las vías metabólicas, un crecimiento retardado y clorosis de las hojas (Yadav, 2010).

Algunos daños fisiológicos comunes derivados de la toxicidad por metales pesados en las plantas son: reducción de la biomasa, clorosis foliar, enrollamiento de las hojas y necrosis, inhibición del crecimiento de raíces, número limitado de semillas, alteraciones morfológicas y eventualmente la muerte (DalCarso *et al.*, 2014).

## **2.9. Fitorremediación aplicada a residuos de mina**

La minería genera una gran cantidad de residuos pétreos y lodos ricos en metales pesados que son depositados en la superficie del entorno minero y el suelo original de la mina se degrada o se pierde irreversiblemente, el cual sufre un grave impacto durante la explotación minera, siendo inestable, y conformado por materiales poco aptos para el desarrollo de las actividades biológicas y los procesos formadores de suelo, incluso después del término de la actividad industrial, estas condiciones adversas persisten durante mucho tiempo por el bajo nivel de materia orgánica y nutrientes, elevada y periódica erosión, gran fluctuación de temperatura superficial, sequía, condiciones de pH, etc., sin olvidar el elevado nivel de metales presentes en el substrato (Becerril *et al.*, 2007).

Una consecuencia importante en el suelo, es la ausencia de vegetación o la pérdida de su productividad, la disminución de la biodiversidad e indirectamente la contaminación del aire, y aguas superficiales y subterráneas (Wong, 2003). Sin embargo, las poblaciones de una gran variedad de especies de plantas son capaces de colonizar estos suelos degradados por actividades mineras, son las especies metalofitas, son plantas que han desarrollado mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en suelos con altos niveles de metales y, por ello, son endémicas de suelos con afloramientos naturales de minerales metálicos (Becerril *et al.*, 2007).

Existen diversas tecnologías que han sido aplicadas para la recuperación de zonas contaminadas como son el lavado de suelos, evaporación, oxidación, reducción y extracción química, pero estas son técnicas sumamente costosas para su aplicación (Yao *et al.*, 2012).

La fitorremediación supone el uso de las plantas para eliminar o reducir la toxicidad de los contaminantes del medio ambiente, las tecnologías principales para la Fitorremediación de metales son: 1) la Fitoextracción, mediante el uso de plantas para extraer los metales del suelo, trasportarlos y acumularlos en los órganos de la parte aérea, 2) Fitoestabilización, con el uso de plantas para

minimizar la movilidad de los metales mediante su acumulación en la raíz o su precipitación en la rizosfera (Becerril *et al.*, 2007).

Con lo cual es aprovechada para usar los mecanismos de las plantas, permitiendo el desarrollo y adaptación al medio contaminado por metales pesados, llegando a ser tolerantes a estos metales, algunas plantas poseen mecanismos que permiten ya sea el eliminar, inmovilizar, volatilizar, concentrar o degradar los contaminantes, volviéndose resistentes a la toxicidad del medio, sobreviviendo a las condiciones de los residuos de mina (Ali *et al.*, 2013).

La Fitorremediación no genera ningún efecto negativo en la zona en la que se aplica, al contrario, las plantas usadas reestructuran el suelo mediante el desarrollo de la actividad microbiana, aportan nutrientes en forma de materia orgánica, así como la mayoría de las plantas controlan la erosión del suelo, minimizando la dispersión de los contaminantes (Bell *et al.*, 2014).

Es importante que, al momento de elegir las especies de plantas para esta técnica, siempre sean plantas nativas que ya se han adaptado a la contaminación de la zona, también se debe evitar que estas plantas sean consumidas por los herbívoros, para que los metales no se incorporen a la cadena trófica (Lei y Duan, 2008; Saad *et al.*, 2009).

En México se han realizado diversos estudios para determinar la capacidad de las plantas para remediar, tolerar y adaptarse a la contaminación: Flores *et al.* (2003) reportaron que en residuos de mina de chihuahua a *Brickellia veronicifolia* y *Baccharis salicifolia* creciendo en suelos contaminados por arsénico. Armienta *et al.*, (2008) registró *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana* en suelos ricos con arsénico en Zimapán, Hidalgo.

## **2.10. Mezquite, descripción y usos**

De acuerdo al Sistema nacional de información forestal (2018), *Prosopis laevigata*, es conocida comúnmente como mezquite, tiene su origen en el norte

de Sudamérica (Venezuela y Colombia), Panamá, Centroamérica hasta México y las Antillas.

Es un árbol que va desde los 13 m de altura y con un diámetro normal de hasta 80 cm, pero generalmente menor, la época de floración inicia en febrero a marzo y termina de abril a mayo, por lo que la floración coincide con el renuevo de los foliolos y la fructificación ocurre en los meses de junio a julio.

Se encuentran principalmente en la vertiente del pacífico desde Michoacán hasta Oaxaca y en la del Golfo de México en Nuevo León, Tamaulipas, y el norte de Veracruz y en las regiones centrales de altura del país hasta los 2,300 m. es más predominante en San Luis Potosí, Guanajuato, Zacatecas, Durango, Coahuila y en Hidalgo.

El mezquite es considerado un recurso natural importante para las zonas áridas y semiáridas, debido a los diferentes usos que este posee, como son: alimento para el ganado (hojas y vainas), alimentación humana en forma de harinas, bebidas fermentadas y en vainas. De la corteza se extraen curtientes, la madera es utilizada para duela, madera aserrada, mangos de herramientas, hormas para zapatos en escala industrial, gomas y taninos. En la medicina tradicional se utiliza como vomitivo y purgante, la resina se ha empleado para la curación de disentería y algunas afecciones de los ojos. La madera también se utiliza para leña y para obtener carbón de excelente calidad por su alto poder calorífico.

Diversos estudios aplicados al mezquite han indicado que también tiene un uso potencial como especie fitorremediadora, siendo capaz de absorber metales como el Pb, Cu, As, Ni, entre otros. Por ejemplo, Armienta *et al.*, (2008), estudiaron la capacidad del mezquite para absorber As, en el cual menciona que la especie tiene la capacidad de absorber desde la raíz, transportar y acumular el As en la planta. También Buendía *et al.*, (2010), estudiaron la acumulación de plomo y níquel en plántulas de mezquite, en el cual determinaron el crecimiento, sobrevivencia y acumulación de los metales, también evaluaron la capacidad de acumulación de la especie, reportando que el Pb y en Ni no detuvieron la

germinación de las plántulas de mezquite, pero si presentaron menor crecimiento, con menos hojas y raíces secundarias; de igual forma sus resultados indicaron que la especie llevó a cabo una significativa translocación de las raíces a la parte aérea, indicando que el mezquite es una especie prometedora para ser usada como fitorremediadora de sitios contaminados por metales pesados.

## **Capítulo III BIODISPONIBILIDAD Y ACUMULACIÓN DE PLOMO Y COBRE EN *Prosopis laevigata* ESTABLECIDA EN DEPÓSITOS MINEROS**

### **Lead and copper bioavailability and accumulation in *Prosopis laevigata* established in mine deposits**

1Victoria Sabrina Pérez Hernández, 1\*Elizabeth Hernández-Acosta, 2Victor Manuel Duarte Zaragoza y 1Antonio Villanueva Morales

1División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo, DICIFO, Km 38.5 carretera México - Texcoco, Estado de México, CP 56230

2División de Ingeniería Ambiental. Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México, Paraje San Isidro s/n Barrio de Tecamachalco, La Paz C.P.56400

\*Autor de correspondencia: elizahac@yahoo.com.mx

### **3.1. RESUMEN**

Los depósitos mineros presentan alto contenido de metales pesados que, al dispersarse por el viento y la lluvia, contaminan el suelo y el agua, una opción ecológica y rentable para disminuir estos problemas es el establecimiento de cubiertas vegetales. Este proyecto evaluó el potencial de *Prosopis laevigata* para estabilizar el plomo y cobre contenido en tres depósitos mineros (Santa María I, Santa María II y San Juan) de Zimapán, Hidalgo, México. Se colectaron muestras simples de residuo de mina en cada uno de los depósitos, para obtener una muestra compuesta y evaluar de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 las variables textura, porcentaje de partículas del suelo, color del suelo, pH, contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio

catiónico y concentración de plomo y cobre. Se muestrearon hojas de tres individuos de *Prosopis laevigata* por depósito minero. La concentración de plomo y cobre en los residuos de mina y en las hojas se determinó por Espectrofotometría de Absorción Atómica. Los depósitos mineros presentaron pH ácidos y neutros, arenas, bajo contenido de materia orgánica y de capacidad de intercambio catiónico. El depósito San Juan tuvo la mayor concentración de plomo (19.70 mg kg<sup>-1</sup>) y cobre (79.34 mg kg<sup>-1</sup>) en los residuos de mina y en hojas de *Prosopis laevigata* plomo (93.05 mg kg<sup>-1</sup> y cobre 52.46 mg kg<sup>-1</sup>). El Factor de Bioacumulación en la especie fue de 7.35 en Plomo y 1.30 para cobre. Se propone a *Prosopis laevigata* en programas de fitoestabilización de sitios contaminados con plomo y cobre.

Palabras clave: Minería, toxicidad, metales, contaminación, Plantas

### **3.2. ABSTRACT**

Mining deposits have a high content of heavy metals that, when dispersed by wind and rain, pollute the soil and water, an ecological and profitable option to reduce these problems is the establishment of vegetation cover. This project evaluated the potential of *Prosopis laevigata* to stabilize lead and copper contained in three mining deposits (Santa Maria I, Santa Maria II and San Juan) of Zimapán, Hidalgo, Mexico. Simple samples of mine waste were collected in each of the deposits, to obtain a composite sample and evaluate according to NOM-021-SEMARNAT-2000 the variables texture, percentage of soil particles, soil color, pH, content of organic matter, electrical conductivity, capacity of cation exchange and concentration of lead and copper. Samples of three individuals of *Prosopis laevigata* were sampled per mine deposit. The concentration of lead and copper in the residues of the mine and in the leaves, was determined by Atomic Absorption Spectrophotometry. The mining deposits presented acid and neutral pH, sands, low content of organic matter and capacity of cation exchange. The deposit San Juan had the highest concentration of lead (19.70 mg kg<sup>-1</sup>) and copper (79.34 mg kg<sup>-1</sup>) in the residues of mine and leaves of *Prosopis laevigata* lead (93.05 mg kg<sup>-1</sup> and copper 52.46 mg kg<sup>-1</sup>). The Bioaccumulation Factor

in the species was 7.35 in Lead and 1.30 in copper. *Prosopis laevigata* is proposed in phytostabilization programs for sites contaminated with lead and copper.

Key words: Mining, toxicity, metals, pollution, plants

### **3.3. INTRODUCCIÓN**

La minería, es una actividad que provee materia prima para la producción de artículos utilizados en la vida diaria; no obstante, a pesar de las normas y leyes (NOM-120-SEMARNAT-2011, la NOM-157-SEMARNAT-2009 y la LGPGIR (2003)), que regulan la emisión de contaminantes derivados de la minería, aún existen decenas de depósitos de residuos sin el manejo adecuado para minimizar los daños ambientales que esta actividad ocasiona (Méndez-Ramírez y Armienta, 2012).

Después de una explotación minera, los sitios quedan afectados al alojar los residuos, porque tiene ausencia o baja presencia de la estructura edáfica, bajo contenido de nutrientes, baja retención de agua y presencia de compuestos tóxicos como el cadmio, plomo y zinc (Puga et al. 2006a); lo anterior los hace no aptos para el desarrollo de la cubierta vegetal. Es común ver en depósitos mineros crecimiento de vegetación por manchones o pequeñas islas con plantas, esto debido a factores climatológicos, movimiento del agua contenida en los depósitos y a la lixiviación de las sales.

En los depósitos mineros establecidos en zonas áridas con alta precipitación, el escurrimiento superficial del drenaje ácido y la dispersión de partículas por el viento son factores de riesgo ambiental y de salud pública (Romero et al. 2008, Covarrubias y Peña 2017); Para solucionar dichos problemas, en los últimos años se investiga el uso de plantas tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados.

*Acacia farnesiana*, *Acacia macracantha*, *Acacia visco*, *Buddleja coriacea*, *Eucalyptus globulus*, *Myoporum laetum*, *Polylepis racemosa*, *Prosopis laevigata* y *Schinus molle*; son especies que responden eficientemente en la

fitoestabilización de sitios contaminados con metales pesados (Paredes 2015, Blaz y Rodríguez 2015, Landeros et al. 2011).

*Prosopis leavigata*, es un árbol que crece en los depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, se establece en pequeñas islas de vegetación, en donde juega un papel ecológico importante, porque evita la dispersión de partículas y la liberación de altas concentraciones de metales pesados.

En la presente investigación se evaluó la capacidad de *Prosopis laevigata* establecida de manera natural en depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, como planta fitoestabilizadora, para proponerla en programas de recuperación de sitios contaminados con metales pesados.

#### **3.4. MATERIALES Y METODOS**

Zona de estudio. La investigación se realizó en los depósitos mineros ubicados el municipio de Zimapán, Hidalgo a 144 kilómetros de la ciudad de Pachuca, entre las coordenadas 20° 44´ latitud N y 99° 23´ longitud O (Figura 1). Limita al norte con los municipios de Pacula y Jacala; al sur con los de Tecozautla y Tasquillo; al este con los de Nicolás Flores e Ixmiquilpan y al oeste con el Estado de Querétaro.

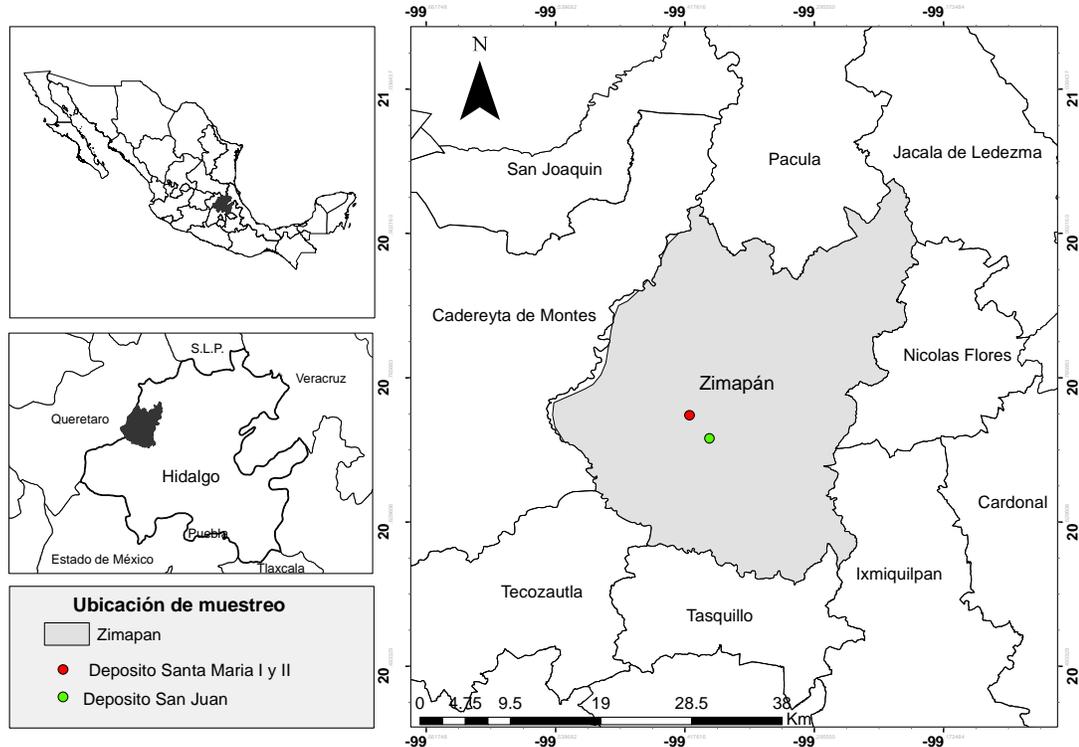


Figura 7. Localización de los depósitos de mina estudiados. Fuente: Victoria Pérez H, 2018.

El 39 % del estado presenta clima seco y semi-seco, el 33 % templado subhúmedo el 16 % cálido húmedo, 6 % cálido subhúmedo y el restante 6 % templado húmedo, estos últimos se presentan en la zona de la huasteca. La temperatura media anual es de 16 °C y la temperatura mínima, es cerca de 4 °C y la máxima de 27 °C en promedio. La lluvia se presenta en verano de junio a septiembre, la precipitación media al año es de 800 mm. El clima seco y semi-seco favorece el crecimiento de plantas cactáceas como el maguey pulquero, tuna y nopal (INEGI 2011).

Muestreo de los depósitos mineros y de plantas. Para el muestreo se siguieron las recomendaciones de la NMX-AA-132-SCFI-2006, de las cuales se realizó un muestreo aleatorio superficial en tres depósitos mineros. 1) El depósito Santa María I se ubica a 20° 44' latitud N y 99° 24' O, con 40 años en el lugar, con una superficie de 2.1048 ha, en este espacio se colectaron para su análisis 14 submuestras; 2) El depósito Santa María II se ubica a 20° 44' latitud N y 99° 23' O, tiene 30 años de establecimiento y un área de 3.3584 ha, se obtuvieron 16

submuestras y 3) El depósito San Juan se localiza a 20° 43' latitud N y 99° 23' O, con 60 años en el lugar, y una superficie de 1.0464 ha, donde se colectaron 12 submuestras de aproximadamente 1 kg cada una, de las muestras obtenidas por depósito se formó una muestra compuesta para su análisis (Figura 1).

En cada uno de los depósitos se colectaron muestras de follaje de tres ejemplares de *Prosopis laevigata* de aproximadamente 2.50 m de altura cada uno, las cuales se trasladaron al laboratorio en bolsas de papel. El material vegetal se secó en una estufa a 85 °C por 7 h, después se molieron y se tamizaron a través de una malla de acero inoxidable con apertura de 500 µm para su análisis.

Análisis físicos y químicos de las muestras de los depósitos mineros y muestras vegetales. En laboratorio, las muestras de residuo de mina se secaron a temperatura ambiente y a la sombra. Una vez eliminada la humedad, éstas se tamizaron con malla número 10. La textura se determinó por el método de Bouyucos; mientras que la capacidad de intercambio catiónico por el método acetato de amonio 1N a pH 7.0 (NOM-021-SEMARNAT-2000). El porcentaje de materia orgánica se obtuvo por el método de Walkley & Black (Castellanos 2000). El pH se determinó por potenciometría, en una relación suelo: agua (1:2); posteriormente, las mismas muestras se dejaron reposar durante 20 h y se midió la conductividad eléctrica (CE) por conductivimetría. El fósforo asimilable se determinó con el método Bray 1 en una relación solución: suelo (1:8) (Bray 1945). También se determinó la concentración extractable de plomo y cobre estos se extrajeron con DTPA a 0.005 M (ácido dietilentriaminopentaacético) relación solución: suelo (1:4) (Berrow y Mitchell 1980), y se determinaron en el espectrofotómetro de absorción atómica, marca GBC, modelo SAVANTAA SIGMA.

Para analizar las muestras vegetales, se cortaron las hojas del tallo para su secado, después se incorporaron a un matraz bola para realizar la digestión de la muestra, empleando una mezcla diácida HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (4:1:1). La determinación de Pb y Cu se realizó por (EAA).

Factor de bioconcentración (FBC) en las muestras vegetales. El FBC se utiliza para determinar la eficiencia de la planta como acumuladora de metales pesados provenientes del suelo o residuo en el que se establecen, se calculó de la siguiente manera: En la ecuación 1 se presenta la expresión matemática para calcular el FBC: 
$$FBC = \frac{CMt}{CMs}$$
 Ecuación 1

Donde CMt representa la concentración de metal determinada en el follaje de *Prosopis laevigata*; mientras que CMs, representa la concentración biodisponible de metal en el suelo (Covarrubias y Peña 2017).

Análisis estadístico de los resultados. Para el análisis estadístico de los datos obtenidos en las muestras de los depósitos mineros y muestras vegetales, se utilizó el paquete SAS v9.4, para la estadística descriptiva y análisis de varianza (ANDEVA), usando un Modelo Lineal Generalizado (GLM); además se realizaron pruebas de comparación de medias de Tukey.

### **3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **Propiedades físicas y químicas en los depósitos de mina**

**Textura, CIC y Color.** La textura de los depósitos mineros Santa María I y San Juan fue Franco arenosa, mientras que en Santa María II fue Arenosa, donde las partículas de arena prevalecieron (Tabla 1). En suelos donde se presentan dichas texturas y partículas, la entrada y la infiltración de los metales pesados se afecta, en general, dichos elementos tienen menor capacidad de fijación (Peña y Beltrán 2012). En este estudio en el depósito Santa María II, para plomo y cobre, existió baja capacidad de fijación, lo anterior se supo al obtener los valores de Capacidad de Intercambio Catiónico, mismos que fueron bajos (Tabla 1).

Tabla 1. Clase textural de los depósitos de residuos de mina

Depósito	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura	CIC Cmol (+)	Tabla Munsell
Santa María I	76.06	20.9	3.04	Franco Arenosa	6.80	Hue 5 YR 5/1 Brownish gray
Santa María II	96.26	1.1	2.64	Arenosa	3.33	Hue 5PB 7/1 light bluish gray
San Juan	57.76	38.3	3.94	Franco Arenosa	9.10	Hue 5YR 7/6 Orange

Para la CIC el depósito Santa María I presento 6.8 Cmol (+) kg-1 de CIC, mientras que, en Santa María II fue de 3.3 Cmol (+) kg-1 y en San Juan de 9.1 Cmol (+) kg-1, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 el depósito Santa María I y San Juan tienen un CIC Bajo, mientras que Santa María II es Muy bajo, la norma indica que una reserva adecuada es cuando el CIC es mayor de 25 Cmol (+) kg-1. Este parámetro es muy importante puesto que controla la disponibilidad de nutrientes en el suelo, condiciona su estructura y la estabilidad de los agregados, así como controla la retención de contaminantes (Oyarzún et al. 2011).

Resultados similares obtuvieron Bautista et al. (2016) en el estudio de residuos de mina de Pachuca, Hidalgo, encontraron una textura Franco Arenosa. Mientras que Puga et al. (2006b) en el estudio de contaminación por metales pesados de la industria minera en Chihuahua, en el sitio reportaron una textura arcillo-limosa y el plomo presento una asociación a esta, lo cual ocasiono una mayor retención y acumulación del metal debido a las arcillas. Al respecto Peña y Beltrán (2012) indican que en general, a mayor contenido de arcilla en un suelo, mayor será la capacidad de intercambio catiónico, situación que no ocurrió en el presente estudio. Se ubicó que la clase textural de los depósitos mineros, es un indicador de la presencia de metales como el plomo y el cobre, así como de sus concentraciones.

En cuanto al color de los tres depósitos mineros, Santa María I y Santa María II presentan tonos grisáceos, mientras que San Juan un tono naranja. Así, Pérez-

Martínez y Romero (2015) citan que el color gris indica que los jales mineros están inalterados, y que predominan los minerales primarios cuarzo, calcita, galena, arsenopirita y feldespato. Moreno et al. (2009) realizó un estudio previo al presente trabajo, en los mismos depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, que aquí se exponen; los investigadores reportan que dichos depósitos mineros contienen los minerales cuarzo, galena y arsenopirita, por lo que coincide con lo que citan Pérez-Martínez y Romero (2015).

El color también indica la oxidación de sulfuros metálicos, Ramos-Arrollo y Siebe-Grabach (2006) señalan que los óxidos de hierro se aprecian por tonalidades amarillas, anaranjadas o rojizas, similar a las obtenidas en este estudio para el depósito San Juan. Al respecto, Pérez-Martínez y Romero (2015), mencionan que los minerales más comunes que caracterizan a los jales oxidados son el yeso, hematita, jarosita, celestita, calcita, wollastonita, pirita, galena, y esfalerita, de los cuales galena, esfalerita, wollastonita y calcita se encuentran en los depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo (Moreno et. al 2009).

**Materia orgánica (MO) y pH.** Los porcentajes de MO obtenidos en los depósitos mineros fueron: en Santa María I 1.36%, en Santa María II 0.91% y en San Juan 0.913 %; de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 los tres depósitos presentan niveles bajos (0.6 a 0.5%) de materia orgánica (Tabla 2). Estos resultados se deben a que existe muy poca vegetación en los tres depósitos mineros, sobre los cuales se observó que se desarrollan pocas y pequeñas islas de plantas formadas por algunas especies como *Prosopis laevigata* y herbáceas como *Gnaphalium canescens*, *Adenophyllum cancellatum*, *Bidens pilosa*, *Brickellia subuligera*, *Calyptocarpus vialis* Less., *Gnaphalium* sp., *Perymenium* sp. y *Sanvitalia procumbens* Lam.; Estos datos coinciden con lo citado por Elizondo et al. (2016) quien realizó una identificación de especies que crecen en jales mineros de Zimapán, Hidalgo.

La escasa vegetación presente en los depósitos incorpora pocos residuos vegetales degradables, además, de que existe baja actividad microbiana, y las condiciones climáticas típicas de zonas áridas y semiáridas son desfavorables

para la retención de humedad y nutrimentos. Otra propiedad que evita la presencia de la materia orgánica, son las partículas del suelo, en los depósitos mineros estudiados en el presente trabajo, la arena es la fracción que predomina en dichos sitios, se ubica que dichas partículas tienen baja capacidad de intercambio catiónico y por tanto baja absorción de materia orgánica (Duarte et al. 2015).

En los depósitos mineros las condiciones señaladas en el párrafo anterior, los hacen poco estables y provocan que sean susceptibles a la erosión hídrica y eólica (Delfín y Duran-de-Bazúa 2008), lo que origina lixiviación y dispersión de partículas y a su vez riesgos de salud pública (Hernández et al. 2009).

Resultados similares a los obtenidos en el presente trabajo, para la variable materia orgánica fueron hallados por Duarte et al. (2019) en su estudio en tres depósitos de residuos de mina de Zimapán, Hidalgo; los investigadores reportaron niveles bajos de Materia Orgánica (1.4-2.5%). Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio superaron a los reportados por Bautista et al. (2016); quienes, al evaluar la materia orgánica en jales de mina de Pachuca, Hidalgo, no pudieron detectar esta variable. Lo anterior indica que el contenido de materia orgánica en los residuos mineros dependerá de las condiciones internas y externas que imperen en el sitio.

Los resultados obtenidos para la variable pH en los depósitos mineros variaron, Santa María I presentó un valor de 7.04 (neutro), Santa María II tuvo un pH de 6.91 (neutro) y San Juan un valor de 2.16 (ácido) (Tabla 2). Esta variable tiene inferencia directa sobre la vegetación, actividad microbiana, comportamiento de los metales pesados y contenidos de materia orgánica y nutrimentos. Al respecto, se ubica, para los sitios Santa María I y Santa María II, la presencia de las especies de plantas como *Prosopis laevigata* y herbáceas como *Gnaphalium canescens*, *Adenophyllum cancellatum*, *Bidens pilosa*, *Brickellia subuligera*, *Calyptocarpus vialis* Less., *Gnaphalium* sp., *Perymenium* sp. y *Sanvitalia procumbens* Lam.; en tanto, la concentración de Pb y Cu vario entre el pH neutro (Santa María I y II) y ácido (depósito San Juan, donde se presentaron las

concentraciones más altas). El contenido de MO fue mayor en los depósitos con pH neutros y menor en el depósito que presentó pH ácido, Jaramillo (2002) menciona que el pH es una característica importante para la formación y descomposición de la MO, por lo que en valores ácidos y alcalinos llega a tener bajos porcentajes. La concentración de fósforo en los depósitos mineros fue más baja en los sitios que presentaron pH neutros, en comparación con el que tuvo pH ácido (Tabla 2).

Tabla 2. Valores obtenidos en el procedimiento de medias y en el procedimiento GLM para muestras de residuo de mina en pH, CE, MO y P.

Depósito	Variable	Media	Desviación Estandar
Santa María I	pH	7.04	0.16
	CE ds m <sup>-1</sup>	2.59	0.29
	MO %	1.19	0.14
	P mg kg <sup>-1</sup>	3.39	1.72
Santa María II	pH	6.91	0.84
	CE ds m <sup>-1</sup>	2.33	0.06
	MO %	0.91	0.06
	P mg kg <sup>-1</sup>	12.53	20.62
San Juan	pH	2.160	0
	CE ds m <sup>-1</sup>	13.71	0.17
	MO %	0.91	0.62
	P mg kg <sup>-1</sup>	382.36	36.83
Variables entre depósitos	Variable	Probabilidad de F	
	pH	<.0001	
	CE ds m <sup>-1</sup>	<.0001	
	MO %	0.5893	
	P mg kg <sup>-1</sup>	<.0001	

Romero y Gutiérrez (2010) encontraron un comportamiento similar al obtenido en este estudio, en jales del centro de México (San Luis Potosí) y sur de México (Guerrero), el rango de pH que reportaron fue de 2.4 a 7.8. Sin embargo, los

valores pueden diferir en otros depósitos mineros del país, por ejemplo, Ramos et al. (2012), encontró un pH alcalino de 8.5 a 8.7, en tres presas de jales de Guanajuato, México y reportaron ausencia de materia orgánica en los mismos.

**Conductividad eléctrica (CE).** La concentración de sales en los depósitos mineros fue diferente, según la NOM-021-SEMARNAT-2000, Santa María I (2.76 ds m<sup>-1</sup>) y Santa María II (2.33 ds m<sup>-1</sup>) se catalogan como “moderadamente salinos” mientras que San Juan (13.71 ds m<sup>-1</sup>) es catalogado como “fuertemente salino” (Tabla 2).

Existe relación entre la conductividad eléctrica y las variables partículas del suelo, materia orgánica y pH. En este trabajo las partículas que prevalecieron fueron las arenas, hubo contenidos bajos de materia orgánica y pH de ácidos a neutros.

La presencia de arenas en los depósitos mineros Santa María I (76.06 %) y Santa María II (96.26 %) fue mayor en comparación con el depósito San Juan (57.76 %), por lo tanto, en este último la conductividad eléctrica es mayor, al respecto Simón et al. (2013) explican que son las partículas finas las que conducen mejor la electricidad, porque el contacto partícula-partícula y el número de poros pequeños que retienen el agua con mayor fuerza y por más tiempo es mayor. Al presentarse mayor porcentaje de arenas en los depósitos mineros, los contenidos de materia orgánica fueron bajos (Tabla 2), por tanto, la conductividad eléctrica también lo fue.

Resultados similares a los obtenidos en este trabajo para la variable conductividad eléctrica fueron reportados por Méndez y Armienta (2003), cuando evaluaron cuatro depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo; ellos encontraron rangos de 2.23 a 2.75 ds m<sup>-1</sup>.

**Contenido de Fosforo.** De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, los contenidos de fosforo en los depósitos mineros fueron, en Santa María I 3.39 mg kg<sup>-1</sup> (contenido bajo), en Santa María II 12.53 mg kg<sup>-1</sup> (contenido medio) y en San Juan 382.36 mg kg<sup>-1</sup> (contenido alto) (Tabla 2). La cantidad de nutrimentos

en los suelos se relaciona con la textura y partículas que prevalece; en esta investigación, la textura que predominó fue la arenosa, y la arena fue la partícula que presentó los porcentajes más altos en el suelo.

Esta teoría se refleja en los resultados obtenidos para los depósitos mineros, Santa María I y II, donde los porcentajes de arena fueron mayores, en comparación con los contenidos del depósito San Juan (Tabla 1).

En general, las investigaciones reportadas en varios sitios mineros, indican que los contenidos de nutrientes incluyendo el fósforo son bajos.

Así Bautista et al. (2016) reportan una concentración media de fósforo de 10.03 mg kg<sup>-1</sup> en residuos de mina del distrito minero Pachuca-Real del Monte. Rivera et al. (2013) en el mismo distrito minero encontraron concentraciones nulas de fósforo disponible. Ambas investigaciones relacionan la baja concentración de fósforo debido a la escasa población de plantas, y en consecuencia bajo aporte nutricional en los jales de mina.

**Contenido de plomo y cobre en los depósitos mineros.** Los resultados de los análisis estadísticos en plomo mostraron diferencias significativas entre tratamientos, por lo cual se realizó la prueba Tukey ( $P < 0.05$ ), determinando que el depósito San Juan fue diferente a Santa María I y II, mientras que el cobre en el análisis de medias no tuvo diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 3).

Tabla 3. Concentraciones de plomo y cobre en residuo de mina y material vegetal.

Metal	Variable	Depósito			Probabilidad entre depósitos
		Santa María I	Santa María II	San Juan	
Plomo mg kg <sup>-1</sup>	Residuo de mina	17.73	2.18	19.70	<.0001
	Hoja	69.48	77.75	93.03	0.0251
Cobre mg kg <sup>-1</sup>	Residuo de mina	18.71	9.94	79.34	0.0926
	Hoja	18.90	24.93	52.46	0.0707
Metal					
Factor de Bioconcentración (FBC) en <i>Prosopis laevigata</i>		Plomo		Cobre	
		7.35		1.30	

Se registró una concentración total de Plomo en el depósito minero en Santa María I de 17.33 mg kg<sup>-1</sup>, Santa María II 2.18 mg kg<sup>-1</sup> y en San Juan 19.70 mg kg<sup>-1</sup> siendo el más alto en este último depósito (Tabla 3). El contenido de plomo en los tres depósitos de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se encontró dentro de los valores normales. El depósito San Juan pudo concentrar la mayor cantidad de Pb, debido a que presentó una textura arenosa, pH ácido y bajo contenido de materia orgánica, estas condiciones favorecieron la presencia del metal.

El plomo es un metal pesado que se mide en los depósitos mineros porque representa alto riesgo de salud pública y con los procesos de erosión hídrica y eólica la población cercana a los sitios mineros mantiene contacto directo con el mismo.

Reportes realizados por Ramos-Arrollo y Siebe-Grabach (2006) indican que los sitios del distrito minero de Guanajuato pueden concentrar 13 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, estos resultados fueron inferiores a los hallados en el presente estudio. Sin embargo, resultados superiores fueron reportados por Martín y Gutiérrez (2010) en su estudio sobre la peligrosidad de los depósitos de residuos mineros al sur de Guerrero, señalaron una concentración mínima de 148 mg kg<sup>-1</sup> de Pb.

Gutiérrez et al. (2007) en su estudio de jales inactivos de Chihuahua, menciona que el nivel de referencia en México para identificar suelos contaminados por plomo como riesgo ecológico, es una concentración total de 100 mg kg<sup>-1</sup>, cuando se supera este valor, se considera un riesgo al ambiente. Situación que no ocurre en los tres depósitos mineros de este trabajo.

Las concentraciones totales registradas para cobre fueron, en Santa María I de 18.71 mg kg<sup>-1</sup>, Santa María II 9.94 mg kg<sup>-1</sup> y en San Juan 79.34 mg kg<sup>-1</sup>, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 los tres depósitos superaron los niveles adecuados en suelo (Tabla 3).

En Estados Unidos de América, el nivel de referencia para considerar que el cobre representa un riesgo ecológico es de 50 mg kg<sup>-1</sup> y en Canadá de 63 mg kg<sup>-1</sup> (Gutiérrez et al. 2007), por lo cual el depósito San Juan, que supera los límites permitidos por ambos países, es de alto riesgo ecológico. Algunas investigaciones en México señalan que este elemento representa un riesgo ambiental, porque los procesos de meteorización que ocurren en las presas jales de mina favorecen la liberación del metal.

El contenido mineral en los residuos de mina, es un factor que afecta los niveles de cobre, Moreno et al. (2009) reportó que en los depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo se encuentra la calcopirita (mineral que al oxidarse libera al cobre) en consecuencia se pueden hallar mayores concentraciones de este metal.

Resultados superiores a los obtenidos en este trabajo fueron reportados por Duarte et al. (2019), quienes señalan que la concentración de cobre en depósitos

mineros de Zimapán, Hidalgo varió de 116 a 206 mg kg<sup>-1</sup>. En el mismo distrito minero Moreno et al. (2009) también mostraron valores superiores (15 a 2787 mg kg<sup>-1</sup>) a los obtenidos en los tres depósitos mineros de este estudio.

El comportamiento irregular en las concentraciones de plomo y cobre obtenidas en los depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, a través del tiempo (Duarte et al. 2019 y Moreno et al. 2009) y los hallados en el presente estudio, comprueba que el pH, CE, MO y las partículas del suelo tendrán influencia directa en el comportamiento (concentración y movilidad) de los metales.

**Concentración de plomo y cobre en el material vegetal.** Los resultados de los análisis estadísticos de plomo y cobre en material vegetal no mostraron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 3).

Las concentraciones de plomo en *Prosopis laevigata* en los tres depósitos mineros mostraron las siguientes medias, para Santa María I 69.48 mg kg<sup>-1</sup>, para Santa María II 77.75 mg kg<sup>-1</sup> y en San Juan 93.05 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla 3). Existen pocos reportes que señalen los niveles tóxicos de plomo en especies arbóreas, para el caso de *Prosopis laevigata*, ocurre lo mismo.

En la absorción de metales pesados por la planta influyen las partículas del suelo, pH, MO, CE, CIC y concentración de metales, entre otros. En el presente estudio, la variable que intervino en la acumulación de plomo en las hojas de *Prosopis laevigata* fue el pH, esto se concluye después de analizar que el sitio que presentó pH ácido (San Juan) y donde creció el árbol, provocó los valores más altos de plomo, Blaz y Rodríguez (2015) apoyan lo anterior, los investigadores evaluaron la concentración de plomo en hojas de *acacia macracantha* y ubicaron que el pH incremento la disponibilidad del metal y su acumulación en hojas, cuando la acidez del suelo se elevó.

Resultados inferiores a los obtenidos en este trabajo, fueron reportados por Alcalá et al. (2013) cuando estudio a *Prosopis laevigata* como planta bioindicadora de metales pesados, obtuvieron 7.93 mg kg<sup>-1</sup> de plomo en hojas.

En aboles de familia de *Acacia farnesiana* crecidos en suelos contaminados con plomo, Landeros et al. (2011) reportan concentraciones de plomo en hojas que van de 103 a 179 mg kg<sup>-1</sup>. Estos resultados superan a los obtenidos en el presente trabajo.

Las concentraciones de cobre en hojas de *Prosopis laevigata* en los tres depósitos mineros mostraron las siguientes medias, en Santa María I 18.90 mg kg<sup>-1</sup>; en Santa María II 24.93 mg kg<sup>-1</sup>, y en San Juan 52.46 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla 3). En este estudio, al igual que para el caso de plomo, el depósito minero San Juan fue el que presentó la mayor acumulación de cobre. La absorción de dicho metal por la vegetación se verá condicionada por los mismos factores que el plomo. Respecto al pH, Beltrán y Gómez (2015), señalan que, en suelos ácidos, la biodisponibilidad de los metales aumenta debido a sus formas iónicas libres, para el caso del depósito San Juan, este presentó el pH más ácido (Tabla 2), por esta razón tuvo la concentración más alta de dicho elemento. El contenido bajo de materia orgánica, conductividad eléctrica y CIC (Tabla 1 y 2), que presentó el depósito minero San Juan, provocaron las concentraciones más altas de cobre en hojas de *Prosopis laevigata* (Tabla 3).

De acuerdo a Rodríguez et al. (2006) una especie se considera hiperacumuladora de metales pesados cuando concentra más de 1000 mg kg<sup>-1</sup> en materia seca, si es menor a esta concentración, puede considerarse como acumuladora, por lo que *Prosopis laevigata* entra en este último grupo.

Al respecto Alcalá et al. (2013) mencionan que la vegetación puede ser tolerante al acumular metales en sus tejidos aéreos, incluso cuando las concentraciones en suelo son muy bajas, evidenciando su utilidad para el diseño de tecnologías innovadoras y ecológicas en la restauración de suelos contaminados con metales pesados.

En árboles de acacia saligna, pertenecientes a la misma familia de *Prosopis laevigata*, Pizarro et al. (2015) encontraron una acumulación de 34.8 mg kg<sup>-1</sup> de cobre en hojas, crecida en suelos mineros contaminados. Los autores

recomiendan a dicha especie como fitoestabilizadora de relaves mineros en zonas áridas. Los resultados obtenidos por estos investigadores, fueron inferiores a los reportados en la presente investigación (52.46 mg kg<sup>-1</sup>) (Tabla 3). Por lo que *Prosopis laevigata* también puede ser recomendada como planta fitoestabilizadora de depósitos mineros.

**Factor de Bioconcentración (FBC) en material vegetal.** Al evaluar el FBC en hojas de *Prosopis laevigata*, se obtuvo para plomo un valor de 7.35, mientras que para cobre este fue de 1.30. Covarrubias y Peña (2017) señalan que las especies acumuladoras tienen un FBC  $\leq 1$  y las hiperacumuladoras  $\geq 1$ . Para ubicar especies de plantas fitoestabilizadoras de metales pesados en sitios contaminados, el FBC se debe determinar. Así, Buendía et al. (2010a, 2010b) estudiaron el potencial hiperacumulador en plántulas de *Prosopis laevigata*, y reportaron un FBC mayor de 100 para Cadmio, de 24 para cromo, de 32 para níquel y de 21 para plomo, concluyeron que la especie es apta para la bioconcentración de metales pesados.

Los valores que los investigadores obtuvieron para plomo fueron superiores a los conseguidos en la presente investigación. De acuerdo a lo señalado por Covarrubias y Peña (2017), Buendía et al. (2010a, 2010b) y a los resultados obtenidos en el presente estudio; se reafirma la eficiencia de *Prosopis laevigata*, como especie fitoestabilizadora de sitios contaminados con cobre, pero se reafirma aún más para la fitoestabilización de plomo.

### **3.6. CONCLUSIONES**

En los depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, se ubicó que *Prosopis laevigata* es capaz de bioacumular en sus hojas, concentraciones importantes de plomo (93.05 mg kg<sup>-1</sup>) y cobre (52.46 mg kg<sup>-1</sup>); por lo que se propone su uso en programas de recuperación de sitios contaminados, con ambos metales. Se sugiere continuar con la evaluación de las especies que crecen en depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, para ubicar un número mayor de plantas fitoestabilizadoras de sitios contaminados con metales pesados.

### 3.7. REFERENCIAS

- Alcalá JJ, Rodríguez OJC, Villaseñor ZME, Hernández MA, García AME, Beltrán MFA, et al. (2013) Vegetación bioindicadora de metales pesados en un sistema semiárido. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 45: 27-42.
- Bautista GEJ, Hernandez AE, Cristóbal AD, Quintero LR, Díaz VP, Robledo SE (2016) Extracción de metales pesados por *Lolium perenne* en residuos de mina. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, ISSN 2334-2501.
- Beltrán PME y Gómez RAM (2015) Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *Revista I3+*, 2(2), 82 – 112 p.
- Berrow M y Mitchell R (1980) Location of trace elements in soil profiles: total and extractable contents on individual horizons. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 71: 103-121.
- Bray RH y Kurtz LT (1945) Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59: 39-45.
- Blaz AMJ y Rodríguez EM (2015) Efecto del plomo en el crecimiento de plántulas de acacia *macracantha* humb. & bonpl. ex willd. “espino” en condiciones de laboratorio. *Revista SAGASTEGUIANA* 3(1): 87 - 104. 2015
- Buendía GL, Orozco VJ, Cruz SF, Barrera DCE, Vernon CEJ (2010a) *Prosopis laevigata* a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert plant. *Bioresource Technology*, 101(15): 5862-5867.
- Buendía GL, Orozco VJ, Estrada ZME, Barrera DCE, Vernon CEJ, Cruz SF (2010b) In vitro lead and nickel accumulation in mesquite (*Prosopis laevigata*) seedlings. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(1): 1-9.
- Castellanos JZ, Uvalle BJX, Aguilar SA (2000) *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. 2ª. Edición. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende, Guanajuato. 226 p.
- Covarrubias SA y Peña CJJ (2017) Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación.

Revista internacional de contaminación ambiental, 33 (Especial Biotecnología e ingeniería ambiental): 7-21. DOI: 10.20937/RICA.2017.33.esp01.01

Delfín AI y Durán-de-Bazúa MC (2008) La microbiota presente en un desecho minero, como opción de restauración de jales. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 1(4).

Duarte ZVM, Gutiérrez CEV, Gutiérrez CMC, Rogelio Carrillo GR, Ortiz SCA, Trinidad SA (2015) Heavy metals contamination in soils around tailing heaps with various degrees of weathering in Zimapán, Mexico. International Journal of Environmental Studies, 72(1):24-40.

Duarte ZVM, Carrillo GVR, Lozano CML y Carrasco HV (2019) Fractionation of Heavy Metals in Mine Tailings Amended with Composted Manure. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 28(2):148-161.

Elizondo C, Marquez LMA, Marin GML, Gutierrez YPJ (2016) Flora que crece naturalmente en presas de jale minero abandonadas susceptibles de ser utilizadas en reclamación, Zimapán, Hidalgo, México. Revista Interciencia, 41 (7): 492-298.

Gutiérrez RM, Romero FM y González HG (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, 24(2): 170-184.

Hernández AE, Mondragón RE, Cristobal AD, Rubiños PJE y Robledo SE (2009) Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 15(2): 109-114

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2011) Información por entidad: Hidalgo, territorio. México. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informaicon/hgo/territorio/clima.aspx?>

Tema=me&e=13. Fecha de consulta 17 de julio de 2018.

Jaramillo JDF (2002) Manual: Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Medellín.

Landeros MO, Trejo CR, Reveles HM, Valdez CRD, Arreola AJG, Pedroza SA, et al. (2011) Uso potencial del huizache (*acacia farnesiana* L. will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo, Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Volumen XVII, Edición Especial: 11-20.

Ley General para la Prevención y Registro Integral de los Residuos, LGPGIR (2003). Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente.

Martin RF y Gutiérrez RM (2010) Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62 (1): 43-53.

Méndez M y Armienta MA (2003) Arsenic phase distribution in Zimapán mine tailings, Mexico. Geofísica Internacional, 42 (1): 131-140.

Méndez-Ramírez M y Armienta HMA 2012 Distribution of Fe, Zn, Pb, Cu, Cd and As from mining wastes and wastewater along a transect of Taxco river in Guerrero, Mexico. Revista mexicana de ciencias geológicas, 29(2): 450-462.

Moreno TR, Barbanson L, Coreño AO (2009) Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. Minería y Geología, 25 (2): 1-31.

NMX-AA-132-SCFI-2006 Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente.

NOM-021-SEMARNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario

Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente.

NOM-120-SEMARNAT-2011 Que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente.

NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente. Diario Oficial de la Federación, Secretaria del Medio Ambiente.

Oyarzún R, Higuera P, Lillo J (2011) Minería Ambiental: Una introducción a los Impactos y su Remediación. Ediciones GEMM-Aula2punto.net.

Paredes MJ (2015) Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. Revista ECIPerú, 11(2).

Peña R Flor de María y Beltrán LME (2012) Aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados utilizando *Helianthus annuus* L. en la estación experimental del Mantaro. Revista Prospectiva Universitaria, 9(1).

- Pérez-Martínez I y Romero FM (2015) Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1): 1-12.
- Pizarro R, Flores JP, Tapia J, Valdés-Pineda R, González D, Morales C, et al. (2015). Forest species in the recovery of soils contaminated with copper due to mining activities. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(1), 29-43.
- Puga S, Sosa M, De la Mora A, Pinedo C, Jiménez J (2006a) Concentraciones de As y Zn en vegetación nativa cercana a una presa de jales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22 (2): 75-82.
- Puga S, Sosa M, Lebgue T, Quintana C y Campos A (2006b) contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 5(1,2).
- Ramos-Arrollo RY y Siebe-Grabach CD (2006) Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23 (1): 54-74.
- Ramos GM, Avelar J, Medel RA, Yamamoto L, Godínez L, Ramírez M, et al. (2012) Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. *Revista internacional de Contaminación Ambiental*, 28 (1): 49-59.
- Rivera BF, Juárez VLV, Hernández CSC, Acevedo SOA, Vela CG, Cruz CE, et al. (2013) Impacts of Manganese Mining Activity on the Environment: Interactions Among Soil, Plants, and Arbuscular Mycorrhiza. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 64: 219–227.
- Rodríguez OJC, Rodríguez FH, Lira RG, Martínez de la Cerda J, Lara MJL (2006) Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos contaminados. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29 (3): 239-245.

Romero FM, Armienta MA, Gutiérrez ME, Villaseñor G (2008) Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de Jales Mineros. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(2): 43-54.

Romero FM y Gutiérrez RM (2010) Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 62 (1): 43-53.

Simón M, Peralta N y Costa JL (2013) Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Revista Ciencia del Suelo*, 31(1).

## LITERATURA CITADA

Ali H., Khan E., Sajad M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere* 91, 869-881.

Armienta M.A., Ongley L.K., Rodríguez R., Cruz O., Mango H., Villaseñor G. (2008). Arsenic distribution in mesquite (*Prosopis laevigata*) and huizache (*Acacia farnesiana*) in the Zimapán mining area, México. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 8:1-7.

Becerril J.M., Barrutia O., García P.J.I., Hernández A., Olano J.M., Garbisu C. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en Fitorremediación, *Ecosistemas* 16 (2): 50-55.

Buendía GL, Orozco VJ, Cruz SF, Barrera DCE, Vernon CEJ (2010) *Prosopis laevigata* a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert plant. *Bioresource Technology*, 101(15): 5862-5867.

Carvajal H.H. (2008). Etapas en la vida de un proyecto minero, compañía minera Barrick Gold, Chile.

- Coll H.A., Sánchez S.M.T., Morales J. (2002). La minería en México, geografía, historia, economía y medio ambiente. Ed. Instituto de geografía UNAM, primera edición, Ciudad Universitaria, México.
- Canet C., Camprubí, A., 2006, Yacimientos minerales: los tesoros de la tierra: Fondo de Cultura Económica, México DF, México, 232 p.
- Castro S.G (2013). La mina nos extermina, Ed. Otros mundos AC/Chiapas, Chiapas, México.
- DalCarso G., Manara A., Piasentin S., Furini A. (2014). Nutrient metal elements in plants. *Metallomics*, 6, 1770-1788.
- ELAW (2010). Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros, U.S.A.
- Elizondo N. C. (2016). Análisis Paisajístico y de Perspectivas Ambientales de la Actividad Minera de Zimapán, Hidalgo, México. Recomendaciones para la reclamación y redirección ecológica de la minería en la zona. Instituto Politécnico Nacional.
- Flores T.E., Alarcon H.M.T., González E.S., Olgún E.J. (2003). Arsenic tolerating plants from mine sites and hot springs in the semi Arid region of Chihuahua, México. *Acta biotechnol* 23:113-119.
- Gobierno del estado de Hidalgo (2018). Zimapán. Fecha de consulta: 11 de enero de 2019, sitio web: <http://estado.hidalgo.gob.mx/MunicipioDetalle/Zimap%C3%A1n>
- Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED) (2002). Proyecto: Minería, minerales y desarrollo sustentable (MMSD).
- INEGI (2009). La industria minera ampliada: censos económicos, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.

- Instituto Tecnológico GoeMinero de España (ITGE) (1989). Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería, Madrid, España.
- Lavandaio E. (2008). Conozca más sobre minería, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires, Argentina, ISSN 0328-2317.
- Learita P.L.S. (2015). Una estrategia para la rehabilitación de presas de jales abandonadas en el municipio de Zimapán, Hidalgo. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad. Instituto Politécnico Nacional.
- Lei D. y Duan C. (2008). Restoration potential of Pioneer plants growing on lead-zinc mine tailings in Lanping, southwest China. *Journal of Environmental Science*, 20, 1202-1209.
- LGPGIR (2003). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, última reforma en 2005, *Diario Oficial de la Federación*.
- Luévanos S.F.M. (2011). Depósitos para jales, IV Congreso mexicano de la minería.
- Moran R. (2001). Aproximaciones al costo económico de impactos ambientales en la minería. *Ambiente Y Desarrollo*, 17, 59–66.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación, Secretaría del Medio Ambiente*.
- NOM-120-SEMARNAT-2011. Que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical

caducifolio, bosques de coníferas o encinos, *Diario Oficial de la Federación, Secretaría del Medio Ambiente.*

NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales, *Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Medio Ambiente.*

NOM-155-SEMARNAT-2007. Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata, *Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Medio Ambiente.*

Ortiz B.I., Sanz G.J., Dorado V.M., Villar F.S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica, 12-26.

Oyarzun R., Higuera P. y Lillo J. (2011). *Minería ambiental: una introducción a los impactos y su remediación*, Ed. GEMM, Madrid España.

Porta CJ, López ARM, Roquero DLC (2003) Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

Puga S, Sosa M, De la Mora A, Pinedo C, Jiménez J (2006) Concentraciones de As y Zn en vegetación nativa cercana a una presa de jales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22 (2): 75-82.

Romero FM, Armienta MA, Gutiérrez ME, Villaseñor G (2008) Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de Jales Mineros. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(2), 43-54.

sánchez H.M. del C. (2014). *vulnerabilidad paisajística asociada a las actividades mineras no metálicas en el parque nacional "los marmoles"*, Hidalgo, México. Instituto Politécnico Nacional.

sánchez (2018). Minería, consultado el 20 de diciembre de 2018, disponible en:  
<https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>

Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2017). Panorama minero del estado de Hidalgo. Secretaría de economía.

Sistema nacional de información forestal (SIRE) (2004). *Prosopis laevigata*. Ficha técnica. Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2018, sitio web <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/988Prosopis%20laevigata.pdf>

Yadav S. (2010). Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelantins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany* 76, 167-179.

Yao Z., Li j., Xie H., Yu C. (2012). Review on Remediation Technologies of soil contaminated by Heavy Metals. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 722-729.

Wong M. H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50: 775-780.