



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS SUELOS QUE CUBREN LOS JALES DE LA MINA LA NEGRA Y SU ACUMULACIÓN EN LAS ESPECIES *Nicotiana glauca*, *Flaveria pubescens* Y *Tecoma stans* EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN TOTAL, GEODISPONIBILIDAD Y BIOACCESIBILIDAD

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA

P R E S E N T A

IAN ADRIÁN CERVANTES GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS

M. EN I. JOSÉ ENRIQUE SANTOS JALLATH

JUNIO DE 2015

Ciudad Universitaria, D. F.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mi madre, el pilar más importante de mi vida e incansable apoyo en mis decisiones. Por ti soy el hombre que ahora soy.

A mi padre, de quien aprendí la rectitud, el trabajo y la honorabilidad. Eres mi ejemplo a seguir.

A mis hermanas, Nancy y Angélica, quienes siempre confiaron en mí y me apoyaron en todo momento.

A Claudia, mi compañera de camino en la vida. Gracias por ayudarme a cerrar este ciclo.

A mi familia, quienes siempre estuvieron al pendiente de mis logros y ahora son parte de ellos.

A mis amigos, con quienes viví y espero seguir viviendo momentos irrepetibles. A ustedes les debo gran parte de mi crecimiento como persona.

A todas aquellas personas que formaron y siguen formando parte de mi vida.

A mi Alma Máter, la Universidad Nacional Autónoma de México.

AGRADECIMIENTOS

A Minera La Negra, S.A. de C.V. por las facilidades brindadas para la realización del estudio.

Al Maestro Santos, por ser gran amigo y mentor profesional.

Al Ing. José de Jesús Huevo, por el apoyo en el muestreo.

A los Ingenieros Viridiana Herrera y Luis Eduardo Chacón por el apoyo en el estudio.

A la Maestra Guadalupe Urquiza del Laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM por las enseñanzas y los apoyos brindados. QEPD.

Este estudio fue realizado con la ayuda del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT IN109808, de la UNAM “Evaluación del uso de plantas para la estabilización de presas de jales y remediación de suelos afectados con metales”.

RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. ANTECEDENTES	13
2.1. Características del sitio de estudio	13
2.1.1. Localización de la mina	13
2.1.2. Condiciones ambientales del entorno	14
2.1.3. Datos históricos.....	14
2.2. Origen de los depósitos de jales de “La Negra”	14
2.2.1. Geología y yacimientos minerales	14
2.2.2. Explotación del mineral	15
2.2.3. Depósitos de jales	15
2.3. Especies vegetales que crecen en las presas	19
2.4. Especies que acumulan metales.....	20
2.5. Descripción de las especies <i>Nicotiana glauca</i> , <i>Tecoma stans</i> y <i>Flaveria pubescens</i>	21
3. MARCO TEÓRICO	24
3.1. Rehabilitación de presas de jales	24
3.2. Acumulación de metales en plantas que crecen en depósitos de residuos mineros	27
3.3. Movilidad de los metales asociada a las plantas	29
3.4. Geodisponibilidad y biodisponibilidad.....	31
3.5. Bioaccesibilidad	33
4. TRABAJO EXPERIMENTAL	35
4.1. Muestreo	35
4.2. Determinación de la concentración total en plantas y suelos	39
4.2.1. Preparación de las muestras	39
4.2.2. Determinación del pH en las muestras de suelo	40
4.2.3. Digestiones	40
4.2.4. Análisis por espectrometría de Absorción Atómica	41
4.3. Determinación de la fracción geodisponible	41
4.3.1. Preparación de la muestra.....	41
4.3.2. Preparación de la solución extractante	41

4.3.3.	Prueba de extracción	41
4.3.4.	Análisis de la fracción geodisponible	42
4.4.	Determinación de la bioaccesibilidad	42
4.4.1.	Preparación de las muestras	42
4.4.2.	Preparación del reactivo.....	42
4.4.3.	Prueba de bioaccesibilidad	43
4.4.4.	Análisis de bioaccesibles.....	44
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
5.1.	Resultados de pH de los suelos	45
5.2.	Concentraciones totales en plantas	45
5.3.	Bioaccesibilidad en suelos	53
5.4.	Concentración de la fracción soluble	58
5.5.	Correlación entre los parámetros determinados	63
5.5.1.	Concentración total (CS), Concentración Geodisponible (CG) y Concentración Bioaccesible (CB) 63	
5.5.2.	Concentración Total vs Concentración Geodisponible.....	64
5.5.3.	Concentración Total vs Concentración Bioaccesible	65
5.5.4.	Concentración Geodisponible vs Concentración Bioaccesible	65
5.5.5.	Concentración en planta y su relación con los otros parámetros.....	65
5.5.5.1.	Nicotiana glauca.....	66
5.5.5.2.	Flaveria pubescens.....	68
5.5.5.3.	Tecoma stans	69
6.	CONCLUSIONES	72
7.	REFERENCIAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la mina "La Negra"	13
Figura 2 Talud de la Presa 1.....	16
Figura 3 Talud de la presa 1 vista de frente	16
Figura 4 Talud de la presa 2.....	17
Figura 5 Vaso de la presa 2.....	17
Figura 6 Talud y vaso de la presa 3.....	18
Figura 7 Vaso de la presa 3.....	18
Figura 8 <i>Flaveria pubescens</i>	21
Figura 9 <i>Tecoma stans</i>	22
Figura 10 <i>Nicotiana glauca</i>	23
Figura 11 Toma de coordenadas con GPS	35
Figura 12 Recolección de muestras	36
Figura 13 Envasado de las muestras	36
Figura 14 Recolección de sustrato.....	36
Figura 15 Distribución del muestreo en la presa 1.....	37
Figura 16 Distribución del muestreo en la presa 2.....	38
Figura 17 Distribución del muestreo en la presa 3.....	38
Figura 18 Preparación de la glicina.....	38
Figura 19 Dispositivo para la prueba de bioaccesibilidad, vista del motor	44
Figura 20 Dispositivo para la prueba de bioaccesibilidad, vista del contenedor de muestra	44
Figura 21 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Cu para cada especie por presa.....	46
Figura 22 Concentraciones totales de Cu por muestra.	47
Figura 23 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Zn para cada especie por presa.	48
Figura 24 Concentraciones totales de Zn por muestra.	49
Figura 25 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Cd para cada especie por presa.....	50
Figura 26 Concentraciones totales de Cd por muestra.	51
Figura 27 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Pb para cada especie por presa.....	52
Figura 28 Concentraciones totales de Pb por muestra.	53
Figura 29 Porcentaje de bioaccesibilidad de Cu en suelos.....	55
Figura 30 Porcentaje bioaccesible de Zn en suelos.	56
Figura 31 Porcentaje bioaccesible de Cd en suelos.....	57
Figura 32 Porcentaje bioaccesible de Pb en suelos.....	58
Figura 33 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Cu.....	60
Figura 34 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Zn.	61
Figura 35 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Cd.....	62
Figura 36 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Pb.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Concentración total de metales y metaloides en los jales. (Santos, et al., 2009)	19
Tabla 2 Fracción soluble de los jales. (Santos et al. 2009)	19
Tabla 3 Especies recolectadas en las presas. (Santos, Rodríguez y Huevo 2009)	20
Tabla 4 Muestreo de especies y sustratos.	39
Tabla 5 Resultados de pH de muestras de suelos	45
Tabla 6 Concentraciones totales (mg/kg) y bioaccesibles.....	54
Tabla 7 Concentraciones totales y geodisponibles en mg/kg.	59
Tabla 8 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Cu para las muestras de suelo.....	64
Tabla 9 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Zn para las muestras de suelo.....	64
Tabla 10 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Cd para las muestras de suelo.....	64
Tabla 11 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Pb para las muestras de suelo.....	64
Tabla 12 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cu para la especie <i>Nicotiana glauca</i>	66
Tabla 13 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Zn para la especie <i>Nicotiana glauca</i>	66
Tabla 14 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cd para la especie <i>Nicotiana glauca</i>	66
Tabla 15 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Pb para la especie <i>Nicotiana glauca</i>	66
Tabla 16 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cu para la especie <i>Flaveria</i> <i>Pubescens</i>	68
Tabla 17 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Zn para la especie <i>Flaveria</i> <i>Pubescens</i>	68
Tabla 18 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cd para la especie <i>Flaveria</i> <i>Pubescens</i>	68
Tabla 19 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Pb para la especie <i>Flaveria</i> <i>Pubescens</i>	68
Tabla 20 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cu para la especie <i>Tecoma stans</i> . .	69
Tabla 21 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Zn para la especie <i>Tecoma stans</i> ...	70
Tabla 22 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cd para la especie <i>Tecoma stans</i> . .	70
Tabla 23 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Pb para la especie <i>Tecoma stans</i> ..	70

RESUMEN

Las especies *Nicotiana glauca*, *Flaveria pubescens* y *Tecoma stans* crecen en las presas de jales de la mina La Negra, Querétaro. En su parte aérea (tallos y hojas) acumulan cantidades variables de cobre, zinc, cadmio y plomo, por lo que se realizó un estudio para determinar la relación que hay entre la concentración acumulada de metales en la planta y la concentración total, geodisponible y bioaccesible presente en el suelo que recubre los jales. Se tomaron 25 muestras de plantas en las presas inactivas; en cada punto de muestreo, se tomaron en un radio máximo de 10 m las tres especies y una muestra de suelo representativa. Se determinó la concentración total de cobre, zinc, cadmio y plomo en las muestras de plantas y suelos, además, en los suelos se obtuvo la fracción geodisponible y bioaccesible. Se hizo un análisis estadístico para determinar la correlación lineal entre los parámetros analizados. La *Flaveria pubescens* fue la especie que acumuló las mayores concentraciones de Cu, Zn y Pb, y la *Nicotiana glauca* presentó el mayor contenido de Cd. En la *Nicotiana glauca* y la *Flaveria pubescens* la acumulación de metales es menor conforme aumenta la presencia de éstos en el suelo; en la *Tecoma stans* la concentración en la planta aumenta cuando hay mayor presencia del elemento en el suelo. La geodisponibilidad de los elementos no es relevante en el caso de la *Nicotiana glauca* y de la *Tecoma stans*, pero en la *Flaveria pubescens* sí se observa una mayor acumulación de Cu, Cd y Zn cuando aumenta ésta, y al contrario para el Pb, se reduce la concentración en la planta cuando aumenta su geodisponibilidad en el suelo. La bioaccesibilidad se relaciona con la *Nicotiana glauca* en el caso del cobre y el plomo, y con la *Flaveria pubescens* solo en el plomo; cuando aumenta la bioaccesibilidad se reduce la concentración en la planta. En la *Tecoma stans* aumenta la concentración en la planta conforme se incrementa la bioaccesibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad que desde tiempos ancestrales, ha sido necesaria para el desarrollo de la sociedad. Hoy en día se obtiene de esta actividad materias primas para objetos que ocupamos en la vida diaria, que son estratégicas, que forman parte de nuestra economía o simplemente para el uso ornamental. La necesidad de minerales, ha hecho que la tecnología y los métodos de extracción evolucionen, ocasionando que cada vez se exploten yacimientos con leyes más bajas.

En México, desde la época precolombina se han explotado minerales y esta actividad ha sido un motor de desarrollo social, tanto así que muchas ciudades surgieron con el apogeo de la minería en distintas zonas, tal es el caso de Guanajuato, Guerrero, Zacatecas y Estado de México, por mencionar algunas. Hoy en día, la minería en México atrae grandes inversiones que al mismo tiempo trae beneficios a lugares en donde muchas veces, es muy difícil llegar.

A pesar de que la minería ha contribuido al desarrollo de economías locales, la explotación de los minerales trae consigo la contaminación del medio ambiente en sus diferentes etapas, siendo la explotación, el beneficio y la refinación de los minerales las que más afectan.

En las operaciones mineras lo que más se puede percibir es el impacto visual, sobre todo en la explotación a cielo abierto. Además, las grandes extensiones de terreno que son destinadas a esta actividad son despojadas de la flora, la fauna y el suelo. En la minería subterránea dependiendo del método de explotación, es menos común ver este tipo de impacto, a menos que exista subsidencia del terreno.

El procesamiento de la roca de interés consiste en la separación del mineral de mena del de ganga por métodos físicos, químicos o fisicoquímicos. En este proceso es donde se produce lo que es llamado "jal". El jal es el residuo del procesamiento y beneficio del mineral y está constituido en su mayoría por minerales que no tiene ningún valor económico. Su disposición está sujeta a la construcción de depósitos específicos de este material.

Los depósitos de jales en muchas ocasiones han quedado abandonados creando pasivos ambientales de magnitudes considerables a los que es necesario invertir una gran cantidad de dinero para su remediación, sobre todo aquellos que están cerca de poblaciones y que llevan muchos años debido a que están ahí desde épocas de la Colonia.

Actualmente, la NOM-141-SEMARNAT-2003, establece todos los estudios, criterios y especificaciones necesarias para antes de la construcción, durante la operación y la post-operación de las presas de jales y obliga a una adecuado cierre de las mismas. Dentro de estas acciones de cierre se encuentran el recubrimiento de los jales con suelo y su posterior reforestación con especies endémicas de la región, lo que promueve de manera directa el crecimiento de vegetación y con esto una relación entre ésta, el suelo y el jal.

Algunas de las investigaciones realizadas dan a conocer estudios sobre las plantas que crecen en las presas de jales y suelos contaminados (Carrillo González and González Chávez 2006) (Marguí, et al. 2007) (Santos Jallath 2009) (Santos y Katagiri 2012) (Santos, Rodríguez y Huevo 2009). Los estudios han abarcado desde cómo es que

los contaminantes son movilizados, qué porcentaje de ellos está estable, cómo es que las plantas toman estos elementos y cuál es el riesgo ambiental, además de otros aspectos más específicos como la velocidad a la que se llevan a cabo estos procesos así como las condiciones para los mismos.

Es interesante estudiar los fenómenos mediante los cuales las plantas pueden acumular los elementos metálicos contenidos en los jales y qué tanto pueden acumular, así como aplicaciones que se le puedan dar a este fenómeno. En México, desde hace algunos años se han venido haciendo estudios de las plantas que crecen en los jales, teniendo en cuenta la gran cantidad de depósitos de residuos mineros que existen en el país. Incluso en algunos lugares la investigación se hace con la intención de aplicar las plantas para remediar los suelos contaminados, lo que se conoce como métodos de fitorremediación.

La empresa Minera La Negra S.A. de C.V., explota un yacimiento de sulfuros polimetálicos en la localidad de Maconí, municipio de Cadereyta, estado de Querétaro. Esta unidad ha depositado jales en cinco presas, de las cuales cuatro están fuera de operación y de éstas, tres están recubiertas con suelo vegetal y han sido reforestadas. En estudios hechos anteriormente como parte de un proyecto de investigación sobre las plantas que crecen en los depósitos de la mina (Rodríguez Cruz 2010), se ha demostrado que los jales de esta mina contienen cantidades importantes de metales pesados que podrían ser movilizados en cualquier momento por algún efecto físico o químico además de que también se ha comprobado que ciertas especies de plantas acumulan los metales en su estructura, disminuyendo la cantidad disponible en el suelo al absorberlo y/o estabilizando químicamente el metal en el suelo mediante diversos procesos biológicos.

Con base en los estudios anteriores se identificaron tres especies que acumulan en su estructura aérea los metales pesados contenidos en los jales (Pb, Cd, Cu y Zn), *Nicotiana glauca*, *Flaveria pubescens* y *Tecoma stans*.

El objetivo del presente estudio es determinar la bioaccesibilidad, geodisponibilidad y concentración total en los suelos que cubren los jales de la mina La Negra y analizar la relación de estos parámetros con la acumulación de Pb, Cd, Cu y Zn en las especies *Nicotiana glauca*, *Flaveria pubescens* y *Tecoma stans*.

2. ANTECEDENTES

2.1. Características del sitio de estudio

2.1.1. Localización de la mina

La Unidad Minera La Negra, se encuentra ubicada en el la localidad de Maconí, municipio de Cadereyta en el estado de Querétaro. Fisiográficamente se encuentra en la Sierra Madre Oriental. Sus coordenadas geográficas son: (UTM) 2304048 N, 445652 E a 1861 msnm (figura 1).

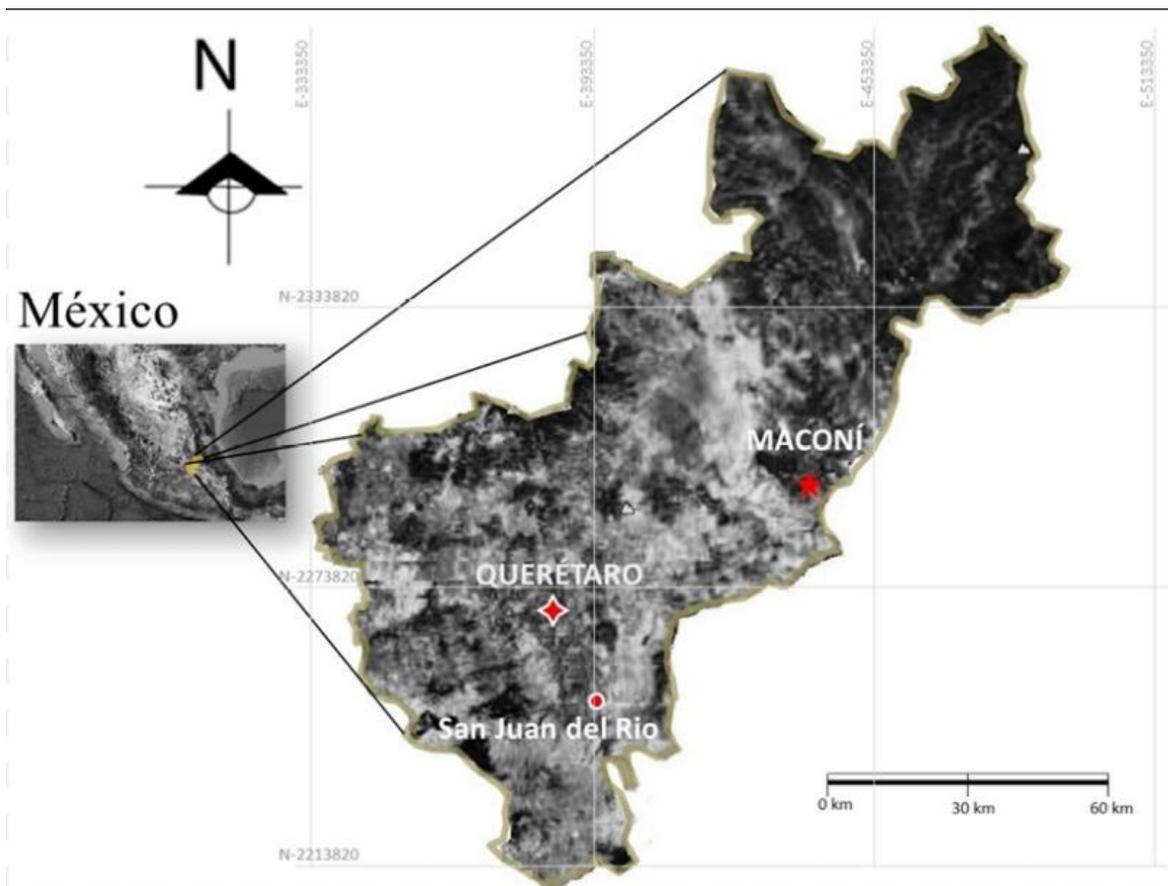


Figura 1 Ubicación de la mina "La Negra"

La mina se encuentra en la región minera de San Joaquín, en el distrito minero de Maconí. A la localidad se ingresa por la carretera federal 120, en el tramo de San Juan Del Rio Jalpan y en el kilómetro 180 existe una desviación hacia San Joaquín, después se recorren 27 kilómetros, se toma la desviación hacia Maconí y se recorren 17 kilómetros hasta la localidad. De Maconí se llega a la mina por un camino de terracería de 6 kilómetros.

2.1.2. Condiciones ambientales del entorno

El distrito minero se encuentra en la Provincia de la Sierra Madre Oriental, en su borde occidental denominada Subprovincia de Sierras Altas. El relieve es montañoso y muy accidentado. Localmente el relieve está dominado por el valle del río Maconí tributario del río Moctezuma y es controlado por la litología. Las partes bajas presentan un drenaje dendrítico debido a las rocas arcillosas.

La mina se encuentra en la cuenca del río Moctezuma, cuyo principal aporte es el río con el mismo nombre y que se origina en el Estado de México. Aguas abajo se une con el río Extoraz. La cuenca ocupa 4,400 km² y tiene un desplazamiento promedio de 444 millones de metros cúbicos al año. El río Maconí tiene un flujo permanente con un gasto medio anual de 1.5 m³/s. Con respecto al agua subterránea, la mina corresponde al acuífero Moctezuma, pero la Comisión Nacional del Agua (Conagua) no tiene descripción del mismo (CONAGUA 2002).

El clima predominante en la zona es seco-estepario con lluvias en verano. Entre noviembre y abril la temperatura media mínima es de 9°C y la media máxima es de 21°C, con precipitación total de entre 75 y 100 mm. Entre mayo y octubre, la temperatura media mínima es de 12°C y la media máxima es de 27°C con precipitación total de 175 a 250 mm (CONAGUA 2002).

La vegetación predominante en el área depende de la elevación. En las zonas altas existen coníferas como el pino, el enebro, el encino y el cedro. En las depresiones dominan los órganos, el ocotillo, la lechuguilla, el maguey y el nopal, debido a que hay temperaturas mayores y menor humedad.

2.1.3. Datos históricos

La actividad minera en el valle del río Maconí, así como en la región de El Doctor y San Joaquín, data de la época prehispánica principalmente por minerales de mercurio. El distrito fue descubierto en la época colonial, cuando fue explotado de manera rudimentaria. A fines de 1870 las propiedades correspondían al cónsul general de Bélgica en México, señor Víctor Beurang. A su muerte en 1900, el hijo del cónsul vendió las propiedades a los señores Oscar y Tomas Braniff. Poco después fueron compradas por la Compañía Minera Acoma, S.A., la cual realizó trabajos de exploración poco favorables, por lo que las abandonan. Posteriormente fueron adquiridas por los señores Eloy Valtina y Antonio Guerrero, de quienes Peñoles las adquirió, efectuando un intenso programa de geología y barrenación con resultados favorables (CRM 1992). La planta de beneficio de esta empresa comenzó sus operaciones en 1971 y dejó de ser explotada en el año 2000. Posteriormente, en el año 2006 fue adquirida por Reyna Mining Engineering (compañía mexicana) y por Aurcana Corporation (compañía canadiense), iniciando operaciones en 2007. Finalmente, en el año 2010 fue adquirida totalmente por la empresa canadiense, hasta nuestros días (Aurcana 2010).

2.2. Origen de los depósitos de jales de “La Negra”

2.2.1. Geología y yacimientos minerales

En el área aflora la Formación El Doctor del Cretácico Inferior Medio. Por encima de ésta se encuentra la Formación Soyatal-Mezcala del Cretácico Superior, la cual consiste en una alternancia de lutitas, margas y calizas. Cubriendo de manera discordante a esta secuencia, se encuentra la formación Tarango del Plioceno, que está formada de conglomerados y epiclásticos. La secuencia sedimentaria está cubierta por un stock diorítico al que se le atribuye la mineralización.

Los yacimientos del área de La Negra son de tipo hidrotermal en skarn; en cuanto a la forma se relacionan con el tipo chimenea-manto del norte de México. Son, en general, diversas chimeneas con inclinación de 60° o más, presentando formas irregulares de las cuales se desprenden algunos mantos. Las dimensiones de estos cuerpos varían de 50 a 400 metros de manera vertical, con un promedio de 90 por 40 metros en sección de planta. El espesor real va de los 15 a 20 metros.

Existen en el área trece cuerpos con mineralización importante, cercanos unos de otros. Estos cuerpos son localizados en una aureola de cuerpos intrusivos, formados por rocas metasomáticas de contacto. La mineralización importante se encuentra en el skarn de granate próximo al contacto con roca caliza. La mineralización consiste en sulfuros masivos contenidos y restringidos al skarn. La mineralogía de los sulfuros es: pirita, pirrotita, arsenopirita, esfalerita, calcopirita y galena. La plata está contenida en la galena en forma de hessita y en algunos casos asociada a la calcopirita. La galena y en consecuencia la plata incrementan en dirección a las calizas.

2.2.2. Explotación del mineral

De la explotación de los cuerpos minerales se extraen 2,500 toneladas métricas por día con el método de tumba por subniveles con barrenación larga descendente. El mineral extraído es llevado a una primera estación de trituración en el interior de la mina. Terminada la trituración primaria, el mineral es transportado con camiones de volteo hasta las tolvas de la planta de beneficio. Después es introducido a la siguiente etapa de trituración en un circuito cerrado, iniciando con una quebradora de quijadas, seguida de una trituradora de cono de cabeza estándar y terminando en una quebradora de cono de cabeza corta, en el circuito además existen dos cribas vibratorias y un sistema de bandas para transporte del mineral. Luego de esta reducción de tamaño, el mineral es llevado a molinos de bolas en circuito cerrado con hidrociclón. El proceso llevado a cabo después es flotación selectiva, donde se tienen dos circuitos: el primero es para flotación plomo-cobre y el segundo para flotación de zinc. Las colas del primer banco se convierten en las cabezas del segundo y las colas de éste son las colas finales que serán transportadas hasta las presas de jales. La plata es obtenida como subproducto en ambos bancos de flotación.

2.2.3. Depósitos de jales

La unidad minera cuenta con 5 presas de jales, de las cuales la presa 1 (figura 2 y 3), la presa 2 (figura 4 y 5) y la presa 3 (figura 6 y 7) están fuera de operación, la presa 4 aunque también está fuera de operación, es utilizada como patio de almacenamiento de mineral y finalmente, la presa 5 es la que actualmente está en operación y para la cual se tiene un proyecto de ampliación. Las tres primeras presas están incluso, recubiertas con suelo y reforestadas y es donde se realizó el presente estudio.



Figura 2 Talud de la Presa 1



Figura 3 Talud de la presa 1 vista de frente



Figura 4 Talud de la presa 2



Figura 5 Vaso de la presa 2



Figura 6 Talud y vaso de la presa 3



Figura 7 Vaso de la presa 3

Los jales fueron caracterizados por Santos *et al.*, (2009) y González Gallardo (2009), en donde se reportan las concentraciones de metales de las presas 1, 2 y 3, mostrados en la tabla 1. Otra de las pruebas que se realizó fue la extracción correspondiente a la NOM-141-SEMARNAT-2003 para obtener la fracción soluble de los metales y metaloides contenidos, estas fracciones están reportadas en la tabla 2. En cuanto a la granulometría, se encontró que en las presas 2 y 3, los jales eran finos puesto que más del 50% se encuentra por debajo de la malla 200. En cuanto a la presa 1, los jales son más gruesos con un 50% por encima de la malla 100, debido a que el muestreo se realizó en el talud de la misma. Fueron tomados los pH de cada muestra, obteniéndose que la presa 1 tenía un pH de 2.10 (evidentemente había generado acidez), la presa 2 con un pH de 8.15 y la presa 3 con un pH de 8.35. Finalmente se realizó una prueba de balance ácido-base, la cual consistió en la determinación del potencial de neutralización y del potencial de acidez, para después obtener una relación entre ellos y los resultados fueron analizados conforme a la NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2004) donde: a) Si $PN/PA > 1.2$, entonces los jales no son potenciales generadores de drenaje ácido, y b) Si $PN/PA < 1.2$ entonces los jales son potenciales generadores de drenaje ácido. Los resultados muestran que la relación para los jales de la presa 1 fue de -0.5632, por lo que ya está generando ácido; para la presa 2 de 15.2, por tanto no es potencial generadora de ácido; para la presa 3 de 1.73, lo que nos dice estrictamente que no generará y para los jales frescos de 1.4.

Tabla 1 Concentración total de metales y metaloides en los jales. (Santos, *et al.*, 2009)

Muestra	Concentración en (mg/kg)				
	As	Pb	Cd	Cu	Zn
J1	14,660	1,754	308	459	*
J2	1,183	327	45	267	507
J3	3,133	337	82	149	448
* Resultado no reportado.					

Tabla 2 Fracción soluble de los jales. (Santos et al. 2009)

Presa	As(mg/L)	Pb(mg/L)	Cd(mg/L)	Cu(mg/L)	Zn(mg/L)	Fe(mg/L)
1	0.82	0.855	0.489	10.62	44.23	29.67
2	0.36	0.264	ND	0.25	0.02	0.292
3	0.45	0.16	0.001	ND	ND	0.026
*ND: No Detectado.						

2.3. Especies vegetales que crecen en las presas

Las presas de La Negra que están en etapa de post-operación, se han cubierto con suelo y al mismo tiempo han sido reforestadas, en forma natural y por personal de la mina. En el año 2008, se hizo un estudio encaminado a

identificar las especies vegetales que crecen sobre las presas (Santos, Rodríguez y Huevo 2009) (Rodríguez Cruz 2010). La mayoría de estas plantas son endémicas de la zona, lo que es una ventaja pues se reproducen de manera espontánea debido a que están adaptadas al clima del lugar. Es importante su estudio pues con ellas se puede realizar una reforestación más completa.

En total fueron estudiadas 11 especies, las cuales se identificaron en el Instituto de Biología de la UNAM e incluidas en el Herbario Nacional. De estas 11 especies fue posible determinar género, familia y especie. De las dos restantes no se pudo determinar la especie debido a que no se pudo colectar flor y fruto. En la tabla 3 se muestran las especies recolectadas.

Tabla 3 Especies recolectadas en las presas. (Santos, Rodríguez y Huevo 2009)

Presas	Familia	Género	Especie	Autor
2,3	Solanaceae	<i>Nicotina</i>	<i>Glauca</i>	Graham
1,2,3	Asteraceae	<i>Flaveria</i>	<i>pubescens</i>	Rydb.
1,2,3	Anacardiaceae	<i>Schinus</i>	<i>molle</i>	L.
1,3	Casuarinaceae	<i>Casuarina</i>	<i>Sp.</i>	
1,3	Bignoniaceae	<i>Tecoma</i>	<i>stans</i>	(L.) Kunth
1,2,3	Leguminosae	<i>Prosopis</i>	<i>Sp.</i>	
1,2,3	Poaceae	<i>Cenchrus</i>	<i>ciliaris</i>	L.
2,3	Scrophulariaceae	<i>Maurandia</i>	<i>antirrhiniflora</i>	Humb. & Bonpl. ex Willd
1	Euphorbiaceae	<i>Ricinus</i>	<i>cummunis</i>	L.
1	Cactaceae	<i>Opuntia</i>	<i>lasiacantha</i>	Pfeiffer
2	Cactaceae	<i>Opuntia</i>	<i>tomentosa</i>	Salm-Dyck

2.4. Especies que acumulan metales

En el estudio mencionado se hicieron análisis de las plantas para 5 metales: plomo, arsénico, cadmio, zinc y cobre (Santos, Rodríguez y Huevo 2009). Para el arsénico, las especies que mayor concentración acumularon fueron: *Nicotiana glauca* (91.94 mg/kg), *Flaveria pubescens* (21.09 mg/kg) y *Tecoma stans* (22.09 mg/kg), en menor proporción la *Opuntia lasiacantha* (12.87 mg/kg); para el cadmio: *Nicotiana glauca* (106.07 mg/kg), *Flaveria pubescens* (25.64mg/kg) y *Tecoma stans* (31.68mg/kg); para el plomo: *Flaveria pubescens* (222.89 mg/kg), *Nicotiana glauca* (188.85 mg/kg) y *Maurandia antirrhiniflora* (203.27 mg/kg), en menor proporción *Tecoma stans* (153.20 mg/kg); para el cobre: *Flaveria pubescens* (102.46mg/kg), *Nicotiana glauca* (95.17mg/kg) y *Prosopis sp.* (63.64 mg/kg), en menor proporción *Tecoma stans* (58.63 mg/kg); por ultimo para el zinc: *Nicotiana glauca* (1,984.48 mg/kg), *Tecoma stans* (942.80 mg/kg) y *Flaveria pubescens* (755.82 mg/kg).

Estas especies presentaron la mayor concentración de metales en sus partes aéreas, es decir, el tallo, la rama, la hoja y la flor. Otras especies como la *Cenchrus ciliaris* y la *Opuntia lasiacantha* resultaron con altas concentraciones en las raíces, lo que las hace interesantes pues se pueden utilizar de dos maneras diferentes: para la estabilización física de la presa y para inmovilizar los metales en el suelo.

Teniendo en cuenta las especies que mayores concentraciones acumularon, se puede notar que existen tres que son comunes para todos los metales: *Nicotiana glauca*, *Flaveria pubescens* y *Tecoma stans*. Por tanto, el presente estudio está enfocado en estas tres especies de interés por su capacidad de acumular mayor cantidad de metales que las demás y porque son plantas endémicas de la región, lo que es una ventaja, ya que como se había mencionado anteriormente crecen de manera espontánea en la zona, sin dejar atrás que es posible que estas especies estén contribuyendo a la movilización de los metales a partir de los jales en donde se encuentran.

2.5. Descripción de las especies *Nicotiana glauca*, *Tecoma stans* y *Flaveria pubescens*

Flaveria Pubescens. Especie que es de la familia de las Asteraceae. Es una hierba que se da anualmente, con un tallo simple y una altura de 50 a 100 centímetros, estriada, con vellos ásperos y duros; hojas alineadas en forma de lanza con una longitud de 5 a 10 centímetros disminuyendo en la base, acanaladas, con vellos cortos en ambos lados, inflorescencia normalmente abierta, aunque puede presentarse cimosa; las cabezas presentan aproximadamente 10 flores; busca los rayos solares; corolas en disco con aproximadamente 2.5 milímetros de longitud; aquenos de aproximadamente 1.5 milímetros de longitud. Denominada en la comunidad como marihuana. Crece en los estados de Querétaro y San Luis Potosí (BHL 2011) (Figura 8).



Figura 8 *Flaveria pubescens*

Tecoma Stans. Es un arbusto bajo, caducifolio o perennifolio, de 1 a 10 metros de altura y un diámetro de hasta 25 centímetros; hojas compuestas y opuestas, de 2.5 a 15 centímetros de largo; la corteza es dura y acostillada; la inflorescencia es terminal, con hasta 20 flores, corola color amarillo vivo, con 7 líneas rojizas en la garganta, de 3 a 7 centímetros de largo, débilmente fragantes; el fruto es una cápsula alargada, café, de 7 a 21 centímetros de largo y de 5 a 7 milímetros de ancho, abriéndose a lo largo para liberar muchas semillas muy finas; las semillas son aplanadas, de 7 a 9 milímetros de largo. Esta ampliamente distribuida por el territorio nacional, estando a una altura media de 0 a 2400 metros sobre el nivel del mar. Crece en los estados de Aguascalientes, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Estado de México, Guerrero, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis

Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Zacatecas, Chiapas, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo. Aunque es originaria de México, también se da en Texas, Estados Unidos y en los países de El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Las Antillas, Bolivia, Ecuador, Colombia, Perú, Brasil y Venezuela (CONABIO 2011) (figura 9).



Figura 9 *Tecoma stans*

Nicotiana Glauca. Arbustos o árboles pequeños, de crecimiento rápido, de 2 a 6 metros de altura y madera blanda; los tallos son verdosos o purpúreos; las hojas son elípticas, de 5 a 25 centímetros de altura, con textura semejante al caucho; la inflorescencia es paniculada, hasta de 20 centímetros de largo; las flores tienen un cáliz cilíndrico, miden de 10 a 15 milímetros de longitud; el fruto es una cápsula parda, elipsoide, de 7 a 15 milímetros de longitud; semillas angulares, pardas. Es nativa del norte de Argentina y Bolivia. Se encuentra en Sudamérica, las Antillas, Hawaii, sur de los Estados Unidos, partes secas de Europa y ampliamente distribuida en México. Se desarrolla normalmente entre 1700 y 2300 metros sobre el nivel del mar. Se ha observado en los estados de Guanajuato, Hidalgo, Morelos, Tamaulipas, Aguascalientes, Chihuahua, Baja California, Guerrero, Puebla, Tlaxcala, Querétaro, Durango, Jalisco, Michoacán, Sonora, Oaxaca, Sinaloa, Coahuila, Nuevo León, Estado de México, Distrito Federal y San Luis Potosí (INE 2011) (figura 10).

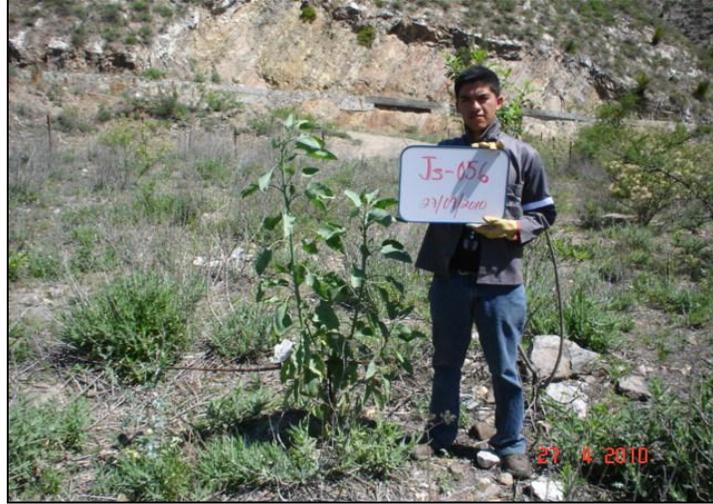


Figura 10 Nicotiana glauca

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Rehabilitación de presas de jales

A lo largo de todo el mundo, los depósitos de residuos mineros constituyen una preocupación latente. La importancia del cierre de una presa de jales radica en dos aspectos relevantes: evitar la dispersión del jal y garantizar la estabilidad del depósito.

En México existen cientos de depósitos, debido a la gran tradición minera del país, de los cuales no se tiene un registro completo e incluso ya son parte del día a día de muchas comunidades como en Taxco Guerrero, Zimapán Hidalgo, Santa María de la Paz en San Luis Potosí y en Guanajuato, Guanajuato (Santos Jallath 2009).

Rehabilitar las presas de jales, aunque esto representa un costo elevado, es importante debido a la peligrosidad que pueden llegar a representar. Comúnmente, las empresas las recubren con diferentes materiales, entre ellos existen los geotextiles, las arcillas, suelo con materia orgánica, materiales neutralizantes (roca caliza), agua y la combinación de los anteriores (Santos Jallath 2009).

Los gobiernos de los países donde la minería es una actividad importante, se han dado a la tarea de realizar guías y normas para todo lo que involucra la construcción, cierre y rehabilitación de las presas de jales. Abarcan los criterios para seleccionar el sitio, la caracterización del jal, cómo debe de operarse de la mejor manera, el control del agua y finalmente el cierre del depósito. Los países que marcan vanguardia en estas guías, son aquellos con una minería de primer mundo como Australia, Canadá y Estados Unidos. Estos documentos han servido como base para desarrollar los documentos normativos de otros países.

Las leyes que regulan la minería en Canadá corresponden a cada provincia, excepto las que corresponden al uranio, las cuales son regidas por el gobierno federal. En general, la Asociación de Minería de Canadá (MAC, por sus siglas en inglés), ha creado distintos programas y guías para que la comunidad minera de ese país maneje de la mejor manera posible sus jales. Uno de los programas es el MEND (Mine Effluent Neutral Drainage), que ayuda a prevenir y mitigar el problema de drenaje ácido en minas y sus residuos. Otro programa interesante es el NOAMI (National Orphaned and Abandoned Mines Initiative), el cual consiste en recabar información acerca de aquellas minas abandonadas de las cuales ya no existe el dueño, no puede ser encontrado o no tienen el dinero para remediar estos sitio, lo que haría que el gobierno, sociedad y empresas tomaran una decisión correcta acerca de qué hacer con estas minas (MAC 2009) (NO/AMI 2011) (MEND 2011).

Uno de los documentos que la MAC ha publicado es llamado “Guía para el manejo de presas de jales” (MAC 1998) el cual es, en su mayoría, una lista de todos los aspectos que hay que revisar para la construcción y operación del depósito. Otro documento expedido por esta asociación es “Guía para auditar y evaluar el manejo de las presas de jales” (MAC 2009), cuyo propósito es proveer los protocolos para auditar y evaluar el manejo de la presa conforme a lo que dicta el primer documento.

En Australia se tiene más de una guía, debido a que cada gobierno interno rige con sus propias normas la construcción de estos depósitos, además de que su Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) tiene su propia guía, así como el Consejo de Minerales de Australia. En estos documentos, se hace un énfasis importante en tener una estrategia para el cierre de la presa. Como recomendación hacen énfasis en la aplicación de un cierre continuo, es decir, a la par con la operación del depósito. Para el cierre se debe de

diseñar una cubierta acorde con las características del jal, así como de la topografía, la hidrogeología, la geotecnia y el clima de la zona. Además, debe de permitir la posterior revegetación y el subsecuente manejo del depósito. Después, se debe continuar con el recubrimiento con vegetación, el cual tiene que ser elegido de acuerdo al uso potencial del depósito, teniendo en cuenta que las plantas elegidas no comprometan la estabilidad de la presa, además que tienen que ser especies endémicas de preferencia. Por último, aclara cómo y qué aspectos deben de monitorearse en el depósito como son: el rendimiento de la vegetación, el control del drenaje, el control de la erosión, la calidad del agua subterránea y la filtración (EPA 1995) (DME 2005) (MCA 2003).

En Estados Unidos de América, la EPA (Environmental Protection Agency) es la agencia gubernamental que se encarga de realizar las guías para la protección del ambiente, incluyendo las que conciernen a la minería. Este organismo tiene una publicación llamada “Caracterización y limpieza de minas abandonadas” (Abandoned mine site characterization and cleanup handbook) en donde primero se hace una revisión del impacto al ambiente causado por la minería, después trabaja en aspecto de qué metas se tienen que fijar para tener un buen resultado en la rehabilitación del sitio. Finalmente se llega a la parte donde se proponen las opciones de remediación, desde las convencionales hasta las nuevas (o emergentes). En las emergentes se hace mención del uso de plantas para la rehabilitación del sitio, aunque no insiste en el uso de plantas endémicas de la región.

En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de las presas de jales (SEMARNAT 2004), dicta las guías que deben de seguirse para todo lo relacionado con las presas de jales. En la primera parte de este documento se hace una descripción de cómo debe de construirse y operarse, para después comenzar con la parte de cómo llevar el depósito a la post-operación. Según la norma, en su apartado 5.7, se deben implementar medidas para: evitar la emisión de partículas sólidas a la atmósfera, evitar escurrimientos que puedan afectar cuerpos de agua superficiales y subterráneos y por último, que la presa falle. Menciona las medidas que se deben de llevar a cabo si los jales son peligrosos, como establecer medidas que detengan la generación de drenaje ácido. Finalmente, es importante notar que esta NOM establece que la superficie del depósito debe ser cubierta con suelo recuperado o algún material en el que se puedan fijar especies vegetales, haciendo énfasis en que estas especies deben ser originarias de la región.

Así pues, es notable que la mayoría de las guías aconsejan cubrir el depósito de manera adecuada según la estrategia que se haya tomado en cuanto al uso posterior del depósito y, después, terminar de recubrir con vegetación de preferencia de la zona, para su estabilización física y, en algunos casos, pensando en tal vez una estabilización química, dependiendo de las características del jal.

En una presa de jales, lo importante es evitar la dispersión del jal y garantizar su estabilidad física y química, durante y después de la etapa de operación. Por eso, los criterios de selección del sitio, diseño y construcción, deben ser establecidos desde un principio, además de las medidas que deben tomarse para el cierre y clausura de los depósitos (Santos Jallath 2009).

La estabilización de una presa de jales consiste en mantenerla en el mismo lugar, con la mínima dispersión posible del jal, mantener fijos o remover por completo los elementos tóxicos que puedan movilizarse, evitar y

controlar la producción de drenaje ácido y rehabilitarla para un fin específico, desde reinsertarla como parte del paisaje hasta su utilización para la construcción de edificaciones.

Para estabilizar físicamente una presa de jales, se deben llevar a cabo diversas acciones. Una de ellas puede ser que sea necesario disminuir el ángulo del talud, pues puede ser causa de una falla y que la cortina de la presa se rompa. Normalmente, la acción más común es cubrir de algún material no reactivo la superficie del depósito, con el objetivo de reducir lo más posible la acción erosiva del viento y el agua, teniendo como desventaja que transportar el material puede llegar a ser muy caro (Tordoff, Baker y Willis 2000). Adicionalmente, son construidas obras para captación de agua antes de que entre a la presa, además de poner instrumentación para monitorear la estabilidad de la presa de jales.

Además de que el suelo cumpla con los objetivos antes mencionados, es de vital importancia que cumpla también con sus funciones naturales. En sí, es base para la vida y el hábitat; forma parte de los sistemas naturales al incluirse en ciclos como el del agua, el carbono, el nitrógeno, el fósforo, etc., además de ser un medio para la descomposición, balance y restauración como resultado de la filtración, amortiguamiento y convertidor de propiedades de muchas sustancias. Estas funciones se esperan sean también desarrolladas al momento de recubrir el depósito de residuos. Como resultado del contacto que tiene con el depósito, el suelo puede perder parcialmente estas funciones debido a la existencia de uno o más contaminantes, ciertamente el grado en que se pierdan estas funciones dependerá del tipo de contaminantes, la concentración, las propiedades del suelo y de cuál sea su uso (Wise 2000).

La estabilización química consiste en evitar, controlar y, en caso de que exista, neutralizar el drenaje ácido, así como la liberación de elementos tóxicos para el ambiente. Normalmente, son utilizados materiales consumidores de ácido como la roca caliza, lo que también ayuda a disminuir la liberación de una mayor cantidad de elementos tóxicos.

La vegetación ayuda a la estabilización tanto física como química. Es muy efectiva reduciendo la erosión, también regresa gran parte del agua infiltrada en el suelo hacia la atmósfera por medio de la transpiración, lo que reduce las concentraciones de metales solubles. Por otro lado, ayuda a reducir el impacto visual creado por el depósito de los residuos mineros. Aunque la revegetación es deseable, la realidad es que los residuos mineros son ambientes muy desfavorables para las plantas debido a su gran contenido de metales pesados, las deficiencias de macronutrientes y la pobre estructura del substrato (Tordoff, Baker y Willis 2000).

Posterior al recubrimiento con suelo vegetal, del cual se pone solo una capa superficial con suficiente espesor para que la planta pueda empezar a crecer, se pretende que las especies que crecen en estos suelos estabilicen físicamente los depósitos evitando la erosión de los mismos. Al estar en contacto los suelos fértiles con los depósitos de residuos, existe una mezcla de ambos debido a la acción del ambiente, además de que al crecer la planta extiende sus raíces, comenzando a tomar elementos que están en esa mezcla y en el depósito de residuos.

La vegetación también depende de la capa orgánica. Ésta es un medio de crecimiento de la vegetación que ha probado catalizarlo, por lo cual debe caracterizarse y preservar sus parámetros físicos y químicos. Cuando los suelos originales son muy pobres en nutrientes y no poseen las características adecuadas para sostener una cubierta vegetal, entonces se requiere mejorar sus propiedades o emplear sustratos alternativos (Jiménez 2006).

Existen diferentes maneras de revegetar un depósito de residuos mineros. Si la cubierta de suelos contiene bajas cantidades de metales pesados, pueden ser sembradas plantas comerciales, con la opción de utilizar fertilizantes para asegurar el crecimiento de la vegetación. Otra manera es trasplantar o sembrar plantas nativas de la zona, pues estas están acopladas al clima de la región, lo que es una ventaja, pues puede ahorrarse la acción de regarlas (Tordoff, Baker y Willis 2000).

La siguiente opción es la siembra de plantas tolerantes a metales pesados. Este tipo de plantas también crecen en suelos no contaminados y han sido estudiadas en muchos lugares, como se verá más adelante. El método es económico y, si es necesario, se pueden utilizar fertilizantes, sin mencionar que muchas de estas plantas se adaptan fácilmente al ambiente hostil de estos sitios y a la sequía. El ciclo de crecimiento de estas especies debe ser estudiado para que al momento de promover la vegetación, tengan el tiempo suficiente para su crecimiento, esto con el objetivo de que las raíces unan el substrato de una manera eficiente (Tordoff, Baker y Willis 2000).

3.2. Acumulación de metales en plantas que crecen en depósitos de residuos mineros

En los depósitos de residuos existen una gran cantidad de elementos que pueden ser, ya sea por la forma en la que se encuentren o la concentración, potencialmente peligrosos para el medio ambiente. Estos elementos pueden ser movilizados por acción del intemperismo o por lixiviación, aunque su liberación puede aumentar cuando se presentan cambios mineralógicos, físicos o químicos (Marguí, et al. 2007). El manejo de estos sitios por métodos convencionales para la reducción de metales pesados puede llegar a ser extremadamente caro e incluso, llevaría mucho tiempo realizarla (Carrillo González and González Chávez 2006).

No es nueva la idea de que las plantas pueden acumular metales, pues mineros del siglo XIX buscaban yacimientos minerales guiándose por los campos donde crecía una planta que era tolerante al cobre (Evangelou, Ebel y Schaeffer 2007). Hoy en día, ha resultado de interés para la comunidad científica saber qué pasa con las plantas que crecen en suelos contaminados por metales pesados. Se han realizado muchos estudios sobre estas plantas en numerosos países (Italia, China, Canadá, España y Estados Unidos de América, entre otros) en donde se pretende saber qué cantidad de contaminantes toman del suelo, qué afecta esa capacidad y cómo es que puede encontrarse una aplicación para esta característica.

Por sí mismas, las plantas toman del suelo los nutrientes, entre ellos metales necesarios para su crecimiento (Mn, Cu, Co, Fe, Mo, etc.) aunque también toman aquellos que no necesitan y son agregados a su estructura de igual manera (As, Cd, Pb, etc.).

Esta capacidad de las plantas es denominada fitoextracción y se ha venido estudiando teniendo como base estudios de los años ochenta sobre la tolerancia de las plantas para con los metales, lo que dio paso a pensar que podrían utilizarse las plantas para extraer contaminantes del suelo. La definición de fitoextracción es la capacidad de la planta para tomar del suelo elementos y llevarlos a sus partes aéreas (Marchiol , et al. 2004) (Wise 2000) (Brunetti, et al. 2011) (Carrillo González and González Chávez 2006). Estas plantas son exitosas en muchos lugares debido a que por las condiciones difíciles donde crecen, no tienen competencia y muchas veces tampoco tienen depredadores naturales.

La idea de hacerlo a gran escala ha estado latente desde hace algunos años, pues podría tenerse una técnica barata y a largo plazo para remediar suelos contaminados denominada fitorremediación. La fitorremediación es una tecnología basada en plantas que permite ya sea volatilizar, estabilizar, degradar, extraer o inactivar contaminantes en el suelo. Además del uso de la fitoextracción por parte de la fitorremediación, esta última utiliza otra estrategia denominada fitoestabilización, que consiste en reducir la peligrosidad y la biodisponibilidad del contaminante, sin necesidad de removerlo (Carrillo González and González Chávez 2006).

El problema surge cuando se requiere una planta para llevar a cabo esta técnica. Para que pueda ejercerse de manera práctica y conveniente, se debe encontrar una planta que sea tolerante a los contaminantes, que los acumule y que produzca de manera rápida gran cantidad de biomasa (Marchiol , et al. 2004) (Wise 2000). En diversas investigaciones se han encontrado especies que son tolerantes a concentraciones altas de diversos contaminantes, plantas que los acumulan en grandes cantidades (hiperacumuladoras) y plantas que producen una gran cantidad de biomasa de manera rápida.

Una planta hiperacumuladora según (Evangelou, Ebel y Schaeffer 2007) Evangelou, *et al* (2007) debe acumular al menos 100 mg kg^{-1} (0.01% peso seco) de Cd, As y otros elementos traza; 1000 mg kg^{-1} de Co, Cu, Cr, Ni y Pb (0.1% del peso seco) y por último 10000 mg kg^{-1} de Mn y Ni (1% peso seco). Existe una pequeña diferencia con Terry y Boñuelos (2000) pues este autor utiliza un criterio de 0.01% en peso seco de Cd, 0.1% en peso seco de Co, Cu, Pb y Ni y por ultimo 1% para Mn y Zn. Las especies de plantas que son hiperacumuladoras deben tener procesos más eficientes que las acumuladoras normales para tomar los metales del suelo, aunque no se sabe a ciencia cierta qué es lo que sucede en los órganos de las plantas. La hiperacumulación es resultado de un largo proceso de evolución y adaptación a su entorno, además de que es consecuencia del proceso de fitoextracción de la planta.

Existen dos tipos de fitoextracción: la fitoextracción “inducida” y la fitoextracción continua. La primera intenta hacer que las plantas absorban los contaminantes del suelo agregando quelatos, los cuales aumentan la biodisponibilidad del metal y provocan que la planta absorban en mayor cantidad los metales. La segunda consiste en dejar que la planta comience a tomar los contaminantes por sí misma desde el momento de su crecimiento, aunque la limitación de este tipo de fitoextracción es que la planta solo tomaría la fracción biodisponible del suelo.

La fitorremediación sólo podría utilizarse con plantas que sean tolerantes y además que acumulen metales de manera importante, pues ciertas especies pueden presentar tolerancia pero no acumular metales. Aún no se ha comprobado que haya alguna relación entre tolerancia a los metales y su acumulación. Esto da una ventaja a las poblaciones de plantas tolerantes y/o acumuladoras debido a que en lugares con altas concentraciones de metales tienen menor competencia, pudiendo ser inclusive las únicas en crecer en estas condiciones. Es también importante recalcar que una planta hiperacumuladora es tolerante a metales pesados. Taxonómicamente, la exclusión de metales es la técnica más utilizada por las plantas, por lo que la hiperacumulación es la minoría (Terry y Boñuelos, 2000).

En los últimos años se han estudiado diversas especies que acumulan metales, algunos de estos estudios se han realizado en plantas que crecen en depósitos de residuos mineros, lo que abre puertas para aprovechar la fitoextracción en lugares contaminados con metales pesados.

Margui, *et al* (2007), estudió el comportamiento de la especie *Betula pendula* la cual creció espontáneamente en depósitos de jales abandonados, los cuales fueron el resultado de la concentración de minerales de Pb-Zn en el norte de España. Las extracciones realizadas a los jales dieron como resultado que la fracción soluble era de entre 650 a 27000 mg kg⁻¹ para el Zn y de entre 195 a 20000 mg kg⁻¹ para el Pb. Fue comprobado que hubo un proceso de acumulación de metales por esta especie, particularmente de Zn donde se mostraban concentraciones de hasta 3100 mg kg⁻¹. El Pb también mostraba importantes concentraciones de hasta 530 mg kg⁻¹.

Por otro lado, en Corea del Sur, (Peichun, Ju-Yong and Kyoung-Woong 2005), estudió plantas que crecían en depósitos de residuos mineros de dos minas diferentes de Au-Ag. Se observó que la especie *Populus davidiana* tenía potencial para ser utilizada como una posible planta para revegetar estos sitios debido a su tolerancia a los metales pesados, a su resistencia a pH ácidos (entre 3 y 4), a su buena acumulación de Cd y Zn (7.1 mg kg⁻¹ y 499 mg kg⁻¹ respectivamente), su capacidad para crecer rápidamente y con una buena cantidad de biomasa.

En Tailandia también se llevó a cabo un estudio en el suelo de los Distritos de Ron Phibun y Banaang Sata, en donde existe una gran cantidad de contaminación por As asociado a la explotación de Sn. Se muestrearon 36 plantas en total, de las cuales solo se encontró que dos especies fueron hiperacumuladoras: la especie *Pityrogramma calomelanos* y la especie *Pteris vittata*. La primera acumuló por encima de 8000 microgramos de As por gramo, mientras que la segunda por encima de 6000 microgramos por gramo. Por tanto, se presentan estas dos especies como posibles candidatas para fitoremediar la zona, debido a su capacidad para acumular el As, su excelente habilidad de propagación, su buena frecuencia de distribución y su buen desempeño en producción de biomasa (Visoottiviset, Francesconib y Sridokchana 2002).

Carrillo y González (2006), encontraron más de 70 especies entre nativas e introducidas en lugares contaminados con metales cerca de zonas mineras de Zacatecas, México. En este estudio, la planta que demostró la mayor eficiencia en cuanto a concentración de metales fue la especie *Polygonum aviculare*, la cual acumuló buenas cantidades de Zn (hasta 9230 mg kg⁻¹), teniendo en cuenta que crece muy rápido y un buen crecimiento de biomasa.

Otros estudios, aunque no han sido realizados en residuos mineros, han demostrado que diferentes especies de plantas como *Sesuvium portulacastrum* y *Brassica juncea* (Zaier *et al*, 2010), *Thlaspi caerulescens* (Liu Mei-Quing, *et al.*, 2008; Maxted, *et al.*, 2007; Pongrac, *et al.*, 2009; Yanai, *et al.*, 2006), *Brassica napis* y *Raphanus sativus* (Marchiol, *et al.* 2004), entre otras, acumulan metales de manera importante. Terry y Boñuelos (2000), mencionan diferentes plantas hiperacumuladoras para Ni, Zn, Pb, Cd, Cu, Co y Mn, además de las cantidades que llegan a acumular.

3.3. Movilidad de los metales asociada a las plantas

Las plantas han desarrollado un complejo conjunto de mecanismos para incrementar la disponibilidad de elementos trazas esenciales (micronutrientes) en la rizósfera y transportar estos metales a sus raíces para asegurar el suministro de los mismos. Sin embargo, a altas concentraciones, muchos de estos micronutrientes esenciales potencialmente son tóxicos para las plantas.

Se cree que estos mecanismos de regulación han sido desarrollados a través de generaciones de plantas, heredándose capacidades diferentes. Estos mecanismos de adaptación, aún no confirmados, pueden estar ligados a la autoprotección de las especies en contra de hongos, insectos, depredación por animales, a la adaptación de la planta a su entorno haciéndose tolerante, etc.

Los mecanismos que intervienen en la fitoextracción continua aun no son bien conocidos, aunque se han propuesto algunos como son (Wise 2000):

- Interacciones rizosféricas entre la raíz y el suelo, en donde se cree que las especies hiperacumuladoras producen la solubilización de los contaminantes.
- La toma del contaminante por la raíz, en donde se ha sugerido que las especies hiperacumuladoras contienen muchos más transportadores de iones que las no acumuladoras y que incluso ciertas especies tienen una selectividad marcada asociada tal vez a el transporte de metales a través del plasma de las células de la raíz, ya sea durante la toma del metal o durante su transporte hacia el xilema de la planta.
- La traslocación del metal de la raíz a la planta, en el cual se piensa que existe un intercambio iónico en el xilema y que también depende del volumen de flujo por el mismo.
- Por último, el metal es introducido a la célula de las partes aéreas de la planta, en donde se cree que la vacuola juega un importante papel en la retención del metal, sobre todo en las especies hiperacumuladoras.

Los iones libres de metales son los capaces de atravesar las membranas biológicas. Como consecuencia, la disponibilidad y la toxicidad son funciones que la química del agua (especiación) determina, así como la actividad de los iones metálicos libres. Aparte de esta especiación, las interacciones químicas también determinan las particiones de los enlaces metálicos a las superficies del suelo, de la fase sólida a la fase en solución (Peijnenburg y Jager 2003).

En plantas hiperacumuladoras, las concentraciones de los metales pueden sobrepasar 1% del peso seco de la planta sin ningún efecto adverso en su crecimiento (Terry y Boñuelos 2000). Esto implica que existen mecanismos de detoxificación en la planta, comúnmente asignados a la formación de complejos que alejan al metal del metabolismo de sus células, como se mencionó anteriormente, esto se cree es controlado por la vacuola de la célula.

Este proceso dentro de la célula se cree es llevado a cabo por diferentes sustancias, las cuales se ha descubierto, forman complejos metálicos. Un ejemplo es el Citrato el cual forma complejos con el aluminio en la planta hiperacumuladora *Hydrangea macrophylla* o el ácido málico que está relacionado con el grado de resistencia del Zn en diferentes especies tolerantes al Zn (Terry y Boñuelos, 2000).

Los organismos y las plantas pueden modificar de manera considerable la química del suelo y de la rizósfera. Entre los diversos efectos se encuentran (Peijnenburg y Jager 2003):

- Movimiento de contaminantes adicionales hacia la rizósfera como resultado de un flujo convectivo de la solución hacia las raíces.

- Cambios en la química de la solución inducidos por la planta y por organismos, los cuales afectan la sorción, como cambios en el pH, en la fuerza de los iones y en la concentración de los micronutrientes en forma de cationes.
- Excreciones de ligaduras orgánicas que afectan la concentración total del metal en solución dependiendo de la capacidad de amortiguamiento en la solución del suelo.
- Generación de una nueva superficie de sorción para metales.
- Estimulación de la actividad bacteriana.

Los microorganismos juegan también un papel muy importante en el sistema planta-suelo. Las bacterias asociadas a la raíz estimulan el desarrollo de las plantas a través de la fijación del nitrógeno, la mineralización de los restos orgánicos y la protección contra patógenos (González Ramírez 2005). Estas bacterias han desarrollado, al igual que las plantas, distintos mecanismos de resistencia al exceso de metales pesados en su ambiente como la sorción o la transformación de los metales a formas menos tóxicas, por ejemplo, produciendo quelatantes de metales. Esto puede causar que uno o más metales se encuentren de manera más disponible para que la planta pueda tomarlos, que sean más o menos solubles en agua o que formen especies más estables y resistentes al intemperismo.

Entre éstas, las bacterias que pueden ayudar a la estabilización de diferentes contaminantes, podemos destacar los generos *Bacillus*, *Enterobacter*, *Alcaligenes*, *Citrobacter* y *Pseudomonas*, entre otros (González Ramírez 2005).

El género *Pseudomona* es utilizado comúnmente para la degradación de hidrocarburos, debido a que produce biosurfactantes, lo que solubiliza y facilita la penetración de los hidrocarburos a través de la pared celular, además de que producen enzimas degradadoras de hidrocarburos en la membrana citoplasmática (Benavides, 2006). Ejemplos de especies de este género son la *Pseudomona putida*, la *Pseudomona fluorescens* y *Pseudomona aeruginosa*, entre otras.

Otras bacterias, aumentan la producción de agentes quelatantes en presencia de ciertos metales. Por ejemplo, la producción de sideróforos (agentes quelatantes afines al Fe³⁺) incrementa en la bacteria *Bacillus megaterium* en presencia de cobre, cromato, cadmio, zinc y aluminio; para la especie *Pseudomona aeruginosa* la producción de sideróforos aumenta en presencia de zinc, cadmio, níquel y aluminio. El porqué de este aumento en los sideróforos con respecto a ciertos metales aún no se ha explicado de manera certera, sin embargo se cree que el metal puede estar directamente involucrado en la biosíntesis del sideróforos o su regulación. Otra teoría propone que la concentración de sideróforos libres en el medio puede ser reducida por la formación de complejos con iones metálicos diferentes al Fe (III), por lo que esta limitación de hierro estimula la producción de sideróforos.

3.4. Geodisponibilidad y biodisponibilidad

En el suelo se encuentran distintos elementos químicos que varían en concentración dependiendo de la zona en donde se encuentra el suelo, pues distintos factores afectan su composición. Estos se movilizan por procesos

físicos, químicos y biológicos. En solución, se desplazan como cationes, aniones y complejos iónicos (Siegel 2002).

Comúnmente, los metales pesados se incorporan a las fases orgánicas e inorgánicas del suelo o son absorbidas/adsorbidas por ellas. La acumulación de estos metales por encima de las concentraciones normales del suelo puede causar niveles tóxicos para la vida que se desarrolla en dicho sitio. Si estos elementos están disponibles para que los organismos los tomen, pueden comenzar a acumularlos hasta niveles que los afecten e incluso, puedan llegar a causarles la muerte.

La presencia de metales pesados en suelos o cuerpos de agua depende de diversos factores ambientales que controlan su solubilidad, movilización y precipitación, principalmente el pH y las condiciones oxidantes o reductoras del medio. Estos factores varían dependiendo de las zonas donde se encuentren, haciendo que cada ecosistema tenga combinaciones de factores únicas y, por ende, las condiciones de cada metal sean diferentes, cambiando incluso entre los nichos del mismo ecosistema.

Los metales que se mueven en solución comúnmente son movilizados en forma catiónica (e.g., Cu^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , etc.) o como complejos iónicos (e.g., H_2AsO_3^- , HgCl_4^{2-}) (Siegel 2002). Cuando un metal pesado se encuentra disponible en el suelo para su solubilización, se dice que está geodisponible. La geodisponibilidad está definida como la fracción soluble de un contaminante en agua. Esta fracción es muy importante porque los metales geodisponibles son disueltos en agua y pueden ser movilizados por muchos kilómetros afectando extensas zonas.

Los parámetros más importantes que afectan la movilidad de los metales son el pH, el potencial de óxido-reducción, la temperatura y los procesos bacterianos. Otros parámetros que afectan esta movilidad son la textura del suelo, la composición de su matriz y la actividad de los organismos, entre otras (Siegel 2002). A su vez, la variación de estos parámetros en algún momento puede causar una variación entre ellos mismos, causando que la geodisponibilidad del metal aumente o disminuya.

No todos los elementos son movilizados en el mismo rango de valores de pH. Algunos son solubilizados en ambientes básicos y otros en ambientes ácidos. Como ejemplo tenemos que el Cu y el Zn no responden a pH básico, mientras que el Mo sí lo hace. Incluso aquellos que se movilizan en ambientes ácidos y/o básicos difieren entre sí. Por ejemplo el Cd comienza a incrementar su solubilidad en pH menor a 6, mientras que el Zn comienza a hacerlo a pH menor a 5. De igual manera, en un ambiente reductor pueden ser removidos metales como el As o el Mo, pero estabilizando a otros. Estas variaciones entre pH y Eh (potencial redox) juegan un papel importante pues pueden aumentar o disminuir la geodisponibilidad. Por ejemplo, la movilidad del As aumenta cuando el Eh es reductor y el pH es ácido mientras que el Cd, Hg y Pb se hacen más solubles cuando el Eh es más oxidante y el pH más ácido (Siegel 2002). La temperatura juega también un papel importante, pues muchos compuestos son más solubles en aguas cálidas, lo que aumenta la concentración de dichos compuestos en el agua. Finalmente, la actividad bacteriana es otro factor que influye en la solubilidad. Las bacterias, además de poder hacer a un metal más disponible al ambiente, tienen un rol en cada ecosistema que incluyen complejas reacciones bioquímicas que controlan sus procesos fisiológicos y tienen un impacto en la calidad del agua. Por ejemplo, las algas que tienen una estrecha relación con respecto al oxígeno disuelto en las aguas de los ríos, lagos y estuarios.

Siendo movilizados los metales pesados por cualquier combinación de factores, pueden ser tomados por los seres vivos del entorno. A esto se le llama fracción biodisponible, que estrictamente hablando, es la fracción de la concentración total de un elemento químico presente en un ambiente específico que, en un lapso de tiempo, puede estar disponible o ser hecho disponible por organismos o plantas para su absorción directamente desde sus alrededores (Hund-Rinke y Kördel 2003).

Cuando los organismos y/o plantas toman estos elementos pueden acumularlos hasta el punto de ponerlos en peligro. Incluso estos elementos ingresan en la cadena trófica y no solo afectan al organismo que lo tomó, sino incluso al organismo de jerarquía más alta del ecosistema, produciéndose un ciclo, pues cuando estos organismos mueren, los metales pesados contenidos en ellos regresan al ecosistema y pueden ser vueltos a tomar por otros organismos.

La biodisponibilidad de los metales es afectada por muchas condiciones, cambiando de ecosistema a ecosistema e incluso, entre nichos de uno mismo. Ejemplo de estas condiciones son (Hund-Rinke y Kördel 2003):

- Sorción y enlazamiento a los constituyentes del suelo y a la matriz de los sedimentos, como arcillas, materia orgánica y óxidos.
- Condiciones del suelo y de los sedimentos, como condiciones redox, valor del pH y concentración en la muestra.
- La composición actual del suelo y del agua en los poros de los sedimentos, incluyendo el valor del pH, el contenido de materia orgánica disuelta, los agentes complejantes y la composición de los aniones y cationes que interfieran.
- Dependencia de las especies para la regulación de los mecanismos para la absorción, excreción y almacenamiento.
- Especiación de los metales.
- Ruta de absorción y hábitats específicos de las especies de prueba.

3.5. Bioaccesibilidad

Una característica de los metales es que difieren totalmente en su reactividad, lo que puede influir en la manera en que se conforman las especies de los mismos, además de que esto influye en la disponibilidad que tengan en el suelo para ser tomados por los organismos. El mayor peligro que podrían presentar estos contaminantes es que sean incluidos a las cadenas alimenticias e incluso llegar al hombre.

Cuando el metal finalmente ha llegado a la cadena alimenticia, es necesario saber qué es lo que pasa con el mismo durante su camino por el tracto digestivo del organismo que lo tomó. Pudiera ser que el metal fuera en menor o mayor proporción absorbido por el metabolismo del organismo y esto causarle algún problema de salud. A esto se le conoce como bioaccesibilidad de un contaminante y estrictamente se define como la fracción de la concentración total del contaminante presente en comida, agua o suelos ingeridos y que es soluble en el tracto gastrointestinal y está disponible para su absorción (Girouard y Zagury 2009) (Poggio, et al. 2009) (Peijnenburg y Jager 2003) (Intawongse y Dean 2008). Esta fracción es considerada representativa de la cantidad máxima de contaminante disponible para la absorción intestinal, siendo así transferida al torrente sanguíneo.

La bioaccesibilidad puede ser afectada por diferentes condiciones. Un ejemplo de esto es el valor del pH en cada parte del tracto digestivo, por lo que también varía el valor de la bioaccesibilidad dependiendo del organismo que absorba el metal. Otra condicionante es que si existe comida en el tracto digestivo, puede aumentar el periodo de disolución, lo que es importante para muchos compuestos en los que la disolución es una limitación de la velocidad a la que puede ser liberado. Otro factor que afecta la bioaccesibilidad es el flujo y concentración de los jugos gástricos que pudiera aumentar o disminuir la solubilización del metal (Peijnenburg y Jager 2003). Otros factores que pueden condicionar el valor de bioaccesibilidad son las características del suelo como el tamaño de partícula, el contenido de materia orgánica y qué tan solubles son los metales en agua, además de otros (Girouard y Zagury 2009).

Existen diferentes pruebas para determinar la bioaccesibilidad, las cuales son divididas en pruebas *In vivo* y pruebas *In Vitro*. Las pruebas *In vivo* consisten en ocupar animales vivos, aunque son difíciles de llevar a cabo por algunas variables que no son tan fáciles de controlar, además de que son caras y llevan mucho tiempo, sin mencionar que los animales utilizados tienen un metabolismo completamente diferente al de los humanos. Las pruebas *In vitro* son llevadas a cabo en laboratorios con métodos de extracción estandarizados, estas van desde la extracción simple o pruebas de lixiviación a pruebas avanzadas con múltiples pasos que simulan la digestión humana a detalle. Las extracciones *In vitro* son hechas simulando jugos gástricos e intestinales aplicados a las muestras para predecir la disponibilidad de los metales para la absorción humana (Intawongse y Dean 2008).

En muchos estudios alrededor del mundo como Italia (Poggio, et al. 2009), Canadá (Girouard y Zagury 2009) y Reino Unido (Turner y Simmonds 2000) se ha evaluado la bioaccesibilidad de metales en los suelos.

Además, diferentes estudios sobre los riesgos en la salud humana sugieren que las extracciones con ácidos fuertes proveen una buena predicción de la asimilación del estómago humano, pues simulan las condiciones del mismo (Poggio, et al. 2009). Estas técnicas son denominadas “pruebas de extracción con base fisiológica” o PBET (Physiologically Based Extraction Tests) por sus siglas en inglés. Lo que se proponen es medir la fracción de metal que es solubilizada de una muestra en una simulación bajo condiciones gastrointestinales y por tanto, cuál es la fracción disponible para la absorción.

Las mediciones de la bioaccesibilidad son normalmente reportadas como bioaccesibilidad relativa expresada como un porcentaje y calculada por digestión de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Bioaccesibilidad \%} = \frac{\text{Metal movilizado de la muestra de planta durante la digestión}}{\text{Metal presente en la planta antes de la digestión}} \times 100$$

(Intawongse y Dean 2008).

Una característica de las pruebas de extracción para bioaccesibilidad, es que se utiliza un tamaño de partícula que es generalmente <250 micras (malla 60), debido a que se ha comprobado que esta fracción se adhiere más a los dedos de los niños y por lo tanto, es más propenso a ingestión por niños pequeños (Girouard y Zagury 2009).

4. TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1. Muestreo

El objetivo del muestreo fue recolectar plantas y suelos en las presas 1, 2 y 3, teniendo como condición que las tres especies y el sustrato de suelo se encontraran en una zona común, es decir, en un radio de máximo 8 metros, esto para determinar las concentraciones promedio de metales en el suelo a las que están expuestas las tres plantas en esa zona.

Las especies *Flaveria pubescens*, *Tecoma stans* y *Nicotiana glauca* fueron elegidas como las especies a muestrear, ya que en los estudios previos se encontraron como plantas que acumulan en buena cantidad metales pesados y además son nativas de la región (Rodríguez Cruz 2010).

Se hizo el muestreo en dos cuadrillas para cubrir una mayor área en la búsqueda de las especies. Para etiquetar las muestras, se comenzó con una nomenclatura consecutiva que anteriormente había sido establecida para evitar confusiones con otras muestras del proyecto. En cada muestra recolectada, se tomó su ubicación (latitud y longitud) utilizando un GPS, para más tarde localizar las muestras en un mapa, con un error de $\pm 4\text{m}$ como máximo (figura 11).



Figura 11 Toma de coordenadas con GPS

Cada especie fue cortada desde el tallo, incluyendo hojas y flor y separando la raíz, en aquellos casos donde se extrajo. El muestreo de las plantas se realizó con unas tijeras de jardinero; ya cortada la planta fue envasada en una bolsa de plástico y etiquetada, dejando la bolsa abierta para dejarla respirar y que no se pudriera (figura 12). El sustrato (figura 14) fue tomado en varios puntos dentro de la zona de influencia de las tres especies muestreadas, para hacerlo representativo de la zona en común y fue tomado con palas de jardinero y envasado en bolsas de plástico, poniendo la etiqueta con marcador indeleble y cerrando la bolsa con grapas para su transporte (figura 13).



Figura 12 Recolección de muestras



Figura 13 Envasado de las muestras



Figura 14 Recolección de sustrato

Para la presa 1, se muestreó solo el talud, en donde se observó una gran cantidad de jal expuesto y oxidado, con abundancia de las tres especies estudiadas. Se tomaron en tres zonas diferentes, a las que se llamaron zona oriente, zona central y zona poniente; se decidió de esta manera debido a que se cubría la mayor parte del talud de la presa, tomando en cuenta que había gran cantidad de flora. En cada zona se tomaron las tres especies y

una muestra compuesta de sustrato, buscándose la zona de jal oxidado más expuesta y cercana a las tres especies. En la figura 15 se puede ver cómo fue distribuido el muestreo en la presa. En total se tomaron nueve muestras de plantas (tres especies por zona) y tres de suelos con jal como se observa en la tabla 4.

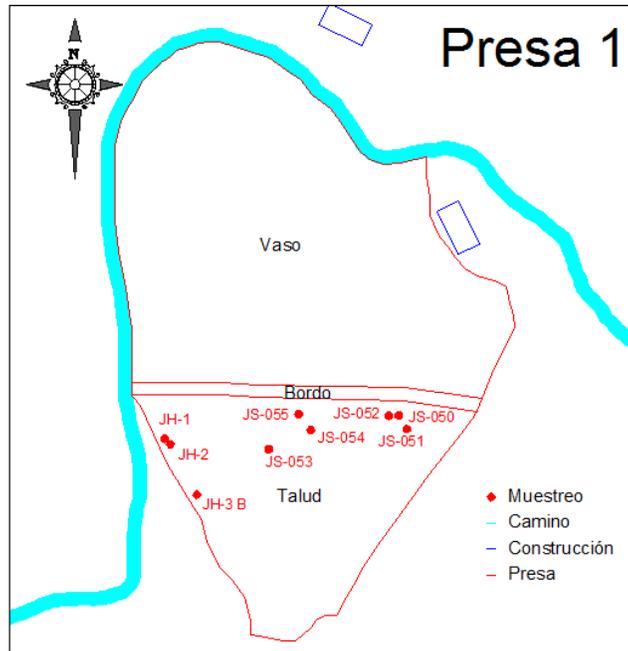


Figura 15 Distribución del muestreo en la presa 1

Para la presa 2, solo se tomaron en dos lugares del vaso, debido a que la presa es pequeña y no se encontraron las tres especies juntas. Se observó una gran cantidad de la especie *Flaveria pubescens*, en menor cantidad *Nicotiana glauca* y casi no hay presencia de *Tecoma stans*. Incluso, fue difícil encontrar un lugar donde se pudieran encontrar las tres especies, como se puede notar en la figura 16. De hecho, en el talud de la presa no se encontró muestra de *Tecoma stans*. En total se tomaron siete muestras de plantas y tres de suelo como se ve en la tabla 4.

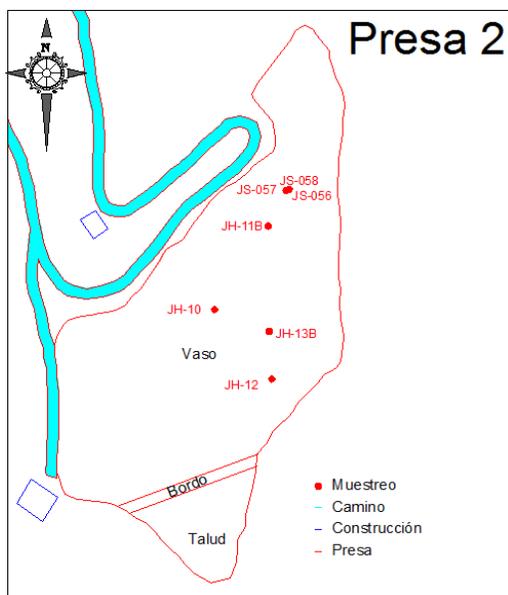


Figura 16 Distribución del muestreo en la presa 2

Para la presa 3, se tomaron muestras de las tres especies tanto en el vaso como en el talud, siendo seis para el primero y tres para el segundo (figura 17). De nuevo se pudo observar la predominancia de la especie *Flaveria pubescens*, con pocas especies de *Nicotiana glauca* y aún menos para la especie *Tecoma stans*. Al norte de esta presa, se pudo notar que aún se descargaba un poco de jales, por tanto en esa parte del vaso no se encontró ninguna planta pero, hacia los bordes se notó el crecimiento masivo de la especie *Flaveria pubescens*, siendo la única especie que crecía en este lugar. El muestreo está resumido en la tabla 4.

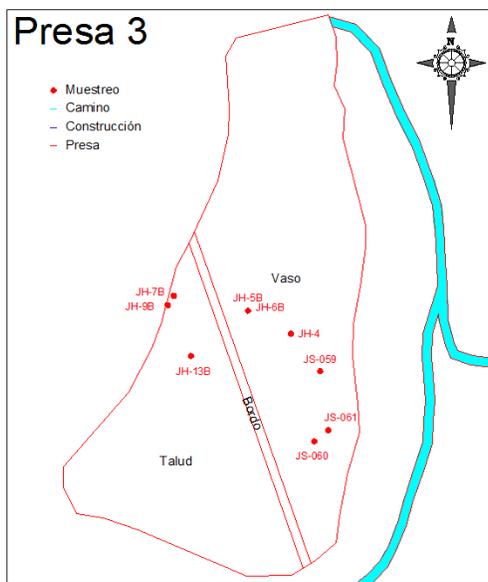


Figura 17 Distribución del muestreo en la presa 3

Tabla 4 Muestreo de especies y sustratos.

Depósito	Muestra	Especie	Suelo/jal	Observaciones
Presa 1	JS-050	<i>Nicotiana glauca</i>	JS-050	Zona oriente del talud
	JS-051	<i>Tecoma stans</i>		
	JS-052	<i>Flaveria pubescens</i>		
	JS-053	<i>Nicotiana glauca</i>	JS-055	Zona central del talud
	JS-054	<i>Tecoma stans</i>		
	JS-055	<i>Flaveria pubescens</i>		
	JH-1	<i>Tecoma stans</i>	JH-3-B	Zona poniente del talud
	JH-2	<i>Nicotiana glauca</i>		
	JH-3-B	<i>Flaveria pubescens</i>		
Presa 2	JS-056	<i>Nicotiana glauca</i>	JS-058	Zona norte del vaso
	JS-057	<i>Tecoma stans</i>		
	JS-058	<i>Flaveria pubescens</i>		
	JH-10	<i>Tecoma stans</i>	JH-11-B	Zona sur del vaso
	JH-11-B	<i>Flaveria pubescens</i>		
	JH-12	<i>Nicotiana glauca</i>	JH-13-B	Zona central del talud
	JH-13-B	<i>Flaveria pubescens</i>		
Presa 3	JS-059	<i>Nicotiana glauca</i>	JS-059	Zona centro del vaso
	JS-060	<i>Tecoma stans</i>	JS-060	Zona centro del vaso
	JS-061	<i>Flaveria pubescens</i>		
	JH-4	<i>Tecoma stans</i>	JH-5-B	Zona norte del vaso
	JH-5-B	<i>Nicotiana glauca</i>		
	JH-6-B	<i>Flaveria pubescens</i>		
	JH-7-B	<i>Tecoma stans</i>	JH-7-B	Zona norte del talud
	JH-8	<i>Nicotiana glauca</i>		
	JH-9-B	<i>Flaveria pubescens</i>		

4.2. Determinación de la concentración total en plantas y suelos

4.2.1. Preparación de las muestras

Las plantas, después de haber sido etiquetadas, fueron transportadas al Laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería. Se lavó cada una de ellas con agua de la llave para quitar rastros de polvo y/o jales y después se hicieron lavados con agua destilada. Posteriormente, se les quitó el exceso de agua con papel absorbente para después ser envueltas en papel estraza y secadas en un horno de convección modelo Precision Thelco Mod 27 durante semana y media a 50°C. Cuando estuvieron totalmente secas fueron empaquetadas de nuevo.

Al haber quitado el agua de las plantas, se inició con la molienda de las mismas. Se utilizó un molino para granos convencional. Cada planta fue molida en su totalidad incluyendo hojas, tallo y flor; la molienda se hizo en dos etapas para reducir el tamaño de la manera más uniforme posible. La planta molida era recolectada en una

charola de acero inoxidable y posteriormente con imanes se retiraba alguna rebaba de hierro que pudiera caer por acción del molino. Al terminar la molienda, cada muestra se empaquetó en una bolsa pequeña y se etiquetó. Entre una muestra y otra, el molino era lavado y secado para que no se tuviera algún problema de contaminación de las muestras.

Los suelos fueron homogeneizados y cuarteados para obtener una muestra representativa. Se les retiraron las gravas y posteriormente fueron molidos a -200 mallas en un mortero convencional de cerámica. Se molieron entre 30 y 20 g por muestra. Entre cada muestra, el mortero era lavado para evitar la contaminación entre muestras.

4.2.2. Determinación del pH en las muestras de suelo

La determinación del pH se realizó de acuerdo a la norma NOM-021-RECNAT-2000. El procedimiento consistió en tomar una muestra de suelo de 10 g y diluirla en 20 mL de agua destilada. Después de esto se agitó durante 30 minutos en intervalos de 5 minutos de agitación. Finalmente la solución se deja reposar durante 15 minutos y se realiza la medición del pH.

4.2.3. Digestiones

Las digestiones fueron llevadas a cabo en el Laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Para las plantas, el primer paso fue pesar 0.5g de cada planta en una balanza analítica marca OHAUS. Al terminar de pesarse, las muestras se vaciaron en vasos de teflón especiales para el carrusel del digestor. A estos tubos se agregaron 5 mL de agua deionizada, 1 mL de ácido nítrico y 0.5 mL de ácido clorhídrico. Posteriormente los tubos eran cerrados con una contratapa y una tapa con rosca a manera que quedaran totalmente sellados. Posteriormente, los tubos se colocaban en una camisa de fibra de vidrio y después acomodados en el carrusel que finalmente era introducido en el digestor marca CEM modelo Marsxpress. Al introducir el carrusel, era encendido y comenzaba a girar, durante diez minutos elevándose la temperatura hasta 130°C y después se mantenía durante media hora; por último se llevaba a cabo un enfriamiento de 5 minutos. Cabe mencionar que por cada 5 muestras se hacía un duplicado escogido aleatoriamente y también un blanco de control por cada carrusel introducido al digestor. Cuando terminaba el proceso de digestión, cada tubo era destapado y vaciado en un matraz a través de un filtro de papel del número 40. Al finalizar la filtración, los matraces eran llevados hasta la marca de aforo a 50mL con agua desionizada y después agitados para su homogeneización. Finalmente las muestras fueron puestas en frascos de plástico y etiquetadas conforme a su número de muestra.

En el caso de los suelos, ya molidos anteriormente a -200 mallas, se pesaron 0.5 g en la misma balanza que las plantas. Se introducían en los vasos de teflón y se les agregaron 10 mL de agua desionizada, 5 mL de ácido nítrico, 1 mL de ácido clorhídrico y 4 mL de ácido fluorhídrico. Como los suelos contenían gran cantidad de jales, se dejaban destapados por un momento, para liberar los gases que se generaban por la reacción del ácido; esto se hacía para evitar que los vasos se destaparan por la presión del gas y el digestor dejara de trabajar, haciendo que la prueba tuviese que ser repetida. Al dejar pasar este tiempo, se sellaban con la contratapa y eran cerrados. Después eran introducidos al digestor. La temperatura se aumentaba a 130°C durante 10 minutos, posteriormente se mantenía durante media hora y finalmente se dejaba enfriar durante 5 minutos. Después los

vasos se vaciaban en matraces a través de un filtro tipo Watman del número 40. Al finalizar el filtrado, los matraces eran aforados a 50 mL con agua desionizada y agitados para su homogeneización. Finalmente, eran vaciados en botellas de plástico y etiquetados conforme a su número de muestra.

4.2.4. Análisis por espectrometría de Absorción Atómica

Estos análisis fueron realizados en el Instituto de Ingeniería, la técnica utilizada fue Espectrometría de Absorción Atómica por Flama y se determinaron los elementos Cu, Zn, Pb y Cd. Antes de preparar el equipo, se realizaron diferentes estándares para cada metal a analizar, partiendo de un estándar de 100 ppm.

Para cada metal el equipo era preparado de la misma manera. Primero se revisaba que la presión de aire fuera de 35 psi y la presión de acetileno de entre 9 y 10 psi. Después era programado por medio de una computadora para seleccionar los parámetros y la secuencia en que serían analizadas las muestras. Primero era calibrado con los estándares para crear una curva de calibración, seguido de un blanco y del estándar número tres. Terminado este proceso de calibración fueron introducidas las muestras una por una, cada diez muestras se introducía un blanco y un estándar número tres como control.

En caso de que alguna muestra tuviera una concentración por encima de la curva de calibración, tenía que ser diluida de manera que la lectura fuera confiable. Cada dilución fue realizada con agua desionizada y se le agregó ácido nítrico.

4.3. Determinación de la fracción geodisponible

4.3.1. Preparación de la muestra

Las diez muestras de suelos fueron secadas y homogeneizadas previamente y tamizadas con malla diez (2 mm). Posteriormente se tomaron 10 gramos de la muestra que se empacaron en bolsas de polietileno.

4.3.2. Preparación de la solución extractante

La solución extractante fue preparada como se requiere en el anexo normativo 5 según SEMARNAT (2004), para la prueba de movilidad de los constituyentes tóxicos. Se prepararon 2.5 litros de agua destilada y se midió el pH, el cual dio como resultado 5.3. En consecuencia ya no fue necesario agregar ácido clorhídrico como se menciona en la norma, ya que el pH requerido es 5.5 ± 2 .

4.3.3. Prueba de extracción

Después de haber preparado la muestra y la solución extractante, se procedió a vaciar cada suelo en matraces de 300 mL. A cada matraz se le agregaron 200 mL de solución extractante y después fueron colocados en un agitador orbital. Se procedió a programar el equipo con 18 horas de agitación y 220 revoluciones por minuto.

Al terminar la agitación, las muestras se sedimentaron por aproximadamente 4 horas. Posteriormente fueron filtradas con filtros de 0.45 micras y vaciadas en botes de plástico de 65 mL. Fueron etiquetadas y finalmente almacenadas en refrigeración hasta el momento de su análisis.

4.3.4. Análisis de la fracción geodisponible

Los análisis se llevaron a cabo en el Instituto de Ingeniería con la técnica de Espectrografía de Absorción Atómica. Las muestras se prepararon de la misma manera que los análisis de las digestiones. Se realizaron los análisis para cuatro metales: Cd, Cu, Pb y Zn.

4.4. Determinación de la bioaccesibilidad

4.4.1. Preparación de las muestras

Para obtener una muestra representativa a partir de las muestras tomadas en las presas de jales, se utilizó el método de cono-cuardeo, dos veces para cada muestra, obteniéndose diferentes pesos dependiendo de la cantidad recolectada. El rechazo y el representativo fueron embolsados y etiquetados por separado.

El siguiente procedimiento consistió en tamizar la muestra representativa con la malla 60 (250 μm). Después se embolsó y etiquetó debidamente la muestra obtenida. Entre cada muestra se lavaba y secaba el tamiz para evitar la contaminación entre muestras.

4.4.2. Preparación del reactivo

Según (SEMARNAT s.f.), en el apéndice D, se establece la metodología para realizar la prueba de bioaccesibilidad in vitro. La solución de extracción fue preparada de la siguiente manera:

En 1.9 litros de agua destilada se agregaron 60.06 g de glicina, es decir, por cada 950 mL se agregan 30 g de glicina. Ya preparada la solución, se debe de calentar a 37°C. Mientras tanto, se debe de calibrar el potenciómetro (pH) y preparar el ácido clorhídrico concentrado para disminuir el pH de la solución. Se comienza a agregar el ácido y debe de mantenerse el potenciómetro en contacto con la solución para estar monitoreando y llegar a un pH de 1.5 ± 0.5 (figura 18).

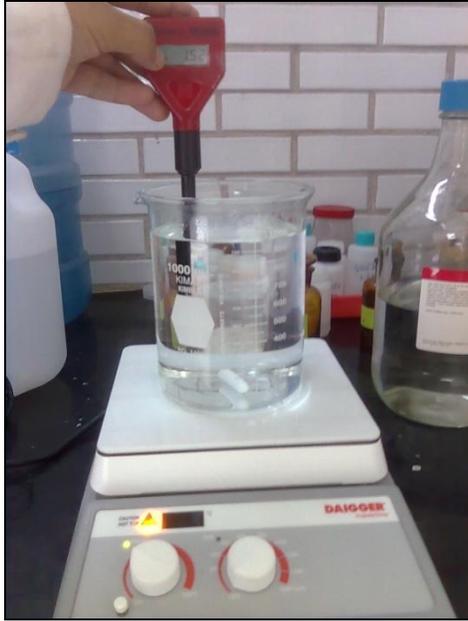


Figura 18 Preparación de la glicina

4.4.3. Prueba de bioaccesibilidad

Se utilizaron frascos de polietileno de alta densidad de 125 mL. Fueron utilizados $1 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g}$ de la muestra de suelo, preparada anteriormente, y $100 \text{ mL} \pm 0.5 \text{ mL}$ de la solución de extracción. A cada frasco se le puso papel cera en la boquilla para asegurar el sellado y fueron cerrados con sus respectivas tapas. Por último se etiquetaron con el número de muestra correspondiente. Se realizaron en total 10 muestras y un blanco, para asegurar que no hubiera contaminación al momento de realizar la prueba.

Los frascos fueron puestos en el dispositivo que sirve para realizar la prueba. El dispositivo se compone de una caja rectangular de vidrio, sellada en todas sus aristas. En uno de los extremos de la caja (en nuestro caso el extremo izquierdo), se encuentran montados un motor y una resistencia. El motor da tracción a un aditamento especial donde los frascos son puestos y agarrados de tal manera que al momento de girar no se caigan al fondo de la caja. El objetivo de la resistencia es calentar el agua dentro de la caja.

Teniendo los frascos debidamente preparados con muestra y solución extractante, fueron colocados y asegurados en el dispositivo. Ya colocados, fueron sumergidos en agua (dentro de la caja) y calentados a $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Una vez calentada el agua se inició la prueba agitanado de manera constante y durante una hora las muestras (figura 19 y 20).



Figura 19 Dispositivo para la prueba de bioaccesibilidad, vista del motor



Figura 20 Dispositivo para la prueba de bioaccesibilidad, vista del contenedor de muestras

Al terminar el tiempo de agitación, se quitaron del dispositivo los frascos. Fueron dejados en una superficie plana durante un tiempo para dejar sedimentar los sólidos. Después fueron destapados con cuidado para no reagitar la muestra. Con una jeringa se tomaba parte de la solución y era forzada a pasar por una membrana ($0.45\ \mu\text{m}$) para su filtración y dejar la mayor parte de sólidos, y ser depositada en otro frasco. Este procedimiento se realizó con las muestras y el blanco. Finalmente, las muestras ya filtradas, se mantuvieron en refrigeración hasta el momento de su análisis.

4.4.4. Análisis de bioaccesibles

Las muestras resultado de la prueba de bioaccesibilidad fueron analizadas por el método de absorción atómica. Se analizaron cuatro metales: Cd, Cu, Pb y Zn. Los análisis se llevaron a cabo en el Instituto de Ingeniería. Las muestras fueron preparadas de la misma manera que para los análisis de las digestiones.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis de concentración total en las especies, así como los análisis de concentración total, concentración geodisponible y concentración bioaccesible de los suelos, así como un análisis de correlación entre estos parámetros.

5.1. Resultados de pH de los suelos

Tabla 5 Resultados de pH de muestras de suelos

Presa	Muestra	pH
1	JS-050	3.84
	JS-055	5.13
	JH-3B	3.48
2	JS-058	7.6
	JH-11B	7.43
	JH-13B	6.85
3	JS-059	6.85
	JS-060	6.91
	JS-5B	7.04
	JS-7B	7.31

Como se puede observar en la tabla 5, las muestras de la presa 1 resultaron con pH ácidos, esto debido a que el jal en sí es ácido y existe una mezcla suelo-jal en la zona superficial de la presa. Para las presas 2 y 3 las pH se muestran prácticamente neutros, aunque en algunos puntos de las presas existía mezcla suelo-jal, la naturaleza neutra del jal y del suelo se mantienen.

5.2. Concentraciones totales en plantas

Los valores más altos de contenido de cobre en las plantas analizadas, en general fueron para la especie *Nicotiana glauca* con un promedio de 32.07 mg/kg (máximo de 41.30 mg/kg y mínimo de 21.35 mg/kg), seguida de la especie *Flaveria pubescens* con una media 26.47 mg/kg (máximo de 47.31 mg/kg y mínimo 10.15 mg/kg) y finalmente por la especie *Tecoma stans*, cuyo valor promedio fue de 21.81 mg/kg (máximo de 50.92 mg/kg y mínimo de 12.71 mg/kg). Estos datos pueden observarse en la figura 21, donde el color verde más oscuro representa los máximos, el intermedio los mínimos y el más claro el promedio de cada presa con respecto a la especie.

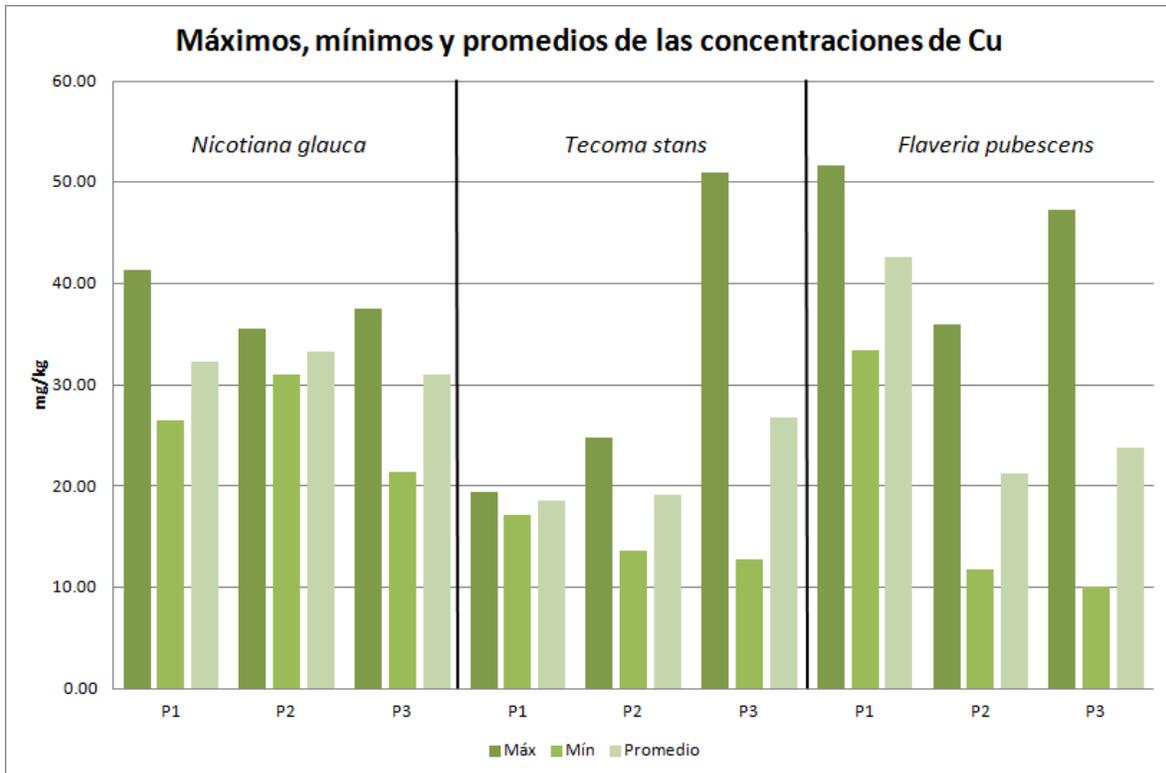


Figura 21 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Cu para cada especie por presa.

En la figura 22 se puede observar principalmente que las muestras con los picos más altos fueron la *Nicotiana glauca* y la *Flaveria pubescens*, sobre todo en las presa 1. Los contenidos en la presa 2 son más constantes entre muestras del mismo punto. En la presa 3 podemos ver picos; en cada punto los valores más altos son de diferentes especies, siendo considerable el resultado de la *Tecoma stans* (JH-7-B) cuya concentración es de 50.92 mg/kg, pues el promedio de concentración para esta especie es el más bajo.

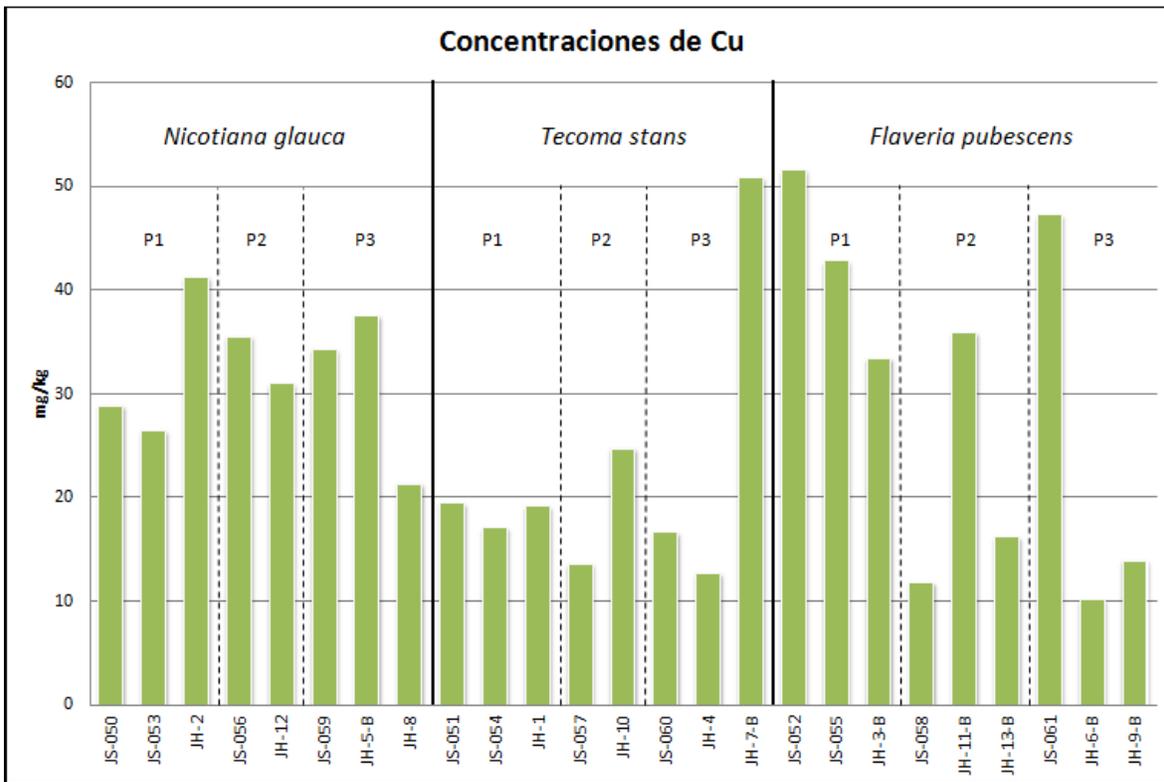


Figura 22 Concentraciones totales de Cu por muestra.

Las concentraciones de Zn más altas se dieron en la especie *Flaveria pubescens* con un valor de 224.26 mg/kg, seguidas de la *Nicotiana glauca* con 219.70 mg/kg y por último la especie *Tecoma stans* con 107.55 mg/kg. Los datos son presentados en la figura 23, en donde el color azul oscuro representa los máximos, el intermedio los mínimos y el más claro los promedios.

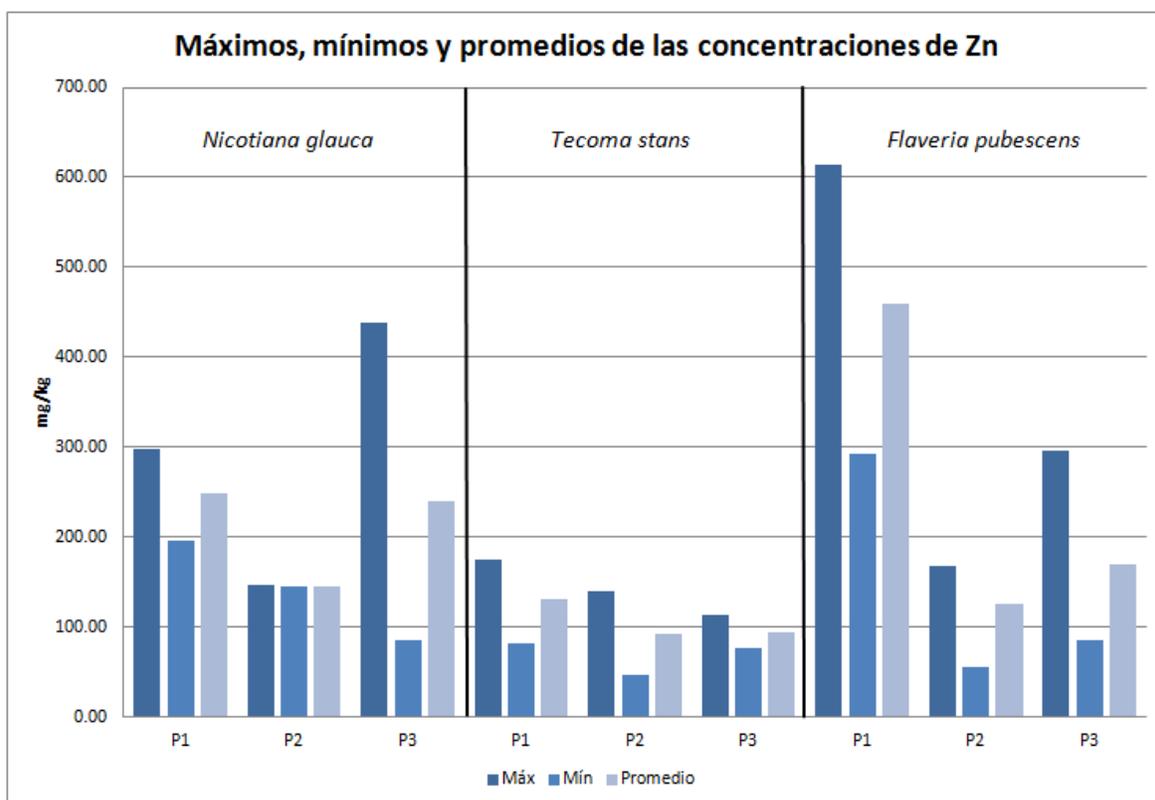


Figura 23 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Zn para cada especie por presa.

En la figura 24 se puede observar que la presa 1 fue la que presentó mayor concentración en comparación con las otras dos, sobresaliendo la especie *Flaveria pubescens*. La presa 2 se mantuvo más constante, como en el caso del Cu, con bajas concentraciones que van desde 47.31 hasta 167.96 mg/kg. La presa 3 es interesante pues en su zona central del vaso (JS-059, JS-060 y JS-061) se mantuvo la tendencia de que la mayor concentración fuese para la *Flaveria pubescens* y la menor para la *Tecoma stans*, no así para los siguientes dos puntos de muestreo: en la zona norte del vaso (JH-4, JH-5-B y JH-6-B) la *Nicotiana glauca* presentó una concentración mucho mayor que las otras dos especies, con un valor de 437.63 mg/kg lo cual también se vio para el Cu; para la zona norte del talud (JH-7-B, JH-8 y JH-9-B) aunque las concentraciones no fueron muy elevadas (de 85.6 a 113.70 mg/kg) la mayor concentración fue para la *Tecoma stans*, parecido al comportamiento mostrado también para el Cu.

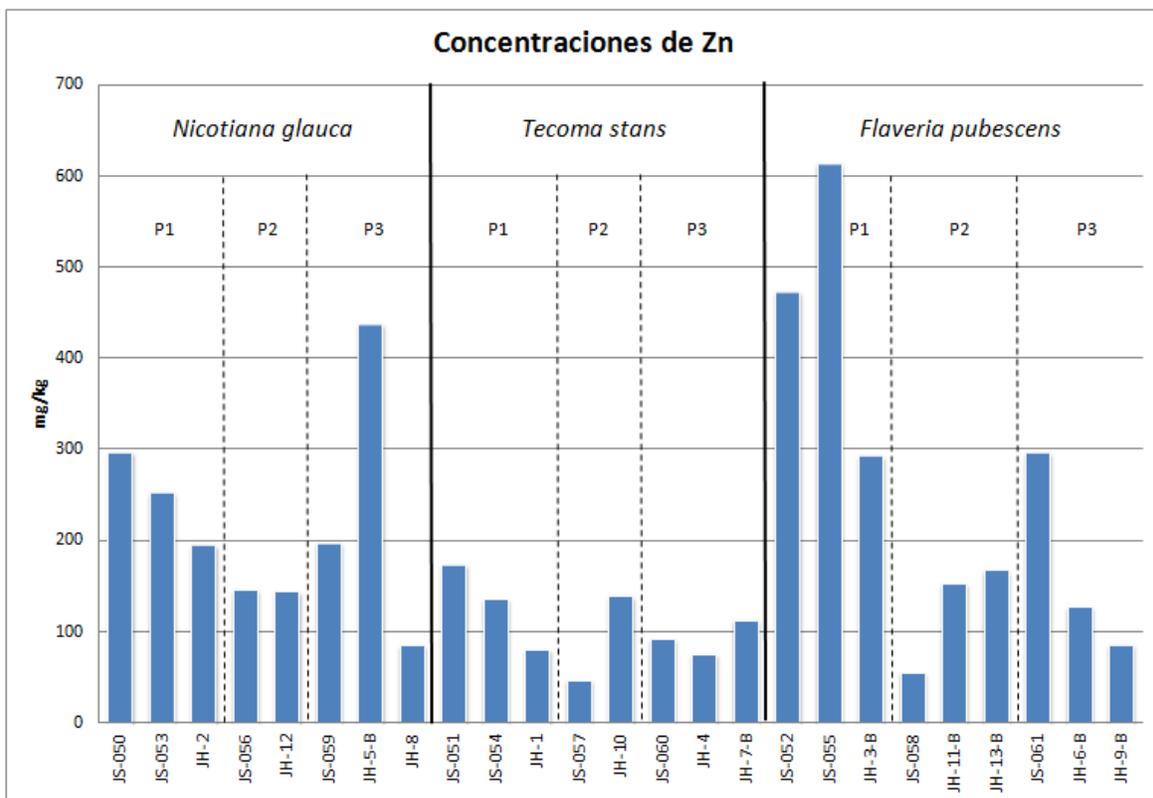


Figura 24 Concentraciones totales de Zn por muestra.

Para el caso del Cd, la situación fue totalmente diferente. Tomando en cuenta los promedios, el valor más alto (mínimo de 6.13 mg/kg y máximo de 27.58 mg/kg) lo presentó la especie *Nicotiana glauca* con 13.15 mg/kg, seguida de la especie *Flaveria pubescens* con 7.75 mg/kg (mínimo de 1.69 mg/kg y máximo de 20.32) y la concentración más baja promedio resultó ser de 2.45 mg/kg para la *Tecoma stans* (mínima de 0.53 mg/kg y máxima de 10.07 mg/kg). Estas concentraciones se muestran en la figura 25, donde se pueden diferenciar máximos, mínimos y promedios de las presas con respecto a las especies.

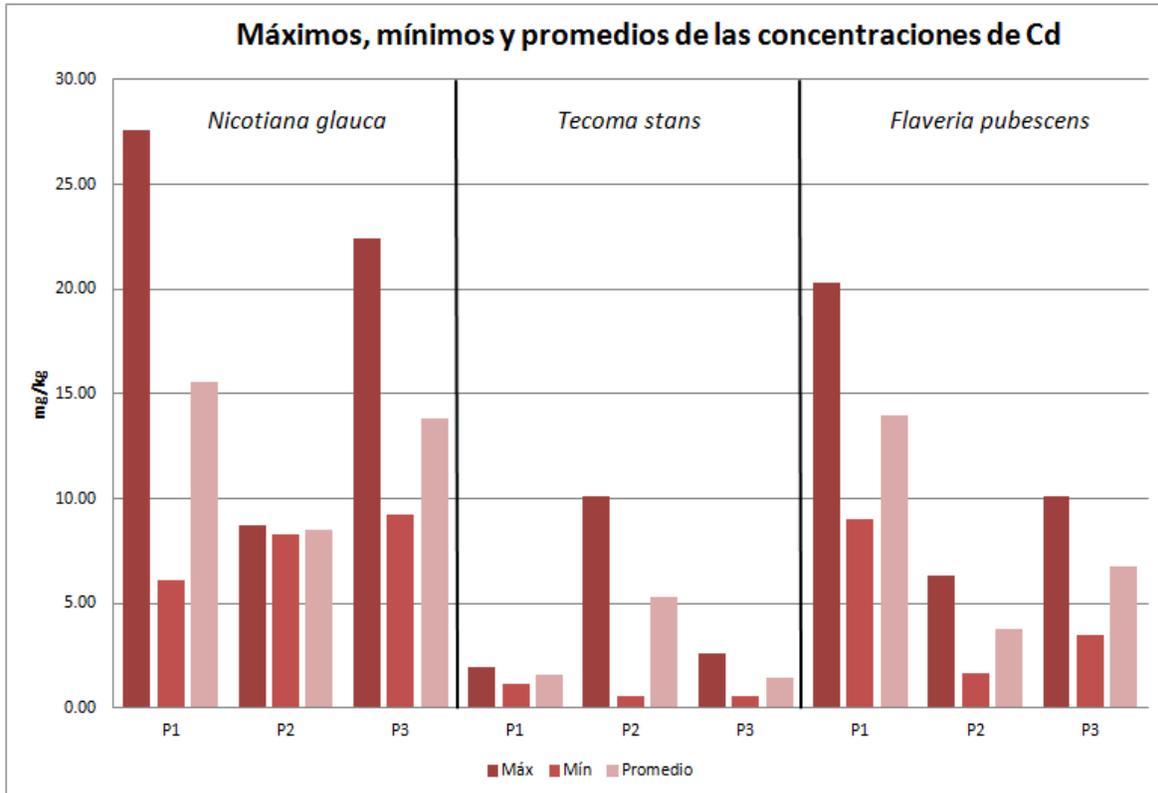


Figura 25 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Cd para cada especie por presa.

En la figura 26 podemos apreciar los contenidos totales de Cd para cada muestra de planta tomada. Para la presa 1, la *Tecoma stans* fue la especie que presentó las concentraciones más bajas, mientras que la *Nicotiana glauca* presentó los valores más altos (el valor máximo de todas las presas es la muestra JS-053 con 27.58 mg/kg) seguida por la *Flaveria pubescens*, haciendo hincapié en que la zona central del talud fue la que presentó la mayor concentración. En la presa 2 los valores se mantuvieron por debajo de los 10 mg/kg. Para la zona norte del vaso la mayor concentración la obtuvo la *Nicotiana glauca* con 8.69 mg/kg; en la zona sur del vaso, la mayor concentración resultó con 10.07 mg/kg para la *Tecoma stans* y finalmente, en la zona central del vaso la mayor concentración de Cd fue para la *Nicotiana glauca* con un valor de 8.31 mg/kg. Es interesante cómo es que no hubo una especie dominante para esta presa en cuanto a contenido de Cd, pues para las muestras JH-12 y JH-13-B los contenidos siguieron muy de cerca. Por último, para la presa 3 las concentraciones más bajas las presentó la *Tecoma stans*. La *Nicotiana glauca* fue la que presentó más concentración excepto en la zona central del vaso, donde la concentración mayor es para la *Flaveria pubescens*. Es de interés observar que la muestra JH-5-B de la especie *Nicotiana glauca* tiene una concentración mayor en comparación a las demás muestras de la presa 3, con un valor de 22.42 mg/kg y sobresale de manera estrepitosa.

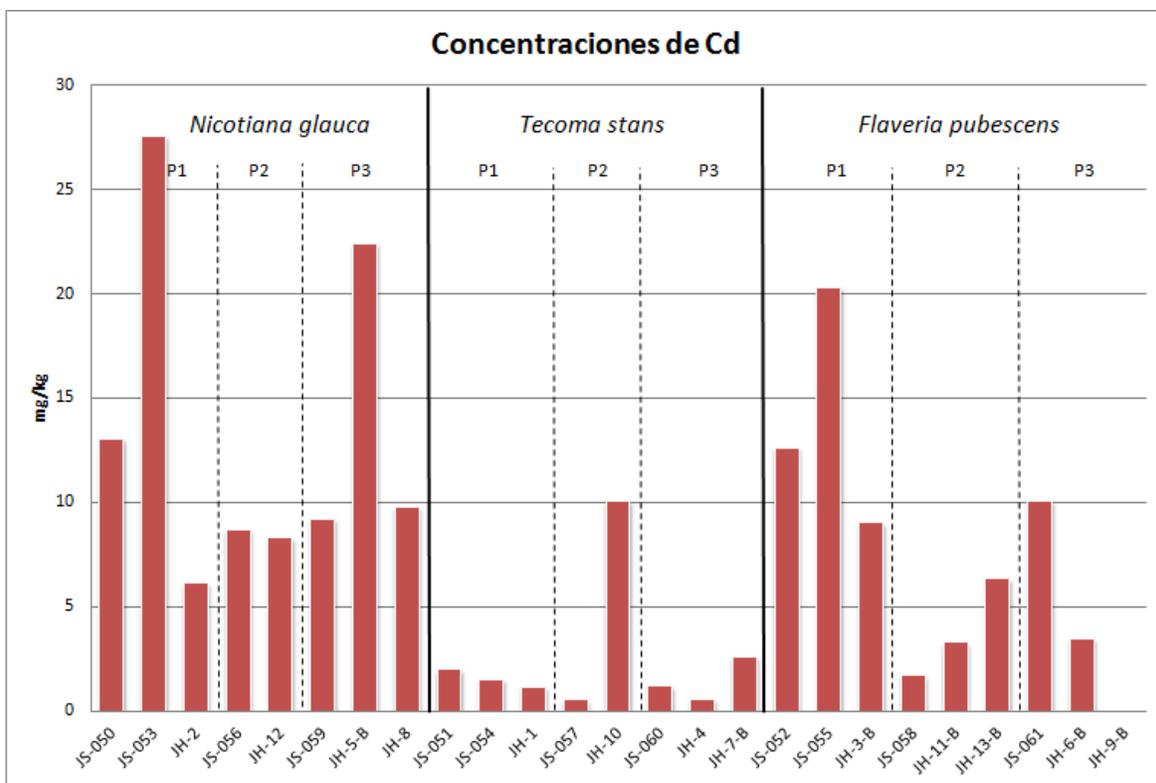


Figura 26 Concentraciones totales de Cd por muestra.

Para el caso del Pb, se puede notar en la figura 27 que la presa 1 fue la que presentó mayores concentraciones, mientras que en la presa 2 y 3 sólo se tuvieron algunos valores como los de la presa 1. Las concentraciones promedio para la *Nicotiana glauca*, *Flaveria pubescens* y *Tecoma stans* fueron de 13.42 mg/kg (mínima de < LD y máxima de 40.88 mg/kg), 30.82 mg/kg (mínima de 3.02 mg/kg y máxima de 74 mg/kg) y de 13.31 mg/kg (mínima de 3.04 y máxima de 27.87 mg/kg), respectivamente.

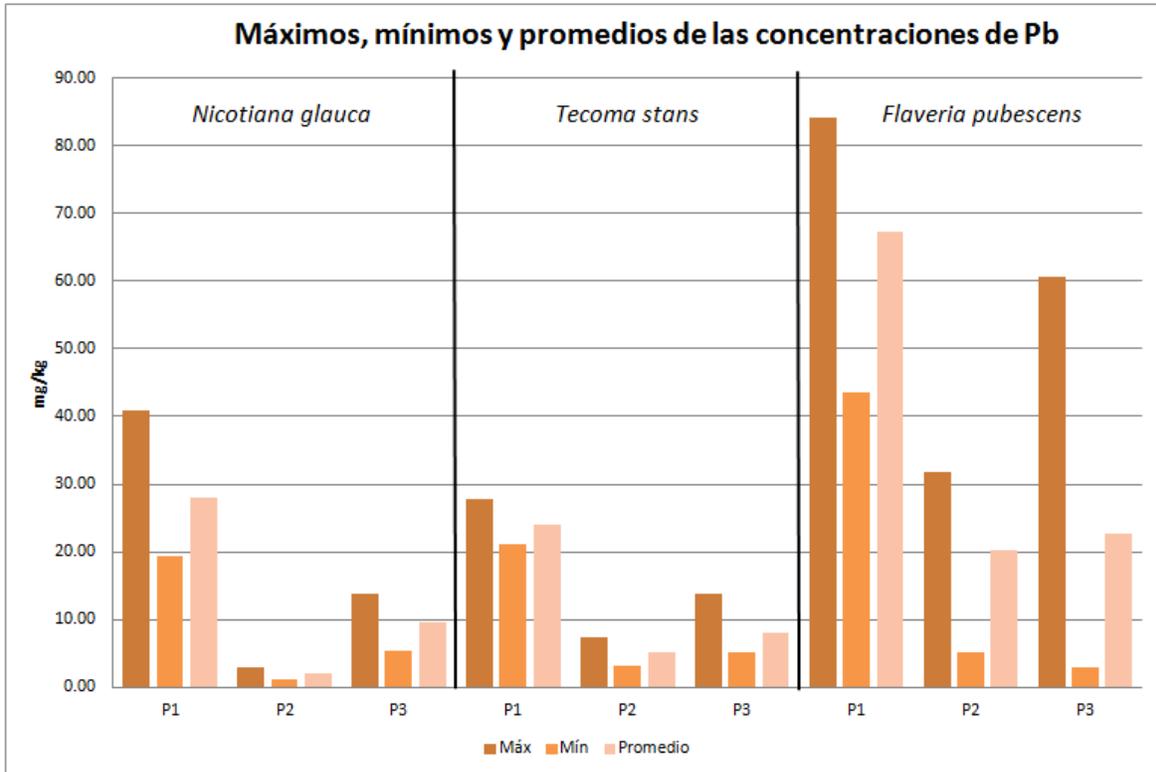


Figura 27 Máximos, mínimos y promedios de concentraciones de Pb para cada especie por presa.

También se puede observar que la *Flaveria pubescens* es la que presenta las mayores concentraciones, en especial las de la presa 1 (JS-052, JS-055 y JH-3-B), la muestra JH-11-B de la presa 2 y la muestra JS-061 de la presa 3 (figura 28).

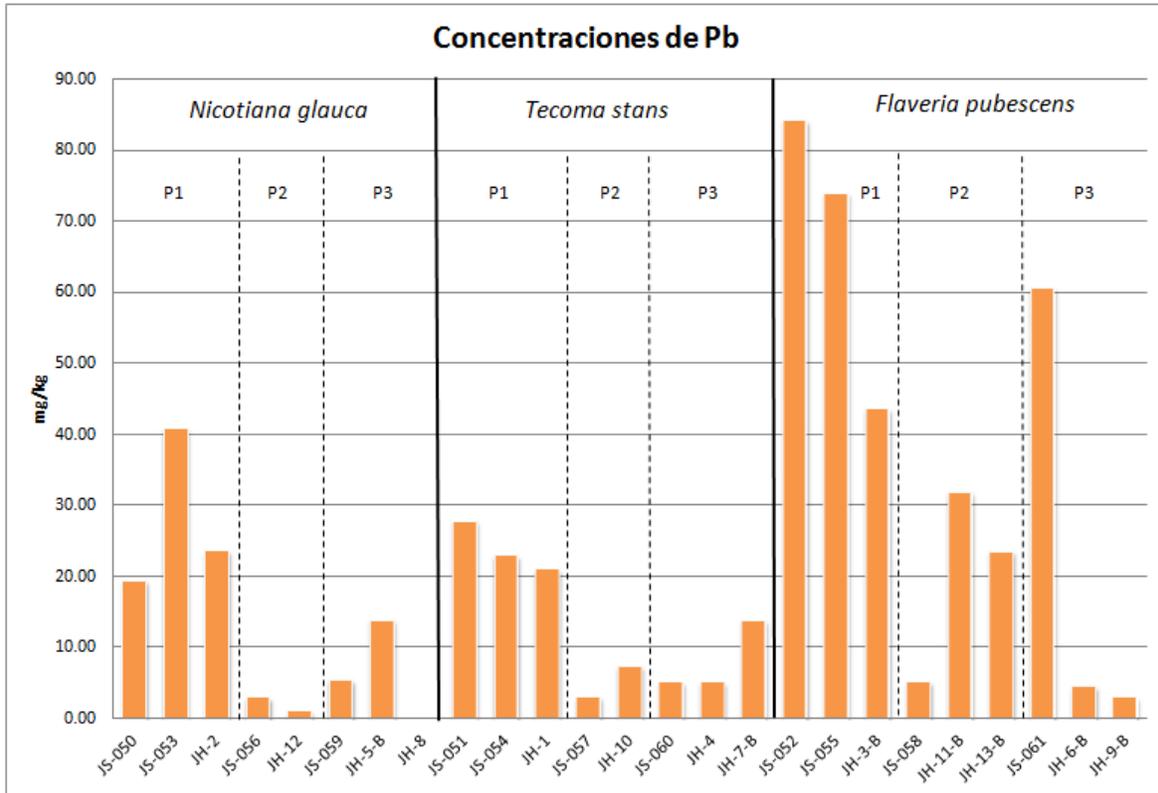


Figura 28 Concentraciones totales de Pb por muestra.

5.3. Bioaccesibilidad en suelos

Para el análisis de estos resultados se procedió a obtener las concentraciones máximas, mínimas y promedios para cada presa. En la Tabla 5 se presentan las concentraciones bioaccesibles de cada muestra comparada con su correspondiente concentración total.

Tabla 6 Concentraciones totales (mg/kg) y bioaccesibles.

Muestra	Presa	Concentración	Cu	Zn	Cd	Pb
JS-050	1	Total	745.26	2245.40	30.55	2287.70
		Bioaccesible (mg/kg)	63.50	647.06	7.75	55.70
		Bioaccesible (%)	8.52	28.82	25.35	2.43
JS-055	1	Total	796.93	4991.00	30.54	2685.60
		Bioaccesible (mg/kg)	131.20	1833.33	10.33	81.94
		Bioaccesible (%)	16.464	36.733	33.835	3.0509
JH-3-B	1	Total	983.57	2036.90	10.21	3543.10
		Bioaccesible (mg/kg)	95.41	656.50	4.75	110.16
		Bioaccesible (%)	9.7004	32.23	46.523	3.1091
JS-058	2	Total	256.54	2062.90	26.64	477.90
		Bioaccesible (mg/kg)	35.68	952.53	10.83	170.96
		Bioaccesible (%)	13.907	46.2	40.647	35.773
JH-11-B	2	Total	659.62	4204.40	58.78	2508.10
		Bioaccesible (mg/kg)	51.76	909.13	7.79	754.90
		Bioaccesible (%)	7.8469	21.6	13.25	30.099
JH-13-B	2	Total	549.24	6351.40	74.61	1664.50
		Bioaccesible (mg/kg)	64.55	1628.71	15.42	682.38
		Bioaccesible (%)	11.753	25.6	20.662	40.996
JS-059	3	Total	1014.67	8729.20	118.60	1837.20
		Bioaccesible (mg/kg)	48.54	2107.07	25.81	735.35
		Bioaccesible (%)	4.7834	24.138	21.761	40.026
JS-060	3	Total	756.81	5677.50	67.57	2103.20
		Bioaccesible (mg/kg)	87.78	1584.26	13.63	609.07
		Bioaccesible (%)	11.598	27.904	20.171	28.959
JH-5-B	3	Total	741.94	5992.60	81.28	1879.90
		Bioaccesible (mg/kg)	47.27	2311.11	23.33	603.98
		Bioaccesible (%)	6.3709	38.566	28.707	32.128
JH-7-B	3	Total	1217.20	15446.20	160.40	6246.50
		Bioaccesible (mg/kg)	121.50	3129.00	30.95	5732.00
		Bioaccesible (%)	9.9819	20.257	19.296	91.763

Para el Cu, como puede observarse en la figura 29, la presa 1 es la que tiene el mayor valor promedio de bioaccesibilidad con 11.56% (máximo de 16.46% y mínimo de 8.52%). La muestra JS-055 fue la que presentó el mayor porcentaje y se encuentra ubicada en la zona central del talud. La presa 3 obtuvo el menor porcentaje promedio de bioaccesibilidad (8.18%) con un porcentaje máximo de 11.6% y un porcentaje mínimo de 4.78%, los cuales se ubicaron en la zona central del vaso. El valor promedio de la presa 2 fue de 11.17%, con un valor máximo de 13.91% y un mínimo de 7.85% y se ubicó entre las dos presas en cuanto porcentaje.

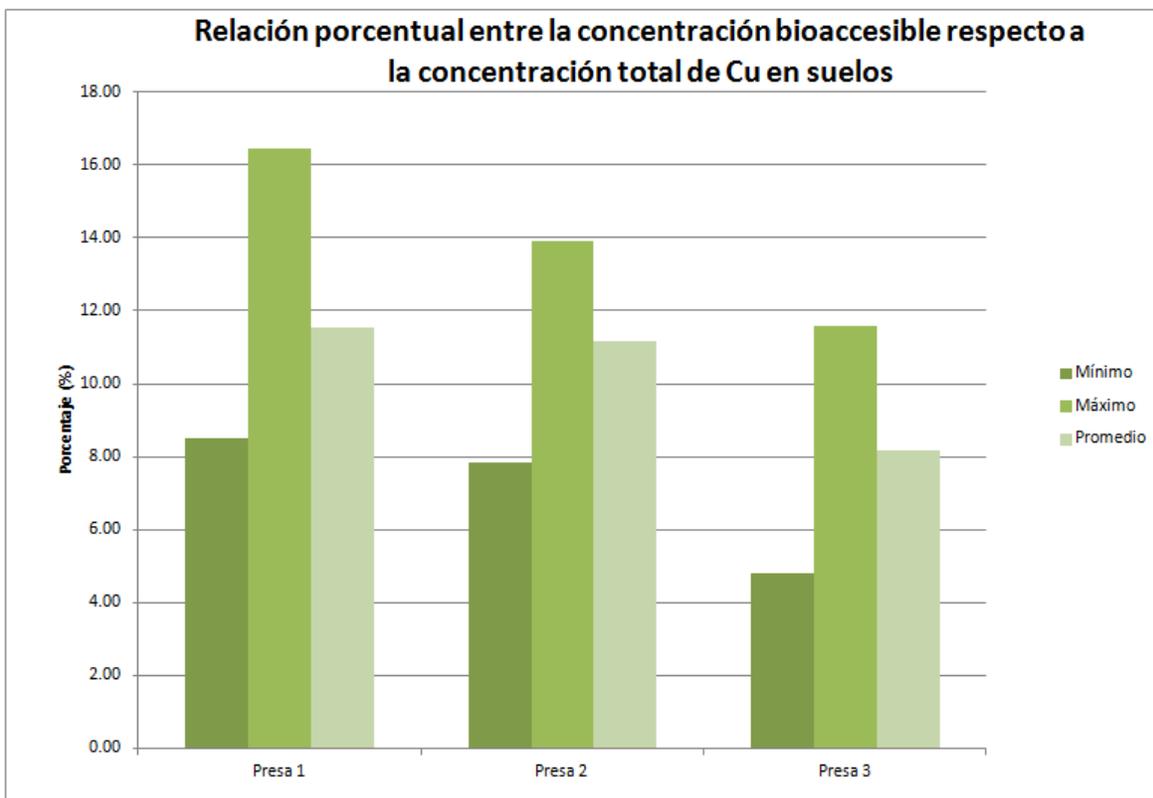


Figura 29 Porcentaje bioaccesible de Cu en suelos.

En cuanto al Zn (figura 30) la presa 1 resultó con el mayor valor promedio de 32.59%, con el porcentaje más alto de 36.73% y un mínimo de 28.82%. En la presa 2 se observó un porcentaje promedio más bajo que el de la presa 1 (31.15%), sin embargo, tiene el porcentaje máximo de todas las presas con 46.17%, el cual pertenece a la muestra JS-058 ubicada en la zona norte del vaso de la misma presa. La presa 3 tuvo la bioaccesibilidad promedio más baja con 27.72%, con un máximo de 38.57% y un mínimo de 20.26%. Es importante hacer notar que los porcentajes de bioaccesibilidad de Zn respecto a la concentración total en suelos, es en general mayor de la que se obtuvo para el cobre.

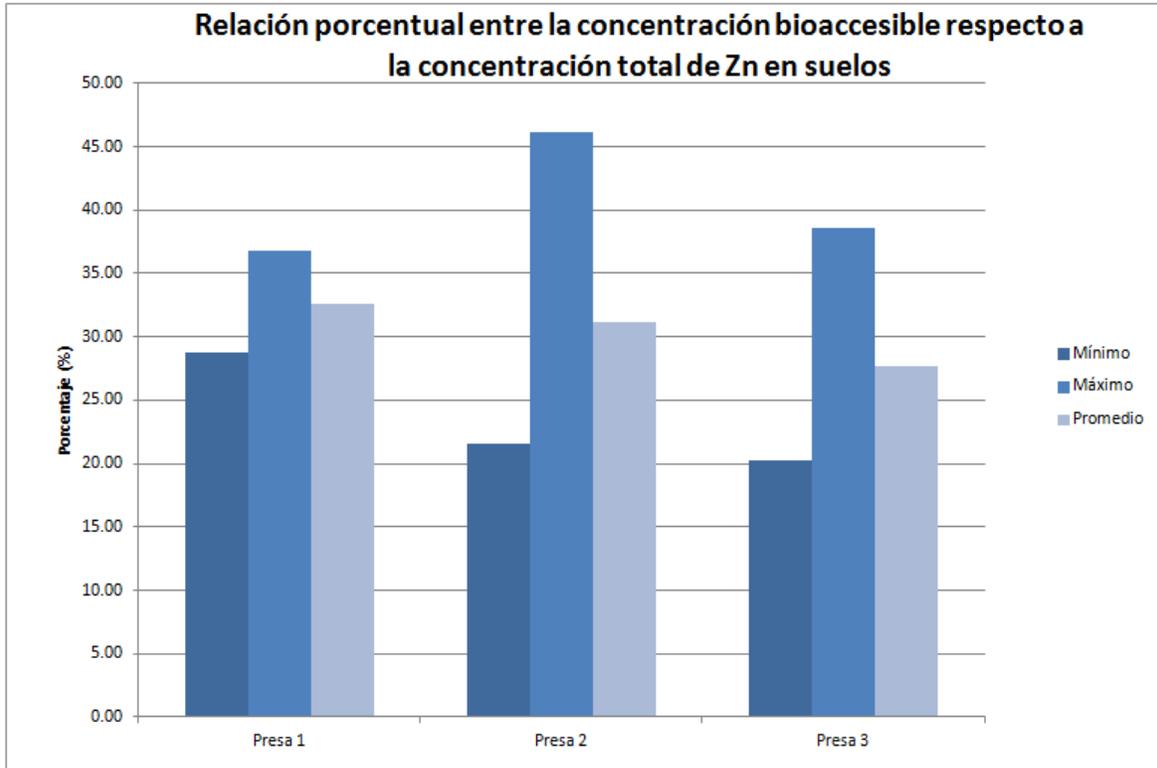


Figura 30 Porcentaje bioaccesible de Zn en suelos.

En el caso de Cd (figura 31) la presa 1 resultó ser la más alta en cuanto a promedio, mínimo y máximo con 35.24%, 25.35% y 46.52% respectivamente. La muestra más alta fue la JH-3-B en la zona poniente del talud en cuanto a porcentaje, aunque en cuanto a concentración las otras dos zonas son más altas que las anteriores. Para la presa 2, el porcentaje máximo es 40.65% y el mínimo de 13.25% con un promedio de 24.85%. En cuanto a la presa 3, sus valor promedio fue el más bajo, aunque por solo algunos puntos por debajo de la presa 2 con 22.48%. Los valores máximos y mínimos fueron: 19.3 para el mínimo y 28.71%. También es conveniente señalar que el Cd presenta una relación porcentual Bioaccesible/Total superior a la del cobre, pero muy similar a la que presenta el zinc.

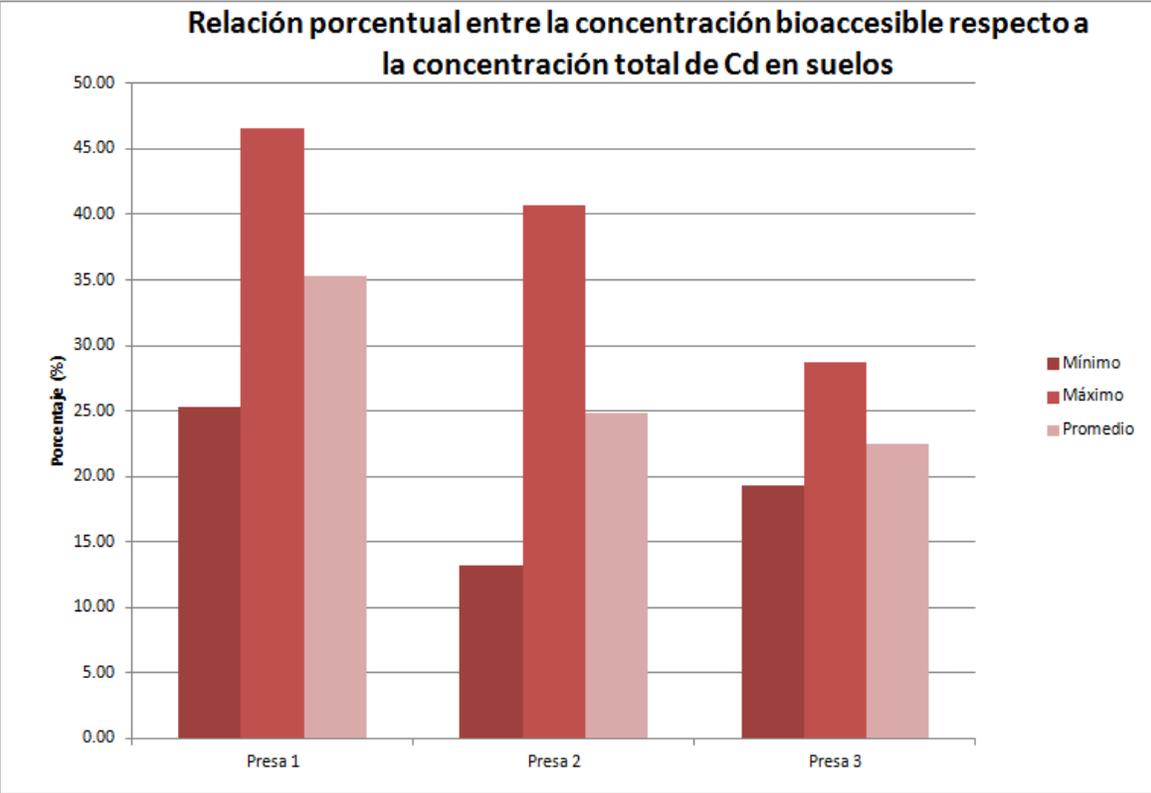


Figura 31 Porcentaje bioaccesible de Cd en suelos.

En el caso del Pb (figura 32) la presa con el valor promedio más alto fue la presa 3 y fue de 48.22%. En esta presa se encontró la muestra con la mayor bioaccesibilidad de todas y resultó de 91.76% y corresponde a la muestra JH-7-B en la zona norte del talud, mientras que el mínimo es de 28.96%. La presa 2 es la que sigue en cuanto a orden, con 35.62% de porcentaje promedio, mientras que como valor máximo se tuvo 41% y un mínimo de 30.1%. Mientras que la presa 1 resultó ser la que tiene la menor bioaccesibilidad de Pb de las tres presas con un valor de bioaccesibilidad promedio de 2.86%, teniendo como máximo 3.11% y un mínimo de 2.43%. En promedio la bioaccesibilidad de plomo respecto a la concentración total, es mayor en las presas 2 y 3, incluso más que el resto de los elementos.

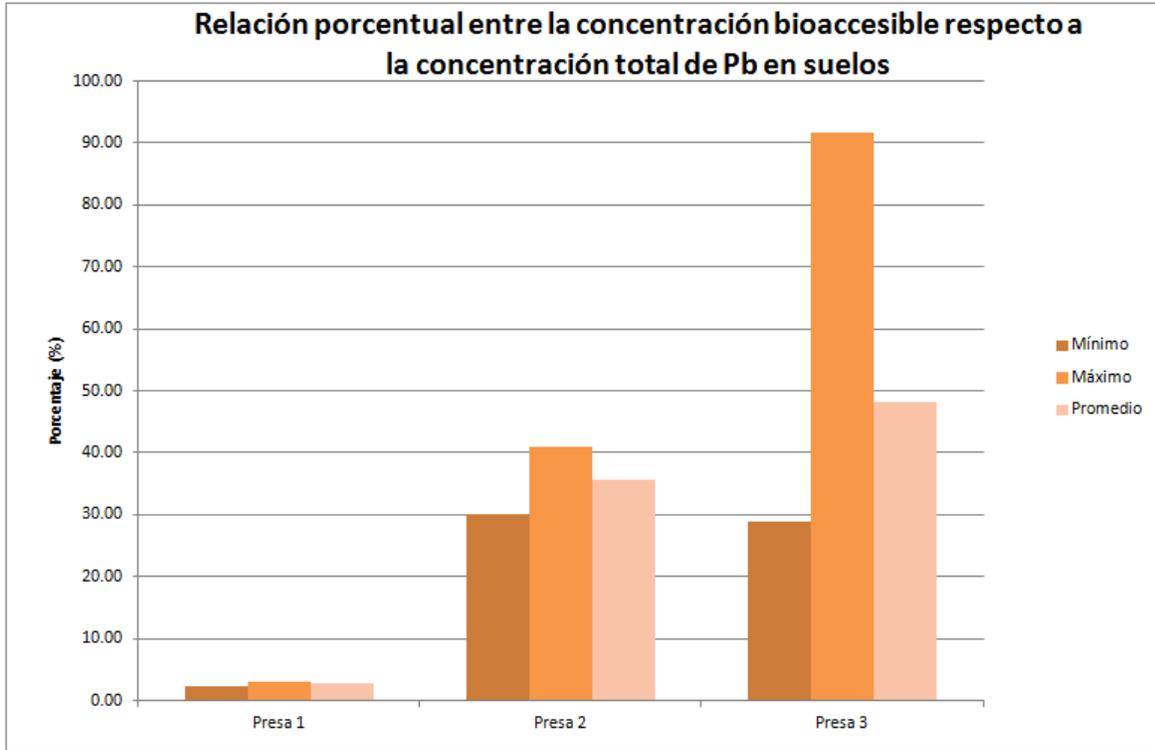


Figura 32 Porcentaje bioaccesible de Pb en suelos.

5.4. Concentración de la fracción soluble

En la tabla 6 se pueden ver las concentraciones totales y geodisponibles de cada elemento para cada muestra de suelo. De esta tabla podemos concluir los porcentajes geodisponibles que pueden ser encontrados en el suelo.

Tabla 7 Concentraciones totales y geodisponibles en mg/kg.

Muestra	Presa	Concentración	Cu	Zn	Cd	Pb
JS-050	1	Total	745.2	2245.4	30.5	2287.7
		Geodisponible	55.8	366.2	4.1	3.2
JS-055	1	Total	796.9	4991.0	30.5	2685.6
		Geodisponible	12.9	612.3	3.4	2.4
JH-3-B	1	Total	983.5	2036.9	10.2	3543.1
		Geodisponible	28.4	556.7	2.8	8.5
JS-058	2	Total	256.5	2062.9	26.6	477.9
		Geodisponible	1.2	32.2	0.2	5.9
JH-11-B	2	Total	659.6	4204.4	58.7	2508.1
		Geodisponible	0.1	2.3	ND	2.7
JH-13-B	2	Total	549.240	6351.400	74.610	1664.500
		Geodisponible	0.496	2.318	ND	2.464
JS-059	3	Total	1014.670	8729.200	118.600	1837.200
		Geodisponible	9.156	270.711	1.053	39.896
JS-060	3	Total	756.810	5677.500	67.570	2103.200
		Geodisponible	0.468	12.937	ND	3.230
JH-5-B	3	Total	741.940	5992.600	81.280	1879.900
		Geodisponible	1.174	20.621	0.088	5.440
JH-7-B	3	Total	1217.200	15446.200	160.400	6246.500
		Geodisponible	0.618	7.410	ND	14.343
*ND. No detectado						

Para el caso del Cu (figura 33), las concentraciones geodisponibles tienen un porcentaje medio de 4% para la presa 1 (porcentaje máximo de 7.5% y mínimo de 1.62%), que en comparación con presa 2 y presa 3 (cuyos porcentajes medios se encuentran en 0.2% y 0.29%) se puede notar una gran diferencia, incluso los máximos de las dos presas antes mencionadas ni siquiera alcanzan el 1%. El Cu es más soluble debido a que los jales en la presa 1 están generando un ambiente ácido.

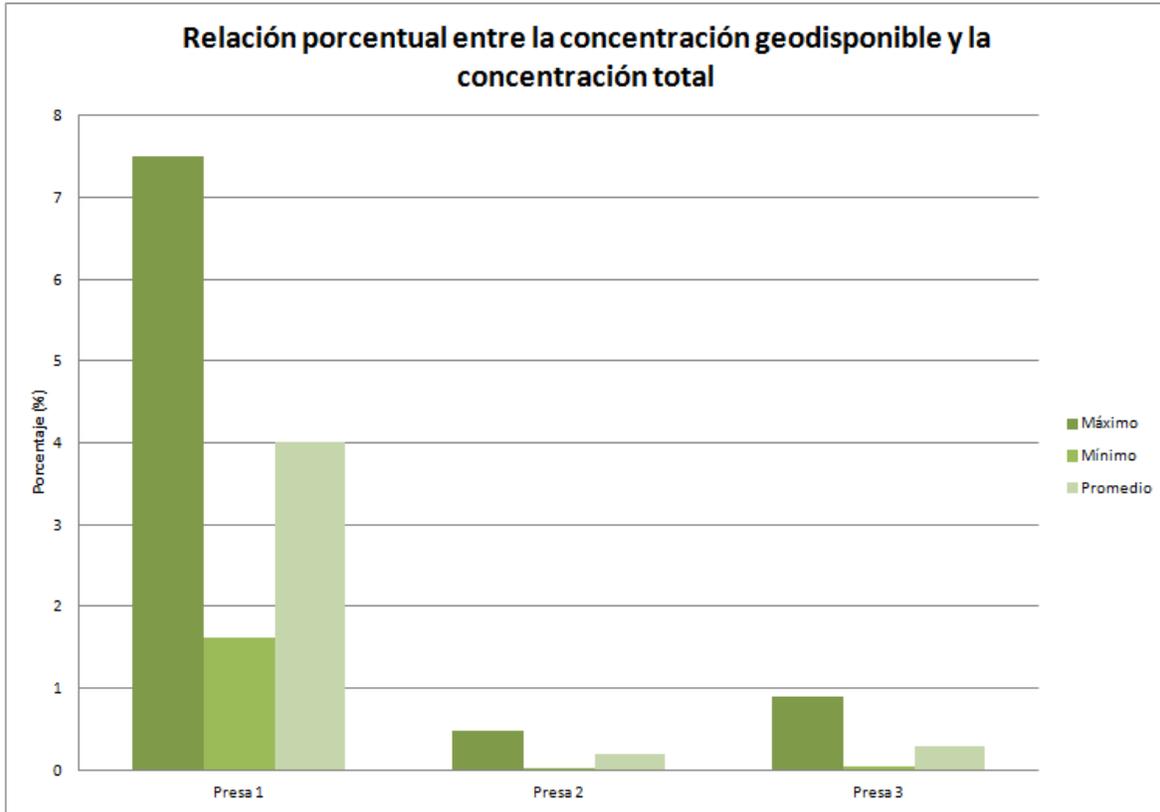


Figura 33 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Cu.

La situación del Zn (figura 34) tiene un comportamiento más parecido al Cu, en donde podemos observar que la presa 1 tiene el porcentaje máximo con valor de 27.33% y el mínimo de 12.27% con un promedio de 18.64%. Mientras tanto, la presa 2 alcanzó un máximo de concentración geodisponible de 1.56% y un mínimo de 0.04% (el promedio fue de 0.55%). La presa 3, aunque con valores un poco más altos que los de la segunda presa, sólo obtuvo como máxima concentración 3.1% y un mínimo de 0.05% (su promedio fue de 0.93%). Entonces, es posible observar que la presa 1 está liberando de manera más eficaz Zn como parte de un proceso de acidez, mismo que también está afectando al Cu.

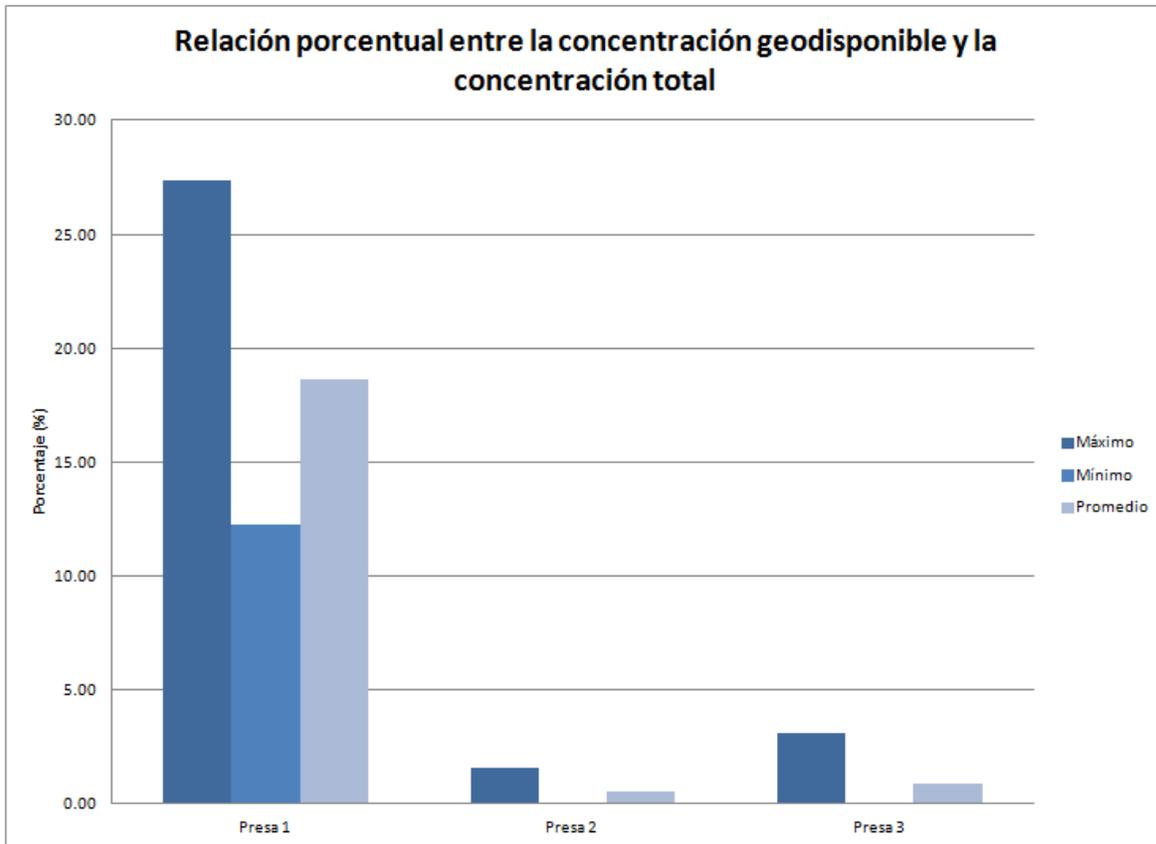


Figura 34 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Zn.

El Cd (figura 35) también presentó un comportamiento parecido al del Cu y el Zn. En la figura se puede observar que la presa 1 tuvo las mayores concentraciones geodisponibles en comparación con presa 2 y presa 3. La presa 1 resultó tener un promedio de 17.48% (con un mínimo de 11.24% y un máximo de 27.58%), mientras que en la presa 2 sólo una muestra de suelo fue detectada con 0.97% de porcentaje geodisponible. En la presa 3 el máximo porcentaje dio como resultado 0.89% y el mínimo dio 0.11%, teniendo un promedio de 0.5% y se presentó una situación parecida a la de la presa 2 en donde dos de las muestras no se les pudo detectar concentración alguna de Cd.

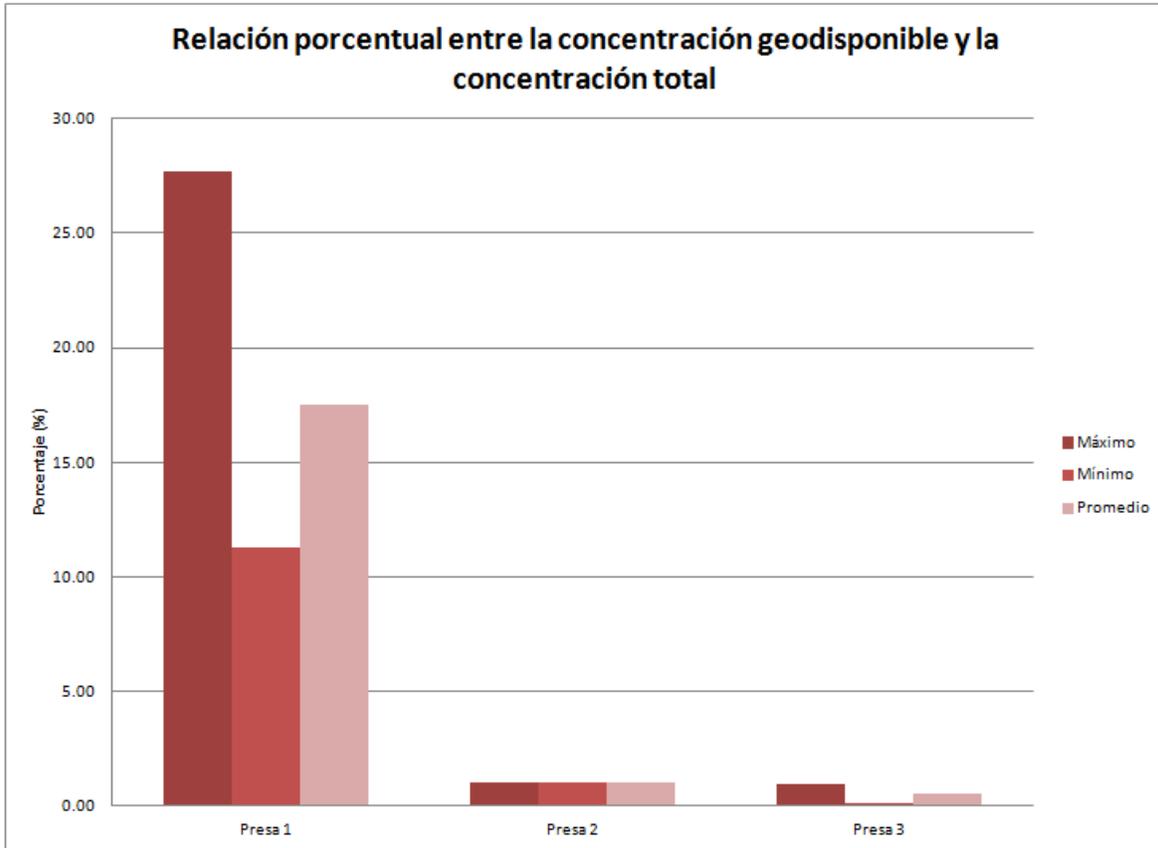


Figura 35 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Cd.

En cuanto al Pb, la figura 36 permite observar que el comportamiento de la concentración geodisponible fue completamente diferente al de los elementos anteriores. Aunque las relaciones porcentuales no excedieron el 2.5%, la presa 3 fue la que presentó la relación máxima con 2.17% y una mínima de 0.15% dando como promedio 0.71%. Siguiendo de manera descendente, en la presa 2 se observó un resultado porcentual máximo de 1.25%, un mínimo de 0.11% y un promedio de 0.5%. Finalmente, la presa 1 fue la que tuvo las menores concentraciones con 0.24%, 0.09% y 0.16% como máxima, mínima y promedio respectivamente.

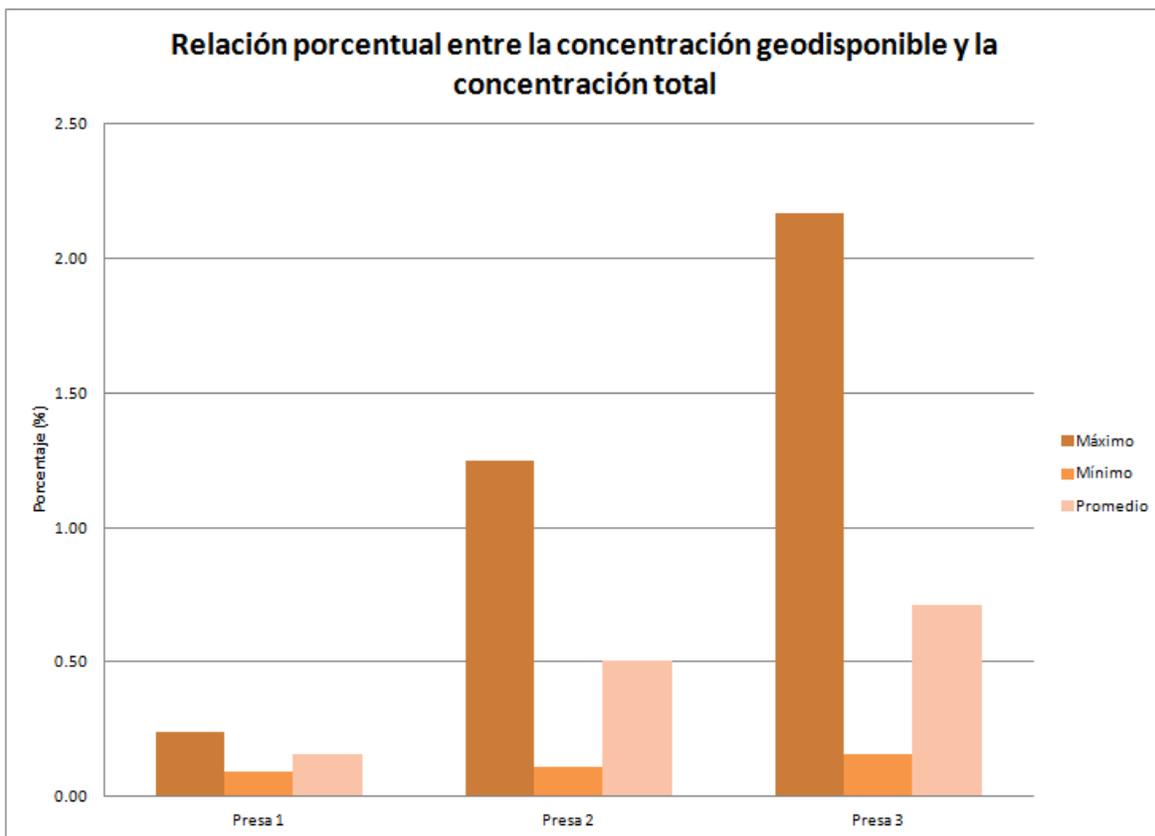


Figura 36 Relación porcentual entre la concentración geodisponible y concentración total de Pb.

5.5. Correlación entre los parámetros determinados

5.5.1. Concentración total (CS), Concentración Geodisponible (CG) y Concentración Bioaccesible (CB)

En este análisis es importante considerar que las muestras de suelo que se tomaron corresponden a una muestra representativa de un área local dentro de cada presa, en la que se identificaron las tres especies estudiadas en un radio máximo de 8 a 10 m. Estas muestras representan la concentración promedio de metales a la que están expuestas las tres especies en cada una de las áreas.

Se hizo una correlación estadística entre los parámetros que se determinaron en la muestras de suelo. Con las diez muestras analizadas se obtuvo la media aritmética, la varianza y la desviación estándar, para los valores de concentración total, concentración geodisponible y concentración bioaccesible; después se obtuvo la covarianza y finalmente la correlación (r). El análisis estadístico se hizo por separado para cada uno de los elementos (tablas 7, 8, 9 y 10).

Tabla 8 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Cu para las muestras de suelo.

	CS	CG	CB
CS	1		
CG	0.15	1	
CB	0.59	0.07	1

Tabla 9 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Zn para las muestras de suelo.

	CS	CG	CB
CS	1		
CG	-0.35	1	
CB	0.91	-0.31	1

Tabla 10 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Cd para las muestras de suelo.

	CS	CG	CB
CS	1		
CG	-0.45	1	
CB	0.94	-0.63	1

Tabla 11 Correlación “r” entre los parámetros determinados del Pb para las muestras de suelo.

	CS	CG	CB
CS	1		
CG	0.10	1	
CB	0.83	0.22	1

5.5.2. Concentración Total vs Concentración Geodisponible

La correlación entre la concentración total y la geodisponible varía para los cuatro elementos. En el caso del plomo es una correlación directa débil (0.10), al igual que en el cobre (0.15), lo que significa que para estos metales la geodisponibilidad no depende en gran medida de la concentración total. Sin embargo, en el caso del zinc y el cadmio la correlación es inversa y va de ligera a moderada (- 0.35 y -0.45 respectivamente), lo que indica que al aumentar la concentración total disminuya la concentración geodisponible para estos elementos. En la bibliografía está bien documentado que la solubilidad en agua de los elementos metálicos contenidos en un mineral, depende en gran medida de la fase mineral en la que se encuentran, por lo que se explica que las correlaciones sean bajas. En un trabajo previo (Santos, Rodríguez y Huezco 2009) se reportan en los jales de las presas 1, 2 y 3 concentraciones totales que van de 1,183 a 14,660 mg/kg de As, de 327 a 1,754 mg/kg de Pb y de 45 a 308 mg/kg de Cd. Sin embargo, la solubilidad de estos elementos en agua (pH = 5.5) es baja, de 0.36 a 0.82

mg/L para As, 0.16 a 0.86 mg/L para Pb y 0.001 a 0.49 para Cd. Estos resultados permiten ver que a pesar de tener altas concentraciones totales en los jales, los elementos son poco solubles.

5.5.3. Concentración Total vs Concentración Bioaccesible

En los cuatro metales, hay una fuerte correlación directa entre la concentración total en el suelo y la fracción bioaccesibilidad, siendo mayor para el zinc (0.91), cadmio (0.94) y plomo (0.83), y en el caso del cobre es moderada (0.59). Se entiende esta correlación debido a que la prueba de extracción de la fracción bioaccesible se realiza con ácidos a pH menores a 2, simulando los ácidos que existen en el aparato digestivo del ser humano; a una mayor presencia de esos elementos en el suelo debe ser también mayor la fracción que puede ser asimilada por el organismo.

5.5.4. Concentración Geodisponible vs Concentración Bioaccesible

La relación entre la fracción geodisponible y la concentración bioaccesible es inversa y moderada para el zinc (-0.31) y el cadmio (-0.63), y es directa pero ligera en el caso del cobre (0.07) y plomo (0.22). Es interesante el resultado porque significa que la concentración bioaccesible no depende directamente de la solubilidad del elemento, incluso se podría asumir que son independientes estos parámetros y que la solubilidad de los metales pesados en el suelo no se relaciona directamente con el riesgo por ingesta para los seres humanos.

5.5.5. Concentración en planta y su relación con los otros parámetros

La hipótesis que se puede plantear para este análisis es que cada especie responde de manera diferente a la presencia de los metales en el suelo (Cd, Pb, Cu y Zn) y desarrolla mecanismos propios para adaptarse de diferente manera a la presencia de estos elementos.

Se hizo el mismo análisis estadístico determinando el coeficiente de correlación entre la concentración en planta (CP), el factor de bioacumulación (FB) y la concentración total en suelo (CS), la concentración geodisponible (CG) y la concentración bioaccesible (CB). El factor de bioacumulación (FB) se obtuvo dividiendo la concentración obtenida en la planta y la correspondiente del suelo. Para tener una mayor claridad este análisis se hizo de manera separada para cada especie y por cada elemento.

5.5.5.1. Nicotiana glauca

Tabla 12 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cu para la especie Nicotiana glauca

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	x	1			
CP	-0.30	0.04	1		
CB	x	x	-0.57	1	
FB	-0.87	-0.25	0.40	-0.61	1

Tabla 13 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Zn para la especie Nicotiana glauca

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	x	1			
CP	-0.37	0.15	1		
CB	x	x	-0.09	1	
FB	-0.80	0.42	0.53	-0.79	1

Tabla 14 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cd para la especie Nicotiana glauca

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	x	1			
CP	-0.13	0.19	1		
CB	x	x	0.01	1	
FB	-0.75	0.63	0.56	-0.72	1

Tabla 15 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Pb para la especie Nicotiana glauca

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	x	1			
CP	0.004	-0.34	1		
CB	x	x	-0.47	1	
FB	0.20	-0.41	0.89	-0.11	1

La relación entre la concentración acumulada en la planta (CP) y la concentración del suelo (CS) es inversa y moderada para el cobre (-0.30), zinc (-0.37) y para el cadmio (-0.13), y es directa pero muy débil para el plomo (0.004). Propiamente la planta presenta un mecanismo de defensa a las altas concentraciones de metales en el suelo, a una mayor concentración de estos en el suelo la acumulación en la planta es menor.

La relación que existe entre la concentración de metales acumulada por la planta (CP) y la concentración geodisponible (CG) en el suelo es directa pero débil; en el caso del cobre es de 0.04, para el zinc 0.15 y para el cadmio 0.13, en el caso del plomo la relación es inversa de -0.34. De este análisis se desprende que la cantidad de metal acumulada por la planta depende en poca medida de la solubilidad de los elementos en agua, más bien la actividad microbiana es la que debe actuar en mayor medida para disponibilizar los metales para que los asimile la planta.

La relación entre el factor de bioacumulación (FB), definido por la relación concentración en planta/concentración en suelo, y la concentración en suelo (CS), confirma que al aumentar la concentración del metal en el suelo, la planta utiliza un mecanismo de defensa para acumular una menor cantidad de elemento. Esta relación es fuerte pero inversa; para el cobre es de -0.87, para el zinc de -0.80, para el cadmio de -0.75, mientras que para el plomo la relación es directa de 0.20. En el caso particular del plomo, se observa que la planta muestra una ligera afinidad por este elemento.

En el mismo sentido que el análisis anterior, la relación entre la concentración en la planta (CP) y el factor de bioacumulación (FB) es directa va de moderada a fuerte, 0.40 para el cobre, 0.53 para el zinc, 0.56 para el cadmio y 0.89 para el plomo. El aumento en la CS no hace que aumente el FB, en cambio un incremento en la CP si implica un aumento del FB, esto confirma que no hay una relación directa entre la CS y la CP, en cambio la planta si realizar una función microbiana que contribuye a la liberación de los metales y a que aumente el FB.

No hay una clara relación entre CB y CP, para el cobre y el plomo la relación es moderada e inversas (-0.57 y -0.47, respectivamente) pero para el zinc y cadmio es baja (-0.09 y 0.005, respectivamente). Podemos considerar estos parámetros como independientes. Tampoco hay una correlación constante entre la CG y el FB, ya que como se indicó anteriormente la acumulación de metales en la planta depende en poca medida de la fracción geodisponible en el caso de la *Nicotiana glauca*.

Para la CB y FB se observa que si hay una correlación inversa fuerte, pero se explica porque el FB sí es inversamente proporcional a la CS y la CB es directamente proporcional a esta última.

Finalmente, de estos resultados se puede señalar que la especie *N. glauca*, tiene la capacidad de acumular los metales contenidos en el suelo; sin embargo, esta capacidad se debe en mayor medida a la actividad microbiológica que se lleva a cabo en la rizósfera.

5.5.5.2. *Flaveria pubescens*

Tabla 16 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cu para la especie *Flaveria Pubescens*

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	X	1			
CP	0.15	0.59	1		
CB	x	x	0.29	1	
FB	-0.36	0.45	0.84	-0.09	1

Tabla 17 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Zn para la especie *Flaveria Pubescens*

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	X	1			
CP	-0.33	0.82	1		
CB	X	X	-0.25	1	
FB	-0.54	0.82	0.80	-0.58	1

Tabla 18 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cd para la especie *Flaveria Pubescens*

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	X	1			
CP	-0.21	0.99	1		
CB	x	x	-0.20	1	
FB	-0.65	0.83	0.68	-0.41	1

Tabla 19 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Pb para la especie *Flaveria Pubescens*

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	x	1			
CP	-0.09	-0.53	1		
CB	x	x	-0.47	1	
FB	-0.31	-0.64	0.90	-0.07	1

El comportamiento de la *F. pubescens* en algunos parámetros es diferente al de la *N. glauca*. Para la *F. pubescens* también se puede apreciar que la acumulación de los metales en la planta no depende directamente de la concentración total en el suelo, los coeficientes de correlación entre CS y CP son bajos en general y para zinc, cadmio y plomo este coeficiente es inverso. Sin embargo, a diferencia de la *N. glauca*, en esta especie sí hay una fuerte correlación entre la concentración geodisponible (fracción soluble) y la concentración acumulada en la planta, es fuerte y directa para el cobre, zinc y cadmio (0.59, 0.82 y 0.99, respectivamente), esto indica que en la *F. pubescens* la acumulación de metales en la planta sí depende de la concentración geodisponible, así como de la actividad de microorganismos. Para el plomo el coeficiente de correlación es inverso y moderado, pero de igual forma es más significativo que para la especie *N. glauca*.

También se puede observar que la correlación entre la concentración de la planta (CP) y el factor de bioacumulación (FB) es muy fuerte, 0.84 para cobre, 0.80 para zinc, 0.68 para cadmio y 0.90 para plomo. Considerando que la correlación entre el factor de bioacumulación (FB) y la concentración en suelo (CS) es moderada e inversa, entonces se puede identificar que efectivamente la acumulación de la planta está muy relacionada con la geodisponibilidad de los metales en el suelo, siendo la correlación entre CG / FB de 0.45 para cobre, 0.81 para zinc, 0.93 para cadmio y -0.63 para plomo.

También para la especie *F. pubescens* la concentración bioaccesible no guarda una correlación directa con la acumulación de metales en la planta.

A manera de resumen, se puede señalar que en la especie *F. pubescens* la bioacumulación de metales sí depende fuertemente de la geodisponibilidad de estos elementos en el suelo, aunque también de la actividad de los microorganismos.

5.5.5.3. *Tecoma stans*

Tabla 20 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cu para la especie *Tecoma stans*.

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	x	1			
CP	0.70	-0.16	1		
CB	x	x	0.49	1	
FB	-0.38	-0.33	0.37	-0.29	1

Tabla 21 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Zn para la especie *Tecoma stans*

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	X	1			
CP	0.05	0.32	1		
CB	X	X	-0.11	1	
FB	-0.59	0.51	0.62	-0.73	1

Tabla 22 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Cd para la especie *Tecoma stans*.

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	X	1			
CP	0.12	0.18	1		
CB	x	x	-0.20	1	
FB	-0.37	0.48	0.79	-0.63	1

Tabla 23 Correlación estadística “r” entre los parámetros determinados del Pb para la especie *Tecoma stans*

	CS	CG	CP	CB	FB
CS	1				
CG	X	1			
CP	0.34	-0.01	1		
CB	X	x	-0.08	1	
FB	-0.27	-0.37	0.76	-0.47	1

La *T. stans* es la especie que acumuló las menores concentraciones de metales; sin embargo, para esta especie sí se observa una relación directa entre la CS y la CP, particularmente para el cobre esta correlación es fuerte (0.70), en el caso del plomo y cadmio es baja (0.34 y 0.12, respectivamente) y para el zinc es muy ligera (0.05); esto significa que para la *T. stans* hay mayor acumulación en la planta cuando aumenta la concentración en suelo. Al igual que la *N. glauca* la correlación entre la CG y la CP es débil lo que indica que la liberación de los metales se debe a la actividad microbiológica que se lleva a cabo en la rizósfera de esta especie y no a la concentración geodisponible. Tampoco hay una correlación directa entre la CS y el FB, más bien es inversa y va de -0.27 para el plomo a -0.59 para el zinc, es decir, aumenta la concentración en suelo y disminuye el factor de bioacumulación. No obstante, si hay una correlación directa que va de moderada a fuerte (de 0.37 para el cobre a 0.79 para el cadmio) entre la CP y el FB, lo cual confirma que la actividad de los microorganismos es la que libera los metales contenidos en el suelo.

La especie *T. stans* se comporta de manera semejante a la *N. glauca* respecto al mecanismo que aplican para liberar los metales (actividad de microorganismos); aunque las cantidades de metal que acumula son significativamente menores que la *N. glauca*.

6. CONCLUSIONES

Las especies *Nicotiana glauca*, *Tecoma stans* y *Flaveria pubescens* acumulan metales presentes en la capa de suelo vegetal que cubre las presas de jales 1, 2 y 3 de la mina La Negra.

Las tres especies crecen en esta zona minera lo que es importante pues pueden ser empleadas para la revegetación de las presas de jales de minas cercanas a esta zona.

La presa con mayor concentración de metales fue la número 3.

La *Flaveria pubescens* fue la especie que tuvo las mayores concentraciones de Cu, Zn y Pb y la *Nicotiana glauca* fue la especie que presentó el mayor contenido de Cd. La *Tecoma stans* fue la especie que acumuló menos metales en su estructura.

La concentración geodisponible de los elementos Cu, Zn y Cd fue mayor en la presa 1, debido a la generación de acidez en la presa.

La mezcla suelo-jal y la actividad de las plantas en el suelo, trasloca los elementos del jal al suelo y del suelo a la planta, por lo que sería conveniente replantear la manera de cubrir los depósitos al momento de su cierre.

La correlación entre la concentración total en el suelo y la fracción bioaccesible dependen entre sí, puesto que si aumenta la concentración total de un elemento en el suelo la fracción bioaccesible aumentará y viceversa, no así para la concentración total en el suelo y la fracción geodisponible, las cuales son prácticamente independientes, por lo que la geodisponibilidad de un elemento debe depender más de su especie mineralógica y/o de las condiciones del medio donde se encuentra. Por tanto, es importante reconsiderar cómo es que se están caracterizando los depósitos de residuos, sobre todo cuando estos se encuentran cerca de poblaciones, puesto que una baja geodisponibilidad no asegura una baja bioaccesibilidad debido a su independencia.

En la *N. glauca*, para los elementos cobre, zinc y cadmio, cuando disminuye la concentración total y la concentración bioaccesible aumenta el factor de bioacumulación y viceversa, lo que indica que la planta ocupa un mecanismo de defensa para dejar de acumular metal en dado caso que aumente la concentración total y bioaccesible, no así para el plomo.

La *F. pubescens* para el cobre, zinc y cadmio aumenta la concentración en la planta si se aumenta la concentración geodisponible, lo que tiene como consecuencia que el factor de bioacumulación aumente de la misma manera.

Finalmente, la *T. stans* se comporta de manera muy similar a la *N. glauca*, lo que implica que depende en gran medida de la actividad microbiana y no de las concentraciones tanto totales, ni geodisponibles.

Es de suma importancia tener en cuenta que el hecho de que la concentración total aumente o disminuya, la bioaccesibilidad del elemento en un medio específico seguirá siendo la misma puesto que se trata de un parámetro en fracción porcentual más no la cantidad bioaccesible que sí depende de la concentración total.

7. REFERENCIAS

- Video promocional de Minera "La Negra"*. Directed by Aurcana. Produced by Minera "La Negra" S.A. de C.V. 2010.
- BHL. *Biodiversity Heritage Library*. 2011. <http://www.biodiversitylibrary.com>.
- Brunetti, G., K. Farrag, P. Soler, F. Nigro, and N. Senesi. "Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by *Brassica napus* from contaminated soils in the Apulia region, Southern Italy." *Geoderma*, no. 160 (2011): 517-523.
- Carrillo González, Rogelio, and María del Carmen González Chávez. "Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes." *Environmental Pollution*, no. 144 (2006): 84-92.
- CONABIO. "Información de especies." *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. 2011. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/12-bigno8m.PDF.
- CONAGUA. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tolimán, Estado de Querétaro*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2002.
- CRM. *Monografía geológico-minera del Estado de Querétaro*. Consejo de Recursos Minerales, 1992.
- DME. *Guidelines on the Safe Design and Operating Standarts for Tailing Storage*. Western Australia: Department of Minerals and Energy, 2005.
- EPA. *Tailings containment, best practice environmental management in mining*. Environmental Protection Agency, 1995.
- Evangelou, M., M. Ebel, and A. Schaeffer. "Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soils. Effect, mechanism, toxicity and fate of chelating agents." *Chemosphere*, no. 68 (2007): 989-1003.
- Girouard, Eric, and Gerald Zagury. "Arsenic bioaccessibility in CCA-contaminated soils: Influence of soil properties, arsenic fractionation and particle-size fraction." *Science of the total environment*, no. 407 (2009): 2576-2585.
- González Gallardo, Israel. "Estudio preliminar de los jales de la mina "La Negra" para establecer criterios ambientales en la etapa de cierre. Tesis profesional (en revisión)." Facultad de Ingeniería, UNAM., 2009.
- González Ramírez, Patricia. "Bacterias de la rizósfera en suelos contaminados con metales pesados." In *El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas*, edited by María Carmen González Chávez, Jesús Pérez Moreno and Rogelio Carrillo González. 2005.
- Hund-Rinke, K., y W. Kördel. «Underlying issues in bioaccessibility and bioavailability: experimental methods.» *Ecotoxicology and environmental safety*, nº 56 (2003): 52-62.

- INE. *Instituto Nacional de Ecología, A. C.* 2011. http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumeness/FLOVER/49-nee_III.pdf (accessed 2011).
- Intawongse, Marisa, and John Dean. "Use of the physiologically-based extraction test to assess the oral bioaccessibility of metals in vegetable plants grown in contaminated soil." *Environmental pollution*, no. 152 (2008): 60-72.
- Jiménez, Carolina. *Restauración de minas superficiales en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006.
- Liu, Mei-Qing, Junta Yanai, Rong-Feng Jiang, Fusuo Zhang, Steve P. McGrath, and Fang-Jie Zhao. "Does cadmium play a physiological role in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*?" *Chemosphere*, no. 71 (2008): 1276-1283.
- MAC. *A guide to audit and assessment of tailings facilities management*. The Mining Association of Canada, 2009.
- . *A guide to the management of tailings facilities*. The Mining Association of Canada, 1998.
- . *The Mining Association of Canada's site*. 2011. <http://www.mining.ca> (accessed 2011).
- Marchiol, L., S. Assolari, P. Sacco, and G. Zerbi. "Phytoextraction of heavy metals by canola (*Bassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil." *Environmental pollution*, no. 132 (2004): 21-27.
- Marguí, E., I. Queralt, M. L. Carvalho, and M. Hidalgo. "Assessment of metal availability to vegetation (*Betula pendula*) in Pb-Zn ore concentrate residues with different features." *Environmental pollution*, no. 145 (2007): 179-184.
- Maxted, A. P., C. R. Black, H. M. West, N. M. J. Crout, S. P. McGrath, and S. D. Young. "Phytoextraction of cadmium and zinc from arable soils amended with sewage sludge using *Thlaspi caerulescens*: development of a predictive model." *Environmental pollution*, 2007: 363-372.
- MCA. *Strategic framework for tailing management*. Minerals Council of Australia, 2003.
- MEND. *Mine Environment Neutral Drainage*. 2011. <http://www.mend-nedem.org> (accessed 2011).
- MPD. *Management of tailings storage facilities*. Victoria: Minerals and Petroleum Division, 2004.
- NO/AMI. *National Orphaned/Abandoned Mines Initiative's site*. 2011. <http://www.abandoned-mines.org> (accessed 2011).
- Olson, Betty. «Microbial mediation of biogeochemical cycling of metals.» En *Applied environmental geochemistry*, editado por Iain Thornton, 201-206. Academic Press, 1983.
- Peichun, Chang, Kim Ju-Yong, and Kim Kyoung-Woong. "Concentrations of arsenic and heavy metals in vegetation at two abandoned mine tailings in South Korea." *Environmental Geochemistry and Health*, no. 27 (2005): 109-119.

- Peijnenburg, W., and T. Jager. "Monitoring approaches to assess bioaccessibility and bioavailability of metals: Matrix issues." *Ecotoxicology and environmental safety*, no. 56 (2003): 63-77.
- Poggio, Laura, Borut Vrscaj, Rainer Schulin, Erwin Hepperle, and Franco Marsan. "Metals pollution and human bioaccessibility of topsoils of Grugliasco (Italy)." *Environmental pollution*, 2009: 680-689.
- Pongrac, Paula, Fang-Jie Zhao, Jaka Razinger, Alexis Zrimec, and Marjana Regvar. "Physiological responses to Cd and Zn in two Cd/Zn hyperaccumulating *Thlaspi* species." *Environmental and experimental botany*, 2009.
- Rodriguez Cruz, Geovanni. *Evaluación del uso de plantas para el cierre de presas de jales*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- Santos Jallath, José Enrique. *Cierre de presas de jales y remediación de suelos contaminados con residuos mineros*. n.d.
- Santos Jallath, José Enrique. «Closure of tailings dams and remediation of soils contaminated with wastes.» En *Remediation of soils and aquifers*, editado por L. G. Torres y E. R. Bandala, 213-230. U. S. A.: Nova Publishers, 2009.
- Santos, José Enrique, and Sayuri Katagiri. "Disponibilidad de metales pesados en suelos utilizados para el recubrimiento de depósitos de jales." *Geomimet*, no. 297 (2012): 18-34.
- Santos, José Enrique, Geovanni Rodríguez, and José de Jesús Huevo. "Estudio sobre plantas acumuladoras de As, Cd, Pb, Cu y Zn, en jales de Minera La Negra." *Memorias de la XVIII Convención Internacional de Minería 2009*. Veracruz, México, 2009.
- SEMARNAT. "NOM-141-SEMARNAT-2003 que establece los procedimientos para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales." In *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F., 2 de Marzo, 2007: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004.
- SEMARNAT. "NOM-147-Semarnat/SSA-2004 que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados con arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio." In *Diario Oficial de la Federación*, by Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., 2 de Marzo de 2007, n.d.
- Siegel, Frederic. *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer, 2002.
- Stegmann, Rainer. *Treatment of contaminated soil: fundamentals, analysis and applications*. Berlín: Springer Verlag, 2001.
- Tordoff, G., A. J. Baker, and A. J. Willis. "Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes." *Chemosphere*, no. 41 (2000): 219-228.

Turner, Andrew, and Lindsey Simmonds. "Elemental concentrations and metal bioaccessibility in UK household dust." *Science of the total environment*, no. 371 (2000): 74-81.

Visoottiviset, P., K. Francesconi, and W. Sridokchana. "The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land." *Environmental pollution*, no. 118 (2002): 453-461.

Wise, Donald L. *Bioremediation of contaminated soils*. New York: CRC Press, 2000.

Yanai, Junta, Zhao Fang-Jie, Steve P. McGrath, and Takashi Kosaki. "Effect of soils characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*." *Environmental pollution*, 2006: 167-175.

Zhaier, H., et al. *Journal of hazardous materials*, no. 183 (2010): 609-615.