



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL USO DE PLANTAS PARA EL
CIERRE DE PRESAS DE JALES**

Tesis

Que para obtener el Título de
Ingeniero de Minas y Metalurgista

Presenta

Geovanni Rodríguez Cruz

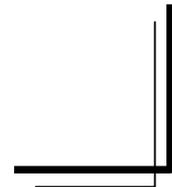
Director de Tesis.

M. en I. José Enrique Santos Jallath



México D. F.

Agosto de 2010





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.



Dedicado a:

Leshem y Lebab Rosh



Porque he aquí, viene el día ardiente como un horno, y todos los soberbios y todos los que hacen maldad serán estopa; aquel día que vendrá los abrasará, ha dicho Jehová de los ejércitos, y no les dejará ni raíz ni rama. Mas a vosotros los que teméis mi nombre, nacerá el Sol de justicia, y en sus alas traerá salvación; y saldréis, y saltaréis como becerros de la manada. Hollaréis a los malos, los cuales serán ceniza bajo las plantas de vuestros pies, en el día en que yo actúe, ha dicho Jehová de los ejércitos.

Acordaos de la ley de Moisés mi siervo, al cual encargué en Horeb ordenanzas y leyes para todo Israel.

He aquí, yo os envío el profeta Elías, antes que venga el día de Jehová, grande y terrible. El hará volver el corazón de los padres hacia los hijos, y el corazón de los hijos hacia los padres, no sea que yo venga y hiera la tierra con maldición.



AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado como parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT IN109808, de la Universidad Nacional Autónoma de México, “Evaluación del uso de plantas para la estabilización de presas de jales y remediación de suelos afectados con metales. Estudio de caso: Mina La Negra, municipio de Cadereyta, Querétaro”.

Se agradece al M.C. Carlos Gómez Hinostrosa, M.C. Verónica Juárez Jaimes y al M.C. Rafael Torres Colín del Instituto de Biología, por su trabajo en la identificación de las plantas. A la I.Q. Guadalupe Contreras Ordaz y a la M.C. Guadalupe Urquiza Moreno, por su apoyo en el análisis químico. A la M. I. Alejandrina Castro Rodríguez, Diana Santa y Sayuri Katagiri, por su colaboración en diferentes actividades relacionadas con el presente trabajo. Asimismo agradecemos las facilidades brindadas por la Unidad Minera La Negra (Reyna Mining Engineering) para realizar el muestreo de plantas.

Un agradecimiento especial al M. I. José Enrique Santos Jallath, por todo su apoyo y por ser más que un director de tesis.



ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO CONCEPTUAL	6
2.1 Características del sitio de estudio	6
2.2 Proceso de producción de los jales	8
2.3 Característica de los jales	9
2.4 Capacidad de las plantas para acumular metales	12
2.4.1 <i>Fitorremediación</i>	12
2.4.2 <i>Plantas acumuladoras de metales en presas de jales</i>	15
2.5 Uso de plantas en el cierre de presas de jales	17
3. METODOLOGÍA	18
3.1 Criterios para la planeación del muestreo	18
3.2 Procedimiento del muestreo	18
3.3 Identificación taxonómica de las muestras	24
3.4 Análisis químico	24
3.4.1 <i>Preparación de las muestras</i>	24
3.4.2 <i>Molienda</i>	26



3.4.3 Digestión	27
3.4.4 Determinación de Arsénico por ICP	29
3.4.5 Determinación de Cobre, Plomo, Cadmio y Zinc por AAS...	30
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
4.1 Especies identificadas	31
4.2 Concentración de metales y metaloides en las plantas	32
4.3 Discusión de resultados	37
5. USO DE PLANTAS PARA EL CIERRE DE LAS PRESAS DE JALES	50
5.1 Plantas con mayor potencial	50
5.2 Propuesta para el uso de las plantas en el cierre	51
6. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	56



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Concentración total de metales en los jales	10
Tabla 2. Fracción soluble de los jales	10
Tabla 3. Potencial de generación de acidez en los jales	11
Tabla 4. Composición mineralógica de los jales	12
Tabla 5. Especies identificadas en las presas de jales.....	31
Tabla 6. Concentración total de metales en las partes de la planta	32



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa hidrográfico	7
Figura 2. Muestreo del tallo en una especie grande	19
Figura 3. Muestreo de una planta pequeña	19
Figura 4. Toma de muestra del sustrato	20
Figura 5. Muestras empacadas para identificación taxonómica	20
Figura 6. Muestra empacada para determinación de metales	21
Figura 7. Ubicación de las muestras en la presa 1	22
Figura 8. Ubicación de las muestras en la presa 2	22
Figura 9. Ubicación de las muestras en la presa 3	23
Figura 10. Tarjeta de identificación de las muestras	23
Figura 11. Muestras montadas para herbario	24
Figura 12. Prensa de tornillo.....	25
Figura 13. Horno de convección	25
Figura 14. Muestra dividida en raíz, tallo, rama, hoja y flor	26
Figura 15. Molino para granos	27
Figura 16. Cernido del producto de molienda	27
Figura 17. Digestor de micro-ondas	28
Figura 18. Balanza analítica	28
Figura 19. Filtración de las muestras	28



Figura 20. Envasado de las muestras	28
Figura 21. Lectura en el ICP	29
Figura 22. Lectura por Absorción Atómica	30
Figura 23. Nicotina glauca	37
Figura 24. Flaveria pubescens	38
Figura 25. Schinus molle	38
Figura 26. Casuarina Sp.	39
Figura 27. Tecoma stans	39
Figura 28. Prosopis Sp.	40
Figura 29. Cenchrus ciliaris	40
Figura 30. Maurandia antirrhiniflora	41
Figura 31. Ricinus cummunis	41
Figura 32. Opuntia lasiacantha	42
Figura 33. Concentración total acumulada de metales y metaloides	43
Figura 34. Concentración de arsénico y su distribución en la planta	44
Figura 35. Concentración de cobre y su distribución en la planta	46
Figura 36. Concentración de cadmio y su distribución en la planta	47
Figura 37. Concentración de plomo y su distribución en la planta	48
Figura 38. Concentración de zinc y su distribución en la planta	49
Figura 39. Fauna transitando las presas de jales	52
Figura 40. Propuesta de reforestación	53



RESUMEN

Se estudiaron especies vegetales que crecen en las presas de jales fuera de operación en la mina La Negra, ubicada en el estado de Querétaro.

Se colectaron 37 muestras de once especies de plantas que fueron analizadas en el Instituto de Biología de la UNAM para su identificación taxonómica. Las 25 muestras restantes fueron lavadas y secadas en un horno de convección por espacio de cinco días. Posteriormente se separaron en: raíz, rama, hoja, y flor según fuera el caso y se molieron a menos 30 mallas. Las muestras se digirieron en digestor de microondas con el método 3051a de la EPA y se analizaron Cu, Pb, Cd y Zn por absorción atómica y As por emisión de plasma.

Las especies con mayores concentraciones de metales fueron: *Nicotina glauca* y *Flaveria pubescens*. Algunas muestras de *N. glauca* alcanzaron concentraciones hasta de 2344.77mg/kg de Zn, 134.94mg/kg de Cd y 123.59mg/kg de As. De las muestras de *F. pubescens* se leyeron concentraciones de hasta 223.52mg/kg de Cu y 323.44mg/kg de Pb.

Las especies grandes como *Ricinus cumunis*, *Casuarina Sp.* y *Schimus molle*, resultaron ser pobres concentradoras de elementos.

Ninguna de las especies analizadas alcanzó la clasificación de "hiperacumuladora", según los criterios establecidos por diversos autores; sin embargo, varias de ellas demostraron su adaptación a los elementos tóxicos contenidos en los jales. Este estudio servirá como apoyo para establecer los criterios de reforestación cuando las presas activas lleguen a la etapa de cierre.



1. INTRODUCCIÓN

El uso de los recursos naturales de nuestro planeta es fundamental para la supervivencia y prosperidad de la sociedad. Sin embargo, la remoción de los recursos de un ambiente a otro para su aprovechamiento genera en cierta manera un impacto en ambos. Los residuos provenientes de la actividad minera es uno de los mejores ejemplos de tal escenario. La presencia de metales pesados y metaloides en los residuos mineros puede causar severos daños al ecosistema incluyendo plantas, animales, microorganismos y la salud humana. Estos efectos pueden ser particularmente serios y pueden causar severos riesgos al entorno ecológico y a la salud humana cuando las actividades mineras se localizan en la vecindad de ambientes urbanos. Por lo tanto es necesario minimizar o mitigar el impacto por la explotación de los recursos naturales (Nazmul Haque, *et al.*, 2007).

Desde el siglo XVI en México se han explotado yacimientos polimetálicos asociados con oro y plata, principalmente en el centro y norte del país. En un principio para la extracción de los elementos metálicos a partir de los minerales se empleó el proceso llamado amalgamación, en el cual se trituraba el mineral para ponerlo en contacto con mercurio y separar los elementos valiosos (oro y plata) llamados “mena”, de los minerales sin valor llamados “ganga”, estos residuos recibieron el nombre de jales¹ y eran depositados en patios aledaños a la mina. Luego, a principios del siglo XIX cuando se cambió este proceso por otro llamado “cianuración”, fue necesario moler el mineral a partículas muy finas, incrementando así el problema ambiental; pues resultaba difícil contener estas partículas en los sitios de almacenamiento, llamados “presas de jales”, pues estaban expuestas a ser arrastradas por el viento y por el agua. Para el siglo XX, surgió un proceso físico-químico llamado “flotación”, el cual requería una etapa de molienda fina para alcanzar el grado de liberación entre los minerales de mena y ganga.

¹ Jal proviene del vocablo nahuatl “xali” que significa “arena”.



Con el paso de los años los yacimientos con altas leyes se han agotado y para que esta actividad siga siendo redituable ha sido necesario incrementar la producción, además la demanda de los productos mineros ha sido cada vez mayor debido al crecimiento de algunos países, generando cada vez mayores volúmenes de residuos y sitios de confinamiento más grandes.

Los problemas ambientales asociados a las presas de jales, además de su gran volumen, son la erosión eólica e hídrica y la generación de acidez. La generación de acidez es un proceso natural que se puede presentar en los depósitos que contienen cantidades significativas de sulfuros metálicos (Sengupa, 1993; Ripley, 1996; Lottermoser, 2007).



En algunos casos, predominan los sulfuros como pirita, pirrotita, marcasita, y esfalerita, entre otros, los cuales con el proceso natural de oxidación y el paso del tiempo, generan acidez en los residuos (Lottermoser, 2007, Sengupa, 1993, Environment Australia, 1997).



La presencia de minerales básicos como la calcita o minerales como los aluminosilicatos, hidróxidos o las arcillas, evitan la generación de acidez, ya que causan un efecto de neutralización.



Cuando se presenta generación de acidez en las presas de jales, la acción del ácido sobre los minerales lixivia los metales contenidos y los moviliza contaminando suelos y cuerpos de agua.

Por esta razón los jales depositados en los sitios de confinamiento han sido estudiados de manera particular para conocer su potencial peligrosidad al ambiente. La forma de saberlo es mediante el análisis de su contenido, en busca de elementos metálicos potencialmente tóxicos como As, Cd, Pb, Se, Ni, y otros, y la disponibilidad de los mismos bajo las condiciones del lugar, como acidez, así como la acción del viento y agua.



A nivel mundial se han realizado diversos estudios encaminados a conocer el efecto de los jales en el medio ambiente. En Países como Corea del Sur, Nueva Zelanda, China, Estados Unidos, y otros, se ha estudiado también la concentración de metales en plantas que crecen en depósitos de jales y algunas alternativas para evitar la contaminación de suelos y cuerpos de agua con jales (Chang Peichung, *et al.*, 2005, Moreno Favio, *et al.*, 2005, Chan Gilbert, *et al.*, 2003, Haque Nazmul, *et al.*, 2007).

Actualmente en México, ya se existe una legislación en materia ecológica, fundamentalmente exige se tenga el cuidado necesario para evitar que los desechos de un proceso productivo sean peligrosos al medio ambiente en que sean depositados. La NOM-141-SEMARNAT-2003 establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como los criterios para la selección del sitio, diseño, construcción, operación y postoperación de una presa de jales.

Las empresas mineras al aplicar la normatividad, desarrollaron una rigurosa planeación del cierre de las presas de jales cuando estas todavía se encuentran en operación, estopara garantizar que en la etapa de postoperación, se apliquen las medidas necesarias para brindar estabilidad física y química a la presa, así como evitar la dispersión de los jales.

En México se han hecho diversos estudios en zonas afectadas por la dispersión de los jales; en algunos casos se encontraron rastros de elementos potencialmente tóxicos en estas zonas. También se han estudiado los mecanismos de liberación de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) contenidos en ellos, así como los mecanismos de retención que actúan en los suelos contaminados; donde se detectó, que la liberación se presenta por medio de la lixiviación (Ongley, *et al.*, 2007; Romero, *et al.*, 2006; Armienta, *et al.*, 2003; Romero, *et al.*, 2007; Razo, *et al.*, 2004; García, *et al.*, 2004 y Mendoza, *et al.*, 2006).

Una línea de investigación considera que recubrir con materiales naturales y sintéticos ha sido lo más utilizado, aunque el costo en algunos casos resulta elevado (Lotermosser, 2007; Sengupta, 1993; Environment Australia, 1995).



En México se ha preferido el utilizar materiales naturales como roca estéril y posteriormente una capa de suelo natural sobre la cual se promueve el desarrollo de vegetación para reintegrar la presa de jales a las condiciones del entorno.

Las plantas que logran crecer en una presa de jales, contribuyen de manera significativa a la estabilización física del depósito ya que con las raíces permiten la fijación del suelo y reducen la erosión por efecto de la lluvia y el viento. Pero además desarrolla la capacidad de acumular o fijar los metales y metaloides contenidos en los residuos, evitando de esta manera su liberación (Chang, *et al.*, 2005; Visoottivisetha,*et al.*, 2002; Li,*et al.*, 2007; Carrillo y González, 2006)

El presente estudio se llevó a cabo en el estado de Querétaro, en la mina La Negra, ubicada en la localidad de Maconí, en el municipio de Cadereyta. Los residuos de la mina han sido almacenados en cinco presas; tres de ellas han quedado fuera de operación y con el paso del tiempo ha crecido sobre ellas vegetación nativa, la cual se considera puede ser de utilidad para el cierre de las propias presas de jales.

Se propone como hipótesis que las plantas nativas que se observan en las inmediaciones de las presas de jales de la mina La Negra, han desarrollado mecanismos para adaptarse a la presencia de los metales pesados contenidos en los jales, por lo que éstas pueden ser las mejores especies para utilizarse en la reforestación de las presas que aún no están recubiertas y para ser aplicadas en una técnica de fitorremediación en suelos cercanos que hayan sido contaminados.

El objetivo general del estudio es identificar las especies nativas que crecen en las presas de jales de la mina La Negra y evaluar su capacidad para retener o fijar metales, de tal forma que puedan ser utilizadas en la reforestación de las presas activas y ayudar a la estabilidad física y química de estos depósitos.



2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Características del sitio de estudio

La Unidad Minerala Negra se encuentra ubicada en la porción nororiental del estado de Querétaro, a 1.5 km al Este de la localidad de Maconí del municipio de Cadereyta. Fisiográficamente se encuentra en la provincia Sierra Madre Oriental en el borde occidental de la misma, llamada Subprovincia del Carso Huasteco. Geomorfológicamente la provincia corresponde al tipo de montañas plegadas en una etapa del ciclo erosivo parecida a la madurez.

Sus coordenadas geográficas son: (UTM) 2304048 N, 445652 E a 1861msnm².

Entre noviembre y abril su temperatura media mínima es de 9°C y la temperatura media máxima es de 21°C con precipitación total de 75 a 100 mm, con lluvia apreciable mayor a 0.1 mm entre 1 y 29 días (INEGI, 1985 a). Entre mayo y octubre la temperatura media mínima es de 12°C y la temperatura media máxima es de 27°C con precipitación total de 175 a 250 mm, con lluvia apreciable mayor a 0.1 mm entre 60 y 89 días. Su Isoterma media anual es de 18°C y su Isoyeta anual entre 800 y 1,000 mm (INEGI, 1985 b).

El área de la mina La Negra pertenece a la provincia de la Sierra Madre Oriental y de la subprovincia del Carso Huasteco. Esta zona tiene altitudes de más de 2600m, queda limitada al norte por el cañón del río Santa María y al sur por el río Moctezuma que, respectivamente, marcan parte del lindero de la entidad con San Luis Potosí e Hidalgo (INEGI, 2004).

La cuenca del río Moctezuma tiene como principal corriente al río Moctezuma, que se origina en el estado de México, donde se conoce como San Jerónimo,

² Las coordenadas geográficas fueron tomadas con un sistema de geoposicionamiento (GPS) en el sitio de estudio.

Arroyo Zarco y finalmente en la entidad como río San Juan, que posteriormente al juntarse con el río Tula que viene del estado de Hidalgo, cambia de nombre a río Moctezuma. Aguas abajo, se le une el río Extóraz. La cuenca ocupa 4,400 km² y aporta un desplazamiento promedio de 444 millones de metros cúbicos al año. El arroyo Maconí es de flujo permanente y tiene un gasto medio anual de 1.5 m³/s. La Figura 1 muestra el mapa con la hidrografía de la zona.



Figura 1. Mapa hidrográfico.

Con respecto al agua subterránea, el área pertenece al acuífero Moctezuma, pero no se tiene la descripción del mismo por parte de CONAGUA; sin embargo, el acuífero Tolimán se encuentra aledaño a la zona. En este acuífero, el agua es de buena calidad para uso doméstico. La dirección del flujo subterránea es de sur a norte, la cual coincide con la red de escurrimientos superficiales (CONAGUA, 2002).



Se encuentra vegetación natural e inducida; matorral submontano y matorral inerme. La vegetación varía con la elevación: en las partes altas predominan las coníferas como el pino, enebro, encino y cedro. En las depresiones donde hay mayor temperatura y menor humedad el terreno es árido y desprovisto de suelo; los órganos, cardenches, ocotillo, lechuguilla, maguey y nopal son la vegetación característica (INEGI, 1985 c). La agricultura es detemporal, con cultivos anuales (INEGI, 1985 c). Los terrenos son aptos para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por ganado caprino (INEGI, 1985 d).

2.2 Proceso de producción de los jales

Los cuerpos mineralizados en el área de La Negra son del tipo hidrotermal en skarn, contenidos en roca muy competente; compuesta por capas muy delgadas de caliza laminar gris oscuro con intercalaciones de bandas de pedernal negro. El área mineralizada se compone de varias chimeneas con inclinación de 60° o mayor que presentan formas irregulares con tendencia oval en planta, de las cuales tienden a desprenderse algunos mantos de alcance local. El método de explotación empleado en la mina es el de tumba por subniveles con barrenación larga descendente, con una producción diaria aproximada de 1,000 toneladas métricas trabajando tres turnos y seis días por semana³.

El mineral extraído de los rebajes es enviado a una estación primaria ubicada en interior mina, donde el mineral es reducido a menos 4 pulgadas con una quebradora de quijadas y depositado en una tolva subterránea.

Para llevar a cabo la concentración de las especies minerales de interés, el tratamiento metalúrgico comienza con la reducción de tamaño del mineral de

³ Datos proporcionados por el personal de la planta en mayo de 2008.



menos cuatro pulgadas hasta obtener 100% a menos 3/8 de pulgada en un circuito cerrado de trituración con quebradoras de cono.

Luego de esta reducción de tamaño, el mineral es enviado a una etapa de molienda con molino de bolas en circuito cerrado con clasificador de hidrociclón, de donde se envía al proceso de concentración con un 54% a menos 200 mallas (-74 μ m).

La concentración se lleva a cabo por el proceso de flotación selectiva, obteniéndose así dos concentrados; uno de plomo-cobre-plata y otro de zinc-plata, con 10% y 9% de humedad, respectivamente.

Las colas del circuito de plomo-cobre-plata se convierten en la cabeza del circuito de zinc-plata y las colas de este son enviadas a la presa de jales. Actualmente la mina La Negra tiene cinco presas de jales, tres de ellas están fuera de operación y la presa 5 es la que ahora recibe las colas del proceso (Minera La Negra, 2008).

2.3 Característica de los jales

En un estudio previo realizado por Santos,*et al.*, 2009, se hizo la caracterización de los jales en las presas antiguas de la mina La Negra. En este estudio se reportan las concentraciones totales de metales, las cuales se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1. Concentración total de metales en los jales

Presa	As[mg/Kg]	Pb[mg/Kg]	Cd[mg/Kg]	Cu[mg/Kg]	Zn[mg/Kg]	Fe[mg/Kg]
Presa 1	14660	1754	307.5	458.7	*	39890
Presa 2	1182.5	327.1	45.1	266.85	507.45	22465
Presa 3	3132.5	337.25	82.2	149.45	447.85	30885

* No fue reportado

La fracción soluble que reporta dicho estudio, se determinó aplicando la prueba de extracción que se establece en la NOM-141-SEMARNAT-2003. Los resultados se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2. Fracción soluble de los jales.

Presa	As[mg/L]	Pb[mg/L]	Cd[mg/L]	Cu[mg/L]	Zn[mg/L]	Fe[mg/L]
Presa 1	0.82	0.855	0.489	10.62	44.23	29.67
Presa 2	0.36	0.264	ND	0.15	0.02	0.292
Presa 3	0.45	0.16	0.001	ND	ND	0.026

ND: no detectado

Del análisis granulométrico se obtuvo que en las presas 2 y 3 los jales eran finos ya que más del 50 % está por debajo de la malla número 200. En el caso de la presa 1, dado que la muestra fue tomada en el talud, los jales son más gruesos y el 50 % está arriba de la malla número 100 (Santos, *et al.*, 2009).



También se hizo una determinación del potencial de generación de acidez de estos jales mediante la aplicación de la prueba balance ácido-base señalada en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

De las muestras analizadas solo los jales de la presa 1 resultaron generadores de acidez. En estos jales se puede observar la oxidación del residuo sobre el talud de la presa. Las muestras de las presas 2 y 3, así como los jales frescos de la planta de beneficio, no son generadores de acidez de acuerdo con los resultados obtenidos. (González, 2009). Los valores de pH que se registraron en las muestras se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Potencial de generación de acidez en los jales (González, 2009)

Muestra	PN/PA	Generación de Acidez
Jales de la Presa 1	-0.5632	Si
Jales Frescos	1.40	No
Jales de la Presa 2	1.73	No
Jales de la Presa 3	15.20	No

Nota: Análisis de datos realizados con base en los criterios señalados en la NOM-141-SEMARNAT-2003, para determinar el potencial de generación de acidez en jales mineros.

La composición mineralógica de los jales de la mina encontrados por González, 2009 se presenta en la Tabla 4.



Tabla 4. Composición mineralógica de los jales.

Muestra	Mineral
Presa 1	Yeso, Hematita, Calcopirita, Cuarzo, Goetita, Pirrotita, Azufre
Presa 2	Calcita, Cuarzo, Yeso, Hematita, Montmorillonita, Ortoclasa
Presa 3	Calcita, Yeso, Cuarzo, Ortoclasa, Pirita, Jarosita, Muscovita, Montmorillonita

2.4 Capacidad de las plantas para acumular metales

Desde hace muchos años se ha estudiado que las plantas tienen la capacidad de acumular metales o algunos otros contaminantes en su estructura. Al parecer los agrónomos fueron los primeros en identificar este fenómeno. Con el paso de los años ha sido posible identificar que las plantas realmente han desarrollado esta capacidad, además de otros mecanismos para adaptarse a la presencia de los contaminantes. Esta característica constituye la base de la fitorremediación, que consiste en diversas tecnologías desarrolladas para remediar suelos contaminados con el uso de plantas.

2.4.1 Fitorremediación

La “fitorremediación”, también llamada “biorremediación”, “fitoextracción”, “remediación verde”, etc. (Chaney R., *et al.*, 2000); es una técnica desarrollada para tratar sitios contaminados con metales, metaloides, hidrocarburos, y más; que implica el uso de plantas con capacidad fisiológica y bioquímica para remover, transferir, estabilizar y/o degradar los contaminantes. (Padmavathiamma,*et al.*, 2007)



La fitorremediación puede ser aplicada tanto a contaminantes orgánicos como a los no orgánicos presentes en sustratos sólidos (suelos), en sustratos líquidos (agua) e incluso en el aire (Salt,*et al.*, 1998; Adler,*et al.*, 1994). La fitorremediación se divide en varios tipos de procesos que son: fitoextracción, fitodegradación, rizofiltración, fitoestabilización y fitovolatilización (Salt,*et al.*, 1998; González, *et al.*, 2005; EPA Estados Unidos,2000).

Fitodegradación: Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos; al introducir los contaminantes al proceso metabólico de la planta y mezclarse con enzimas producidas por la planta (EPA Estados Unidos, 2001).Se usa para tratar sitios contaminados con compuestos orgánicos, (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno),atrazina, solventes clorados, DDT, herbicidas, fenoles y nitrilos (EPA Estados Unidos, 2000).

Fitoextracción: Las plantas absorben el contaminante por medio de la raíz y lo traslocan a las partes cosechables de la planta (principalmente la parte aérea) (EPA Estados Unidos, 2001).Se usa en el tratamiento de sitios contaminados con metales como Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn,⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁹Pu y ^{238,234}U, entre otros (EPA Estados Unidos, 2000).

Fitoestabilización: En este proceso las plantas logran reducir la movilidad de los metales y evitar su migración al absorberlos por medio de la raíz y acumularlos en la misma o precipitarlos en la zona circundante a la raíz (EPA, Estados Unidos, 2001). Se usa para sitios contaminados con metales y metaloides como As, Cd, Cu, Pb y Zn (EPA Estados Unidos, 2000).

Fitovolatilización: Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración (EPA Estados Unidos, 2001). Se usa para mercurio, selenio y solventes clorados (EPA Estados Unidos, 2000).

Rizofiltración: Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos (EPA, Estados Unidos, 2001). Se usa en



sitios contaminados por Cd, Co, Cr, Ni, Hg, Pb, Se, Zn isótopos radioactivos y compuestos fenólicos (EPA, Estados Unidos, 2000).

Esta técnica ha sido empleada para la remediación de suelos porque posee muchas ventajas con respecto a los métodos convencionales de tratamientos de lugares contaminados; en primer lugar es una tecnología económica, de bajo costo y de aplicación sencilla, en segundo lugar posee un impacto regenerativo en lugares en donde se aplica y en tercer lugar su capacidad extractiva se mantiene debido al crecimiento vegetal (González, *et al.*, 2005).

El uso de plantas para remediación de suelos contaminados con metales es relativamente nuevo. Aunque se conoce desde hace siglos que algunas plantas retienen metales, el estudio del fenómeno se enfocó a la búsqueda de yacimientos minerales por medio de bio-indicadores, es decir, a estudiar las plantas que estaban asociadas a yacimientos minerales (por ejemplo yacimientos de azufre). Antes de aplicarse para la remediación de suelos, se tenía conocimiento de plantas que podían acumular Se, Si, Zn, Cd, y Co (Rufus L.,*et al.*, 2000).

Posteriormente con técnicas más modernas para estudiar la concentración de metales se reportan varias especies hiper-acumuladoras por diferentes investigadores. Carrillo R.,*et al.*, 2005, reporta que la especie *Poligonum aviculare* concentró 9,236mg/kg de Zn y la *Jatropha dioica* acumuló 6,249 mg/kg del mismo elemento. Sin embargo, actualmente no hay una regla estandarizada para definir si una planta es o no hiper-acumuladora. Estudios de diversos autores han permitido establecer cuatro reglas básicas que pueden ser utilizadas satisfactoriamente para determinar criterios de hiperacumulación (Nazmul Haque, *et al.*, 2007).

1. Los niveles de concentración de metales pesados encontrados en las hojas de las plantas, para Pb y Cu >1000 mg/kg, Zn >10, 000 mg/kg As >1000mg/kg Ni y Co >1000 mg/kg, Cr >1000 mg/kg y Mo>1500 mg/kg, Cd > 100 mg/kg.

2. Las concentraciones de algunos metales pesados en hojas es 10 a 500 veces más que en plantas normales.



3. La concentración de metales en las hojas es invariablemente más grande que en la raíz.
4. Un coeficiente de enriquecimiento >1 .

2.4.2 Plantas acumuladoras de metales en presas de jales

En estudios realizados por diferentes investigadores alrededor del mundo se reportan especies de plantas que se han adaptado a suelos contaminados con metales y han desarrollado mecanismos para acumular dichos elementos. En particular, se han hecho estudios en suelos cercanos a depósitos de residuos mineros y se ha encontrado que algunas especies son capaces de acumular o fijar en el suelo los metales contenidos en dichos residuos.

Peichun Chang, 2005, estudio doce especies vegetales en los jales de una mina de oro en Corea del Sur, para determinar las concentraciones de As, Cd, Cu, Pb y Zn. La especie *Plantago asiata* reportó las mayores concentraciones de arsénico con una concentración de 28mg/kg.

En jales de una mina en Tailandia (Visoottiviseth, 2002), se estudiaron 36 especies para determinar su capacidad de acumulación de arsénico, solo cuatro fueron consideradas como aptas para la fitorremediación.

En China, se compararon las concentraciones de plomo, zinc y cobre en cuatro especies de la familia Sesbania (*S. cannabina*, *S. grandiflora*, *S. rostrata*, y *S. sesban*) (Gilbert y. S. Chan, 2003). También Li M. S., *et al.*, 2007 estudió 36 especies de 22 familias al sur de China y encontró concentraciones significativas de Fe y Mn, algunas especies como la *Phytolacca acinosa* con más de 3,000 mg/kg de Mn.

En Estados Unidos de America Nazmul Haque, *et al.*, 2007 estudió las plantas *Baccharis sarothroides* Gray y se consideraron como posibles hiperacumuladoras de Cu, Pb, Cr, Zn, As, y Ni. También J. Pichtel 2000,



estudió diferentes especies en presencia de Pb, Cd y Ba; donde encontró que la especie *Taraxacum officinale* tuvo la máxima concentración de Cd.

En España una sola especie, *Betula pendula* fue analizada para conocer su concentración de Pb y Zn. Se encontró una correlación lineal entre la concentración de elementos en el suelo y en la planta (E. Marguí, *et al.*, 2007). También Héctor M. Conesa, *et al.*, 2007, estudio dos especies de plantas endémicas que crecieron sobre los desechos de una mina al sur de España, obteniendo como resultado que la especie *Hyparrhenia hirta* acumuló cerca de 150 mg/kg de Pb en raíz y tallo, mientras que la especie *Zygophyllum fabago* acumuló 750 mg/kg de Zn en la raíz.

En México también ya se han hecho algunos estudios de plantas que crecen en zonas mineras. Carrillo R., *et al.*, 2005, estudió plantas que crecieron sobre jales de Au, Ag y Zn, que contenían metales como Cd, Ni, Pb, Mn, Cu y Zn, en diferentes sitios en el estado de Zacatecas, identificó dos especies interesantes; por un lado la especie *Polygonum aviculare*, que acumuló Zn (9,236 mg/kg) en concentraciones cercanas para ser considerada como hiperacumuladora, por otro lado la especie *Jatropha dioica* también registró una alta concentración de Zn (6,249 mg/kg). En el estado de Chihuahua, Soraya, *et al.* 2006 analizó As y Zn en ocho especies dominantes en diez puntos diferentes alrededor de una presa de jales; las especies con mayores concentraciones fueron: *Acacia farnesiana*, *Juniperus deppeana*, *Baccharis glutinosa*, *Prosopis juliflora* y *Cynodon dactylon*. Rodríguez, *et al.* 2006, realizó un estudio en laboratorio para identificar concentraciones de Pb en seis especies de plantas comunes de la ciudad de Monterrey, que crecían en macetones con sustrato contaminado artificialmente con 0, 500 y 1000 mg/kg, con resultados lejanos a los descritos para considerarlas hiperacumuladoras.



2.5 Uso de plantas en el cierre de presas de jales

El cierre de las presas de jales a nivel mundial tiene como propósito evitar la dispersión de estos residuos y limitar la movilidad de los metales contenidos en ellos (Sengupta M., 1993, Lottermoser B., 2007, Environment Australia, 1997). Para lograr este propósito, se han aplicado diversas alternativas como la saturación del depósito de residuos con agua para evitar su oxidación y dispersión; otra opción ha sido el recubrimiento de los residuos con materiales sintéticos (geomembranas) lo cual representa un costo elevado, y otra opción es el recubrimiento con materiales naturales para evitar la dispersión.

Cuando se utilizan geomembranas o materiales naturales para el recubrimiento, es necesaria la reforestación o inducción de vegetación en la superficie, con el propósito de reestablecer las condiciones naturales del sitio. Esta medida es de gran importancia ya que la adecuada selección de las especies vegetales para recubrir los residuos, puede repercutir en la inmovilización de los contaminantes metálicos contenidos. Para este fin cobra importancia la identificación de especies con capacidad de acumular o fijar en el suelo los metales contenidos en los residuos.

La normatividad mexicana que existe para regular la operación de las presas de jales NOM-141-SEMARNAT-2003, establece diversos criterios para el cierre final de estos depósitos. Entre estos criterios encontramos el recubrimiento con suelo que permita la fijación de especies vegetales, el uso de especies vegetales nativas para la reforestación que no promuevan la acidificación del sustrato y el ajuste de los taludes de la cortina para dar estabilidad estática y dinámica a la misma. Todas estas acciones con la finalidad de que no se emitan partículas sólidas a la atmósfera, no se formen escurrimientos que afecten a cuerpos de agua y que no falle la presa.



3. METODOLOGÍA

3.1 Criterios para la planeación del muestreo

El plan de muestreo se realizó mediante una inspección previa para observar las especies que se desarrollan dentro de las presas y en sus inmediaciones. No todas las especies observadas en la zona se encontraron dentro de las presas, así que solo se tomaron muestras de las especies existentes en cada presa. También se identificaron las especies predominantes y su ubicación dentro de las presas. De éstas se seleccionaron 11 especies que fueron las muestreadas.

Se consideró necesario tomar muestras de plantas nativas de la zona, así como de plantas que han sido inducidas en las presas (no propias de la región). También tomar muestras tanto en los vasos de las presas abandonadas, como en las cortinas. Además se tomaron muestras de sustrato (suelo) donde crecen las plantas y del jal debajo del sustrato, aunque el análisis de éstas no es parte de este trabajo.

Otro criterio importante fue coleccionar muestras de la misma especie en cada una de las tres presas, aunque no en todas las presas se presentaron las mismas especies. Cada especie se tomó por duplicado para su identificación taxonómica y una tercera muestra para analizar la concentración de metales.

3.2 Procedimiento del muestreo

Cuando la especie vegetal se trataba de una planta pequeña, se arrancaba toda junto con la raíz. Cuando la planta era demasiado grande, se procuró tomar muestra de la raíz, tallo, ramas, hojas, flores y frutos, cuando estos existían. En el caso de los arbustos se aserró una pequeña parte del tronco y

se cortaron algunas ramas, también se cortó una pequeña porción de su raíz. Como también se encontraron nopales en el lugar, se muestrearon algunos, procurando tomar aquellos que tenían fruto (tuna) y también se tomaron muestras de su raíz. La Figura 2 expone el procedimiento de muestreo para especies con tallo grueso y la Figura 3 presenta el muestreo de una especie pequeña.



Figura 2. Muestreo del tallo en una especie grande.



Figura 3. Muestreo de una planta pequeña.

Para las muestras de sustrato, se colectaron aproximadamente ochocientos gramos tomados alrededor de la especie vegetal (ver Figura 4). Igualmente se colectaron muestras de jal, que para conseguir, fue necesario excavar en el sustrato hasta encontrar el jal. No en todos los casos fue posible diferenciar el jal del sustrato.



Figura 4. Toma de muestra del sustrato

Las plantas fueron tomadas por duplicado, una para identificación de género y especie, y otra para análisis químico. La figura 5 muestra cómo las plantas destinadas para su identificación taxonómica, fueron colocadas completas entre papel periódico y cartones para no sufrir daños físicos, y prensadas con rejas de madera especiales para este tipo de muestreo; ya que para poder identificarlas era necesario preservarlas intactas.



Figura 5. Muestras empacadas para identificación taxonómica.

Las muestras tomadas para el análisis químico, se colocaron en bolsas de plástico abiertas para que no se honguearan y se les colocó su etiqueta de identificación (Figura 6). En total se obtuvieron 29 especies vegetales. Las muestras de sustrato y jal se colocaron en bolsas de plástico.

**Figura 6. Muestra empacada para determinación de metales.**

Se tomaron las muestras en diferentes puntos del vaso y cortina de cada presa, anotando las coordenadas GPS y tomando una fotografía con la clave de la muestra para su identificación. Los datos del muestreo se registraron en una bitácora de campo. Las Figuras 7, 8 y 9 muestran la ubicación de las muestras en cada presa, en la Figura 10 se observa la forma en que se llevó el control para la identificación de cada muestra.

Como trabajo adicional, se muestrearon y analizaron una muestra de un árbol de aguacate y una muestra de planta de maíz que crecen en un huerto cercano al río Maconí, regado con aguas del mismo, aguas abajo de las presas; con el objeto de conocer si éstas especies acumulan metales.



Figura 7. Ubicación de las muestras en la presa 1.



Figura 8. Ubicación de las muestras en la presa 2.



Figura 9. Ubicación de las muestras en la presa 3.



Figura 10. Tarjeta de identificación de las muestras.

3.3 Identificación taxonómica de las muestras

Las plantas recolectadas para identificación se enviaron al Instituto de Biología, de la UNAM, donde fueron deshidratadas en un horno de convección marca Precision, modelo 18 EM, a una temperatura de entre 50 y 55°C, por espacio de una semana. Se fumigaron para evitar contaminación en el herbario. Finalmente, las plantas se montaron para ser incluidas en el Herbario Nacional del Instituto de Biología, como lo muestra la Figura 11.



Figura 11. Muestras montadas para herbario.

3.4 Análisis químico

3.4.1 Preparación de las muestras

Las muestras para análisis químico se lavaron en repetidas ocasiones con agua de la llave y se enjuagaron con agua destilada hasta tres veces, posteriormente se quitó el exceso de agua con papel absorbente, cuidando de

mantener intacta la planta. Por último se guardaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas y se llevaron a deshidratar al Instituto de Biología, donde se prensaron entre cartones y papel estraza en una prensa de tornillos (Figura 12). Se colocaron dentro de hornos de convección (Figura 13) a 60 °C por cinco días, con excepción de los nopales, que estuvieron por diez días con temperatura aproximada de 80 °C.



Figura 12. Prensa de tornillos.

Figura 13. Horno de convección.

Cuando estuvieron secas las plantas, se separaron en: raíz, tallo, rama, hoja, flor y fruto; si se tenían, ya que no todas las muestras contaban con todos los componentes. La Figura 14 expone una muestra separada en sus diferentes partes.



Figura 14. Muestra dividida en raíz, tallo, rama, hoja y flor.

3.4.2 Molienda

Después de separar las muestras se molieron con ayuda de un molino manual para granos (Figura 15), al cual eliminamos la pintura en su interior para evitar contaminación. Cuando la muestra era poca o muy suave, como algunas hojas y flores, se molieron en un mortero de cerámica. El procedimiento de molienda fue el siguiente: cuando la muestra se trataba de tallo o raíz, se triturbaba manualmente antes de introducirla al molino, para facilitar su molienda. Algunas muestras con textura fibrosa fueron molidas tres o cuatro veces por el molino y cernidas en un tamiz de 30# (Figura 16) para obtener una porción fina representativa por debajo de la malla 30. Entre cada muestra se desarmó y limpió el molino con ayuda de una brocha y de aire comprimido, también se limpiaron los recipientes donde se depositaba la muestra a la salida del molino. Por último, con la ayuda de un imán, se eliminaron las rebabas de metal que desprendió el molino sobre la muestra.



Figura 15. Molino para granos.



Fig. 16. Cernido del producto de molienda.

3.4.3 Digestión

Luego de la molienda las muestras se llevaron al laboratorio de espectrofotometría del Instituto de Ingeniería; para realizar las digestiones en digestor de microondas marca CEM modelo MDS-2000 (Figura17). Se tomó como referencia el método 3051a de la EPA (U.S. Environmental Protection Agency), el procedimiento fue como sigue: se pesaron aproximadamente 0.5g de muestra en una balanza analítica OHAUS Analytical Plus AP210 20g X 0.1mg (Figura 18) y se colocó en el “liner” del carrusel con capacidad para 12 liners, se agregaron 10mL de ácido nítrico (HNO_3) y se prepararon para introducirlos al digestor. El tiempo de residencia se dividió en dos pasos; el primero fue de 5 minutos con 80% de potencia y 90 psi de presión y el segundo paso de 10 minutos con 100% de potencia y 100 psi de presión. Terminando el ciclo se dejó enfriar aproximadamente 5 minutos y después se desconectó el carrusel del vaso colector de gases y destaparon los “liners” en la campana de extracción, dejando salir los gases (óxido nítrico) por aproximadamente 5 minutos antes de filtrar. Se filtró con papel filtro Whatman del número 4 (Figura 19) y se aforó a 50 mL con agua destilada. Por último se

guardó la solución en frascos de plástico con contratapa para leer sus valores posteriormente (Figura 20). Como control analítico, en el carrusel de 12 liners se colocaban 10 muestras, un duplicado y un blanco.



Figura 17 Digestor de microondas.

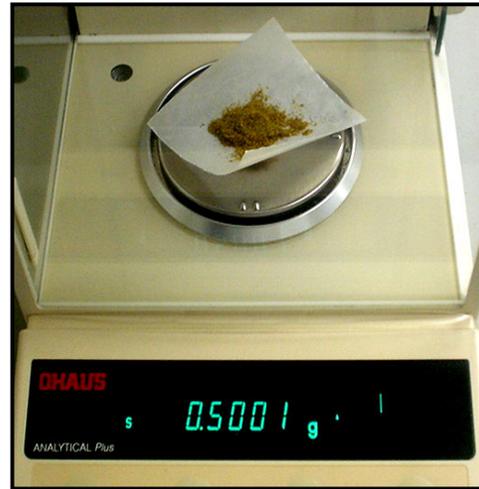


Figura 18. Balanza analítica.



Figura 19. Filtración de las muestras.



Figura 20. Envasado de las muestras.

3.4.4 Determinación de Arsénico por ICP

Lo siguiente fue la lectura de los valores de arsénico (As) en el Espectrofotómetro de Emisión de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP) marca Thermo Jarrell, modelo IRIS/AP Duo. Para calibrar el equipo se prepararon soluciones estándar con concentraciones de 0.05, 0.5, 1.0, 2.0 y 4.0 mg/L con una solución de referencia marca High purity de 100 ppm de As.

Se calibró el equipo y se revisó la correlación en todas las líneas de la curva, una vez revisado se tomaron lecturas de las concentraciones conocidas de 0.05 y 2.0 ppm correspondientes a las soluciones de menor concentración y la mediana.

Luego de calibrar se procedió a tomar las lecturas de las muestras (Figura 21). Se hicieron en lotes de diez y luego se volvían a revisar las soluciones de 0.05 y 2.0 ppm y después de 70 muestras se volvió a elaborar la curva de calibración, con la que se terminaron de realizar las lecturas.

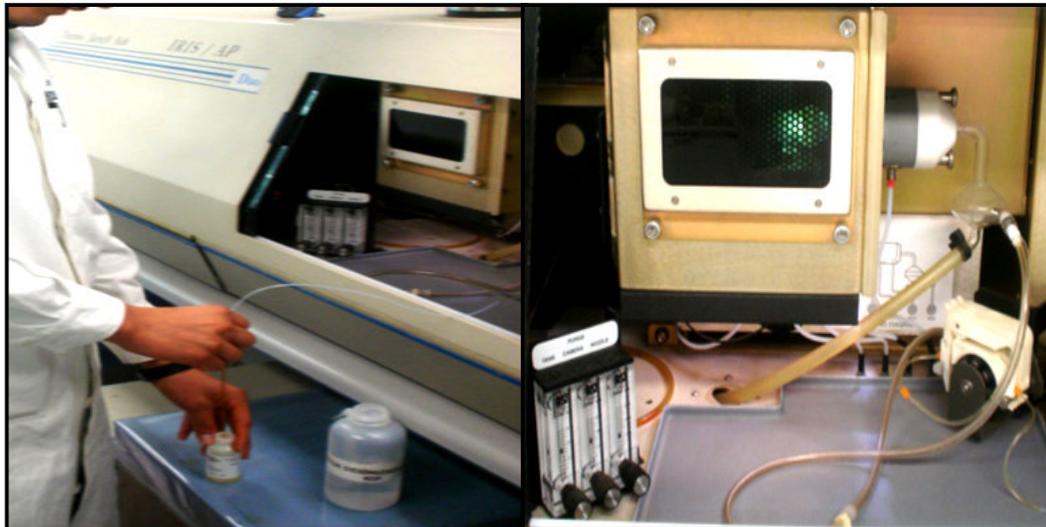


Figura 21. Lectura en el ICP.

3.4.5 Determinación de Cobre, Plomo, Cadmio y Zinc por AA

Se leyeron estos valores en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer Analyst 300 (Figura 22) y se calibró con las siguientes concentraciones:

Cu 1, 3 y 5 mg/L; Cd 1.5, 3 y 4.5 mg/L; Zn 1, 3 y 5 mg/L; Pb 3, 6 y 9 mg/L

Se tomaron las lecturas en lotes de 40 muestras; es decir, se rotaron las lámparas cada 40 muestras para evitar lecturas erróneas. Terminado el primer lote, se dejó enfriar al equipo alrededor de dos horas y luego se recalibró para iniciar con el siguiente lote.

Cada 10 lecturas se revisaban dos de las soluciones estándar para verificar que el equipo seguía calibrado.

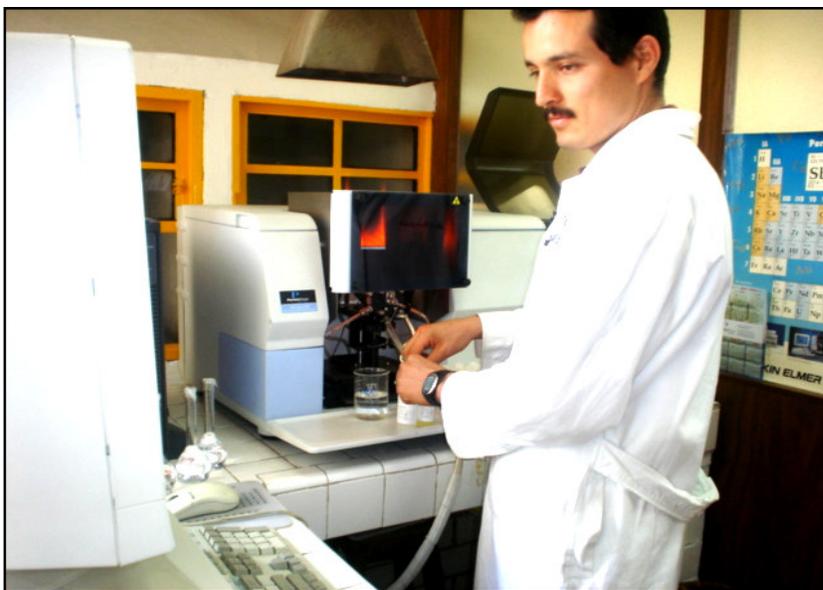


Figura 22. Lectura por Absorción Atómica.



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Especies identificadas

En total se identificaron once especies, de las cuales en nueve fue posible determinar la familia, el género y la especie, y en las dos restantes no fue posible determinar la especie ya que no se pudo coleccionar la flor y el fruto. La Tabla 5 muestra las especies identificadas.

Tabla 5. Especies identificadas en las presas de jales.

Muestras	Familia	Género	Especie	Autor
JS 001C JS 009B	Solanaceae	Nicotina	glauca	Graham
JS 002C JS 012B JS 019A JS 021A	Asteraceae	Flaveria	pubescens	Rydb.
JS 003C JS 013B JS 017 A	Anacardiaceae	Schinus	molle	L.
JS 004C JS 015A	Casuarinaceae	Casuarina	Sp.	
JS 005C JS 016A JS 018A JS 022A	Bignoniaceae	Tecoma	stans	(L.) Kunth
JS 006C JS 011B JS 025A	Leguminosae	Prosopis	Sp.	
JS 007C JS 010B JS 023A	Poaceae	Cenchrus	ciliaris	L.
JS 008C JS 014B	Scrophulariaceae	Maurandia	antirrhiniflora	Humb.& Bonpl. ex Willd
JS 020A	Euphorbiaceae	Ricinus	cummunis	L.



JS 024A JS 026A	Cactaceae	Opuntia	lasiacantha	Pfeiffer
JS 027A	Cactaceae	Opuntia	tomentosa	Salm-Dyck

A : presa 1; B: presa 2; C: presa 3

4.2 Concentración de metales y metaloides en las plantas

La Tabla 6 muestra las concentraciones de los cinco elementos en cada parte de la planta. Las abreviaciones utilizadas son las siguientes:

R: raíz; T: tallo; Rm: rama; H: hoja; F: flor; d: duplicado; Rep: repetición

Tabla 6. Concentración total de metales en las partes de la planta.

Presa	Clave	Concentración en mg/kg					Especie
		As	Cu	Cd	Pb	Zn	
3	JS 001-R	3.64	7.70	6.10	41.38	164.90	Nicotina glauca
	JS 001-Rd	3.54	*	5.66	28.61	163.92	
	JS 001-T	1.88	5.71	3.74	13.19	256.84	
	JS 001-Rm	14.57	4.56	16.86	22.21	375.84	
	JS 001-H	30.99	36.08	37.08	41.65	665.01	
	JS 001-F	9.26	18.82	13.54	41.72	164.31	
2	JS 009-R	8.06	10.48	8.48	58.47	259.43	Nicotina glauca
	JS 009-Rd	8.05	9.16	8.67	54.58	254.98	
	JS 009-T	8.49	0.00	10.28	14.68	224.64	
	JS 009-Rm	42.91	14.39	47.48	44.48	905.64	
	JS 009-H	46.13	51.45	51.05	44.47	622.13	
2	JS 009-F	18.00	41.82	17.65	63.78	332.93	Nicotina glauca



ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3	JS 002-R	3.54	*	4.98	23.51	114.54	Flaveria pubescens
	JS 002-T	3.23	*	6.78	21.63	206.30	
	JS 002-H	12.16	*	11.06	105.64	363.76	
	JS 002-F	3.84	0.64	10.15	26.59	95.04	
2	JS 012-R	1.40	16.39	2.90	61.98	73.17	
	JS 012-Rd	1.66	16.87	3.39	78.34	79.44	
	JS 012-Rm	0.69	2.79	3.29	32.24	43.91	
	JS 012-H	4.31	30.13	6.68	73.82	140.66	
	JS 012-F	1.98	18.56	4.39	57.98	72.06	
	JS 012-F Rep	1.93	18.87	4.59	46.92	80.27	
	JS 012-F Rep	1.73	15.58	4.39	22.56	70.09	
	JS 12-F d Rep	1.79	15.59	4.70	26.58	75.05	
1	JS 019-R	4.54	25.36	3.99	51.52	219.65	
	JS 019 Rd	4.91	28.50	3.99	43.74	223.20	
	JS 019-Rm	2.32	12.97	3.49	67.84	103.75	
	JS 019-H	15.06	88.32	11.58	133.73	579.84	
	JS 019-F	4.29	37.22	5.79	70.35	586.71	
	JS 019-F Rep	4.25	30.61	5.50	45.12	188.08	
	JS 019-F d Rep	4.71	29.04	7.12	47.92	198.95	
1	JS 021-R	4.29	11.08	2.40	42.42	129.77	
	JS 021-Rd	3.20	10.18	2.10	38.32	119.74	
	JS 021-T	2.82	5.20	4.60	36.67	46.66	
	JS 021-H	9.00	30.21	9.80	55.42	164.07	
	JS 021-F	9.92	40.17	9.09	79.94	301.76	
1	JS 021-F Rep	12.34	28.09	11.10	46.78	384.85	Flaveria pubescens



3	JS 003-R	2.26	12.29	5.30	26.98	69.86	Schinus molle
	JS 003-T	0.64	14.39	3.50	0.00	45.17	
	JS 003-Rm	1.87	4.48	4.98	5.88	187.36	
	JS 003-H	11.29	4.79	3.90	7.79	54.04	
	JS 003-F	0.81	2.20	4.10	22.60	35.10	
2	JS 013-T	0.00	1.59	1.49	23.02	13.16	
	JS 013-Rm	0.46	4.30	2.10	25.89	27.29	
	JS 013-H	0.18	3.80	1.80	33.16	27.57	
1	JS 017-Rm	2.95	16.09	5.50	39.08	81.87	
	JS 017-H	0.61	16.50	2.60	51.39	72.79	
3	JS 004-R	0.49	0.00	4.38	18.43	35.87	Casuarina Sp
	JS 004-T	0.21	0.00	2.58	4.60	11.67	
	JS 004-Rm	1.55	0.50	5.99	20.47	40.74	
	JS 004-H	0.57	2.37	2.68	10.45	52.02	
	JS 004-Hd	0.55	4.68	5.78	18.02	98.98	
1	JS 015-R	1.64	6.17	3.38	37.62	106.49	
	JS 015-T	0.10	0.80	2.70	19.97	19.17	
	JS 015-Rm	1.75	8.99	3.90	79.01	74.21	
	JS 015-H	0.87	20.57	2.70	57.32	127.82	
	JS 015-Hd	0.90	20.14	2.69	57.43	125.62	
3	JS 005-R	0.00	25.98	9.65	39.01	394.11	Tecoma stans
	JS 005-T	3.71	16.64	20.42	27.99	552.19	
	JS 005-Rm	2.01	12.76	6.68	5.48	165.50	
	JS 005-H	1.29	9.66	5.97	14.54	164.28	
1	JS 016-R	3.63	9.89	5.20	59.86	138.92	



ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1	JS 016-Rd	3.94	10.49	5.49	54.15	162.84	Tecoma stans	
	JS 016-T	2.88	0.90	4.99	30.96	171.79		
	JS 016-Rm	22.48	14.29	25.37	58.44	564.44		
	JS 016-H	30.13	52.73	32.80	73.27	927.03		
1	JS 018-T	0.36	0.00	2.29	25.61	14.45		
	JS 018-Rm	0.89	10.30	3.10	26.29	47.68		
	JS 018-H	1.17	11.00	3.00	40.49	77.58		
1	JS 022-R	8.47	18.06	2.09	58.26	182.56		
	JS 022-Rm	3.14	19.28	2.21	62.85	119.22		
	JS 022-H	8.06	32.73	2.79	92.60	239.47		
3	JS 006-R	2.56	87.83	3.30	87.23	159.87		Prosopis Sp.
	JS 006-T	1.02	0.80	5.99	7.09	57.80		
	JS 006-Td	1.15	4.09	6.49	15.48	60.20		
	JS 006-Rm	2.96	0.00	4.80	11.50	169.93		
	JS 006-H	3.28	21.84	8.18	53.96	57.75		
2	JS 011-T	0.20	1.89	2.29	32.11	21.84		
	JS 011-Rm	1.01	8.60	3.10	25.99	108.96		
	JS 011-H	1.38	22.38	3.20	36.27	156.87		
1	JS 025-R	0.85	1.20	0.00	26.30	71.10		
	JS 025-T	2.05	8.58	1.00	49.90	115.77		
	JS 025-Rm	3.01	15.89	2.10	34.19	129.95		
	JS 025-H	2.45	20.25	1.40	59.35	159.59		
3	JS 007-R	2.70	0.00	4.38	48.02	143.45	Cenchrus ciliaris	
	JS 007-H	3.45	4.69	4.89	32.46	251.70		
2	JS 010-R	8.13	18.61	9.21	55.24	317.25		



ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

	JS 010-H	3.71	11.40	4.00	47.38	280.89	
2	JS 010-H Rep	2.42	5.40	3.40	4.65	230.95	Cenchrus ciliaris
1	JS 023-R	3.07	5.50	2.10	38.10	148.00	
	JS 023-H	1.14	6.57	1.00	51.49	189.24	
3	JS 008-R	3.37	15.78	4.49	98.58	184.78	Maurandia antirrhiniflora
	JS 008-T	3.32	16.05	5.58	62.19	108.63	
	JS 008-H	5.18	20.68	7.02	28.43	205.56	
2	JS 014-R	2.20	4.47	7.02	108.24	114.30	
	JS 014-Rm	0.74	3.12	3.90	61.43	76.05	
	JS 014-H	2.63	19.91	4.94	47.67	183.14	
1	JS 020-R	0.49	11.19	0.90	21.28	133.89	Ricinus cummunis
	JS 020-T	0.48	2.80	0.70	37.58	38.88	
	JS 020-Rm	0.28	9.16	1.49	19.92	75.48	
	JS 020-H	0.50	9.89	1.50	22.27	72.90	
	JS 024-R	12.54	13.77	11.68	36.13	413.17	Opuntia lasiacantha
	JS 024-H	0.33	0.00	0.30	23.96	67.98	
	A-T	0.00	0.00	0.00	7.39	30.27	Aguacate Lugo
	A-Td	0.00	0.00	1.30	12.98	32.35	
	A-Rm	0.00	0.40	1.50	0.00	38.35	
	A-Rm d	0.00	0.60	1.60	7.09	36.36	
	A-H	0.00	4.99	1.70	15.06	25.64	
	A-Hd	0.00	4.39	1.50	14.17	24.55	
	ML-R	0.03	0.00	1.70	17.19	209.83	Maíz Lugo
	ML-T	0.00	0.00	1.20	11.59	200.84	
	ML-H	0.00	5.99	1.30	21.47	44.23	

* No se realizó.

4.3 Discusión de resultados

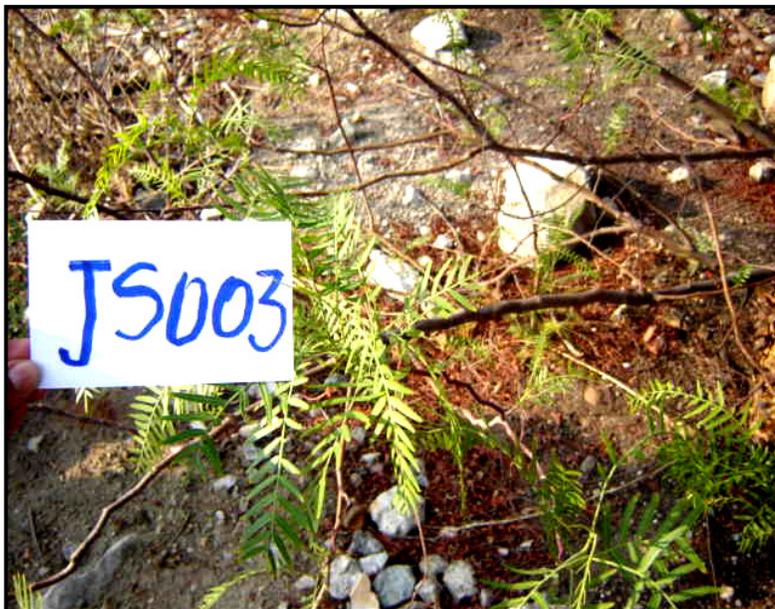
A continuación en las Figuras 23 a 32, se presenta una imagen de cada especie para observar su tamaño y estructura, como referencia para relacionarlas con la concentración de metales y metaloides que logran acumular.



Figura. 23
NicotinaGlauca



**Figura 24. Flaveria
Pubescens.**



**Figura 25.
Schinus Molle.**



Figura 26.
Casuarina Sp.



Figura 27.
Tecomastans.



Figura 28.
Prosopis Sp.



Figura 29.
Cenchrus ciliaris.



Figura 30. *Maurandia antirrhiniflora*.

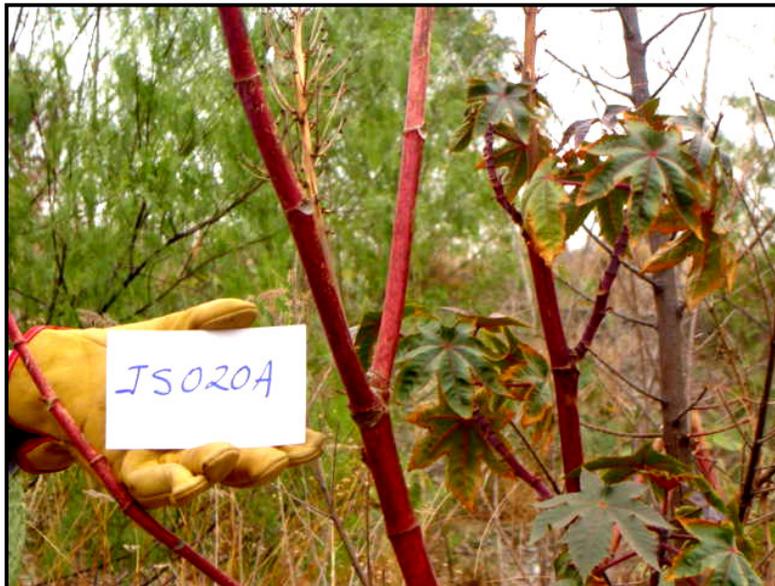


Figura 31. *Ricinus cummunis*.



Figura 32.
Opuntia lasiacantha

La Figura 33 que a continuación se presenta, fue elaborada con el contenido total de metales y metaloides promediados para cada especie obtenidos de los análisis de laboratorio. Se observa el contenido total de los cinco elementos en cada especie en toda su estructura, donde se aprecia que la *Nicotina glauca*, *Flaveria pubescens* y *Tecoma stans* son las especies con mayor contenido de elementos metálicos, sin embargo es claro que el Zn es el más abundante en todas las especies en comparación con los demás elementos pero no es un metal que presente riesgo, ya que no está regulado en las normas NOM-141-SEMARNAT-2003 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

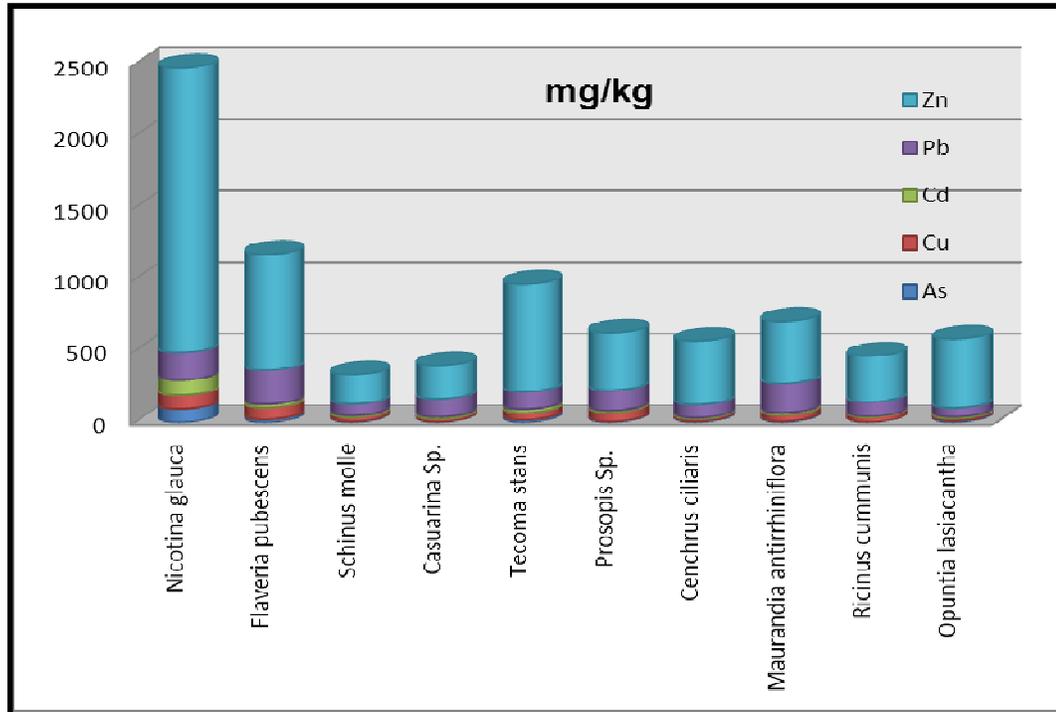


Figura 33. Concentración total acumulada de metales y metaloides.

En la Figura 34 se observa que las especies que concentran mayor cantidad de As son la *Nicotina glauca*, *Tecoma stans*, *Flaveria pubescens*, y *Opuntialasiacantha*. La diferencia de concentración entre las muestras 001 y 009 de la especie *Nicotina glauca* se debe a diferentes factores: concentración total de As en los jales, fracción soluble, generación de acidez de la presa, tamaño y edad de la planta, etc. La planta es alta, algunas muestras observadas en el campo son de más de 2 m, sus ramas son abundantes y delgadas, su follaje más bien escaso, la raíz delgada y no profundiza y su flor pequeña. La mayor concentración en esta especie se localiza en la parte aérea de la planta; es decir, en la estructura expuesta al viento, lo que indica que esta especie favorece el proceso llamado fitoextracción y puede ser podada para forzar su crecimiento y aumentar la extracción de elementos potencialmente tóxicos del suelo que recubre los jales.



La muestra 016 de la especie *Tecoma stans* acumuló As en cantidad semejante a la muestra 001 de *Nicotina glauca*; sin embargo, en las muestras 005, 018 y 022 las concentraciones fueron mucho menores por los mismos factores mencionados anteriormente, pero basta una muestra para establecer que esta especie es tolerante a los metales y metaloides y acumula en cantidades superiores a otras especies como la *Prosopis Sp.*, que en las tres muestras presenta baja concentración de As, o la *Schimus molle* que a pesar de ser una especie grande, su contenido es bajo. En el caso de la *Flaveriapubescens* se nota un comportamiento similar entre las cuatro muestras con concentraciones por encima de 20 mg/kg, excepto en la muestra 012. Esta especie es arbustiva con hojas pequeñas y flores abundantes, la mayor concentración se localizó en las hojas. La especie *Opuntia lasiacantha* resulta interesante, pues aunque se observan bajas concentraciones, esta especie de nopal presenta el proceso llamado fitoestabilización, pues el As es acumulado en la raíz, por lo cual puede ser utilizada con un doble propósito; para concentrar elementos y para brindar estabilidad física a la presa ya que su raíz es muy abundante y muy fuerte.

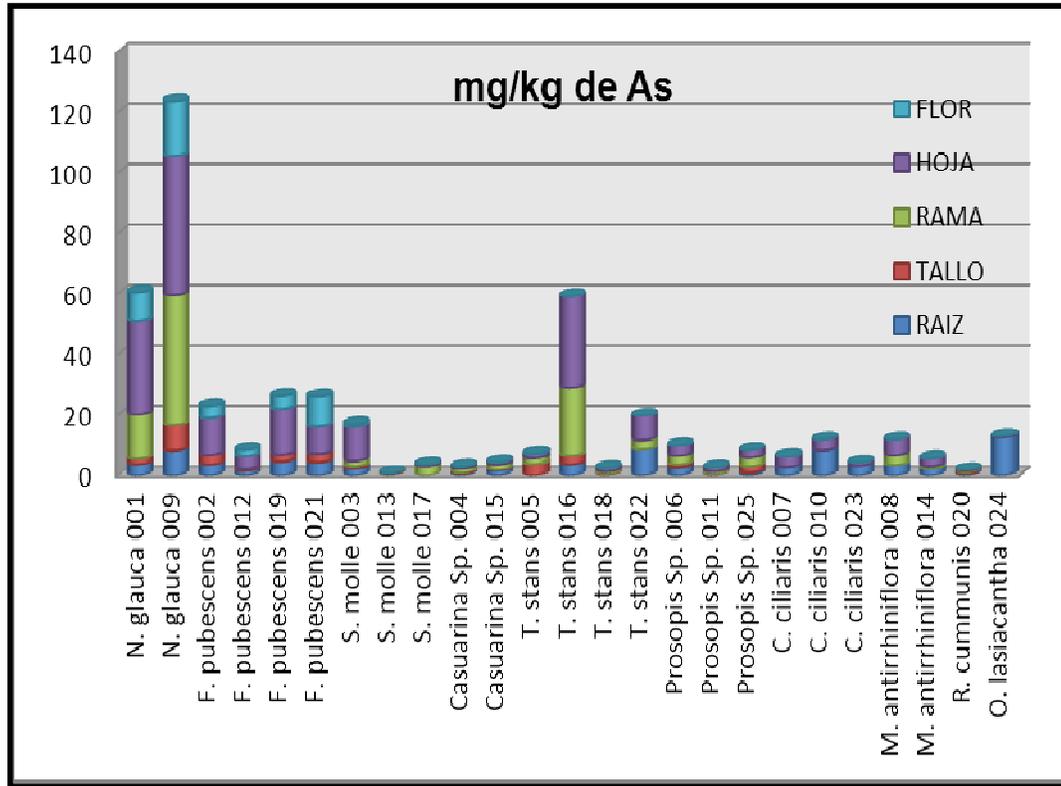


Figura 34. Concentración de arsénico y su distribución en la planta.

En la Figura 35 se aprecia que el Cu es concentrado en mayor grado que el As por la mayoría de las especies, nuevamente la *Nicotina glauca*, *Flaveria pubescens* y *Tecoma stans* son de las especies que muestran mayor concentración de Cu, como sucedió con el As, pero ahora se aprecia que también la *Prosopis Sp.*. En especial la muestra 006 es una buena acumuladora de este metal, comparable con la muestra 009 de *Nicotina glauca*, solo que la concentración se presenta por diferentes mecanismos; la *Nicotina* a través de la fitoextracción y la *Prosopis* por medio de la fitoestabilización. Debido a las características en la estructura de la *ProsopisSp.* puede ser utilizada para evitar la dispersión de los jales por efecto del viento y al mismo tiempo para estabilizar el Cu en el suelo.

La *Nicotina*, *Flaveria*, *Tecoma* y *Maurandia* concentran al Cu en mayor proporción en su estructura aérea, lo cual podría mejorar la extracción del metal en el suelo debido a que se puede podar. Se esperaba que las especies con estructura grande como la *S. molle*, *Casuarina Sp.* y *R. cumunis* presentaran mayor concentración que las especies pequeñas; pero la gráfica

revela que son las de menor contenido, igual que la *C. ciliaris* que es una variedad de pasto de gran follaje y la *O. lasiacantha* que es una variedad de nopal con raíces abundantes y fuertes.

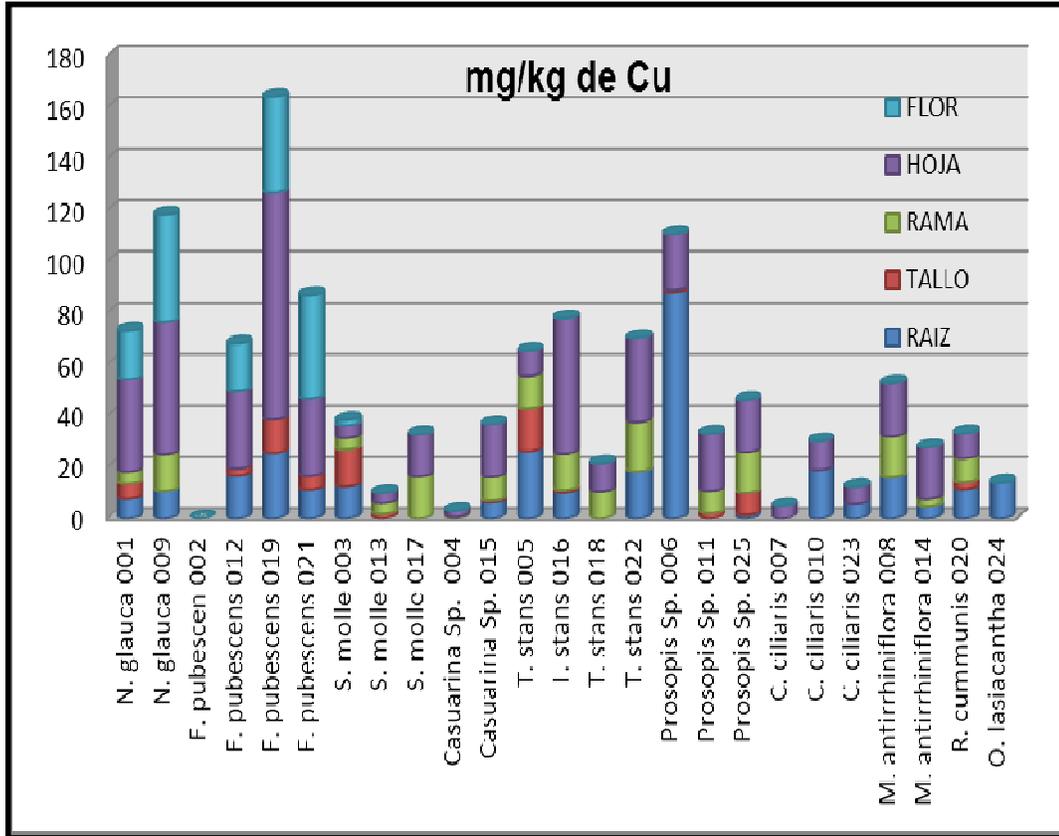


Figura 35. Concentración de cobre y su distribución en la planta.

En la Figura 36 el Cd es claramente acumulado en mayor proporción nuevamente por la *N.glauca* y la *T. stans*, seguidas de la *F. pubescens*, aunque con una clara diferencia respecto a las primeras. Es interesante observar que la *N. glauca* es alta, sus ramas son delgadas y su follaje escaso; las otras dos son especies arbustivas muy abundantes en la zona. Las tres especies presentan fitoextracción con cerca del 90% acumulado en su estructura aérea. Cabe mencionar que el Cd es el elemento de menor concentración en los jales y el resto de las especies, aunque no contienen más de 20 mg/kg pueden también ser útiles para la remediación del suelo. La *O. lasiacantha* aunque logró acumular poco menos de 12 mg/kg lo hizo con

un 100% en la raíz, es la única especie que presentó Fitoestabilización para este elemento.

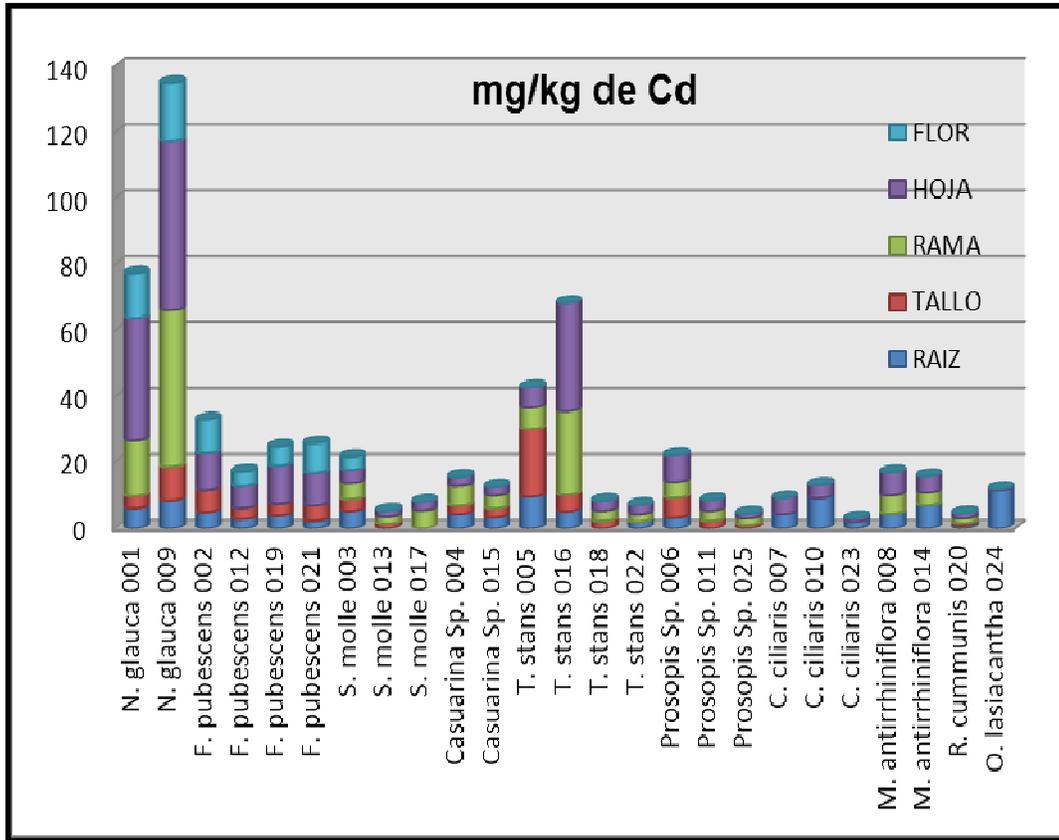


Figura 36. Concentración de cadmio y su distribución en la planta.

Son varias las especies que mostraron acumulación importante de Pb. En la Figura 37 se destaca la muestra 019 de la *F. pubescens* con más de 300 mg/kg, otras especies con contenidos en el rango de los 200 mg/kg fueron: *N. glauca*, *Casuarina Sp.*, *T. stans*, *Prosopis Sp.* y la *M. antirrhiniflora*. Destaca en esta última la concentración de plomo, principalmente porque se trata de una especie pequeña y que se destaca por su tolerancia al plomo a diferencia del resto de los metales. Ninguna especie concentró menos de 50 mg/kg, lo cual quiere decir que todas tienen buena tolerancia a este elemento. La mayoría de las muestras presentaron fitoextracción, solo la muestra 006 de *Prosopis Sp.*, las dos muestras de *M. antirrhiniflora*, la muestra 010 de *C.*

ciliaris y la muestra de *O. lasiacantha* concentraron al Pb en mayor porcentaje en la raíz.

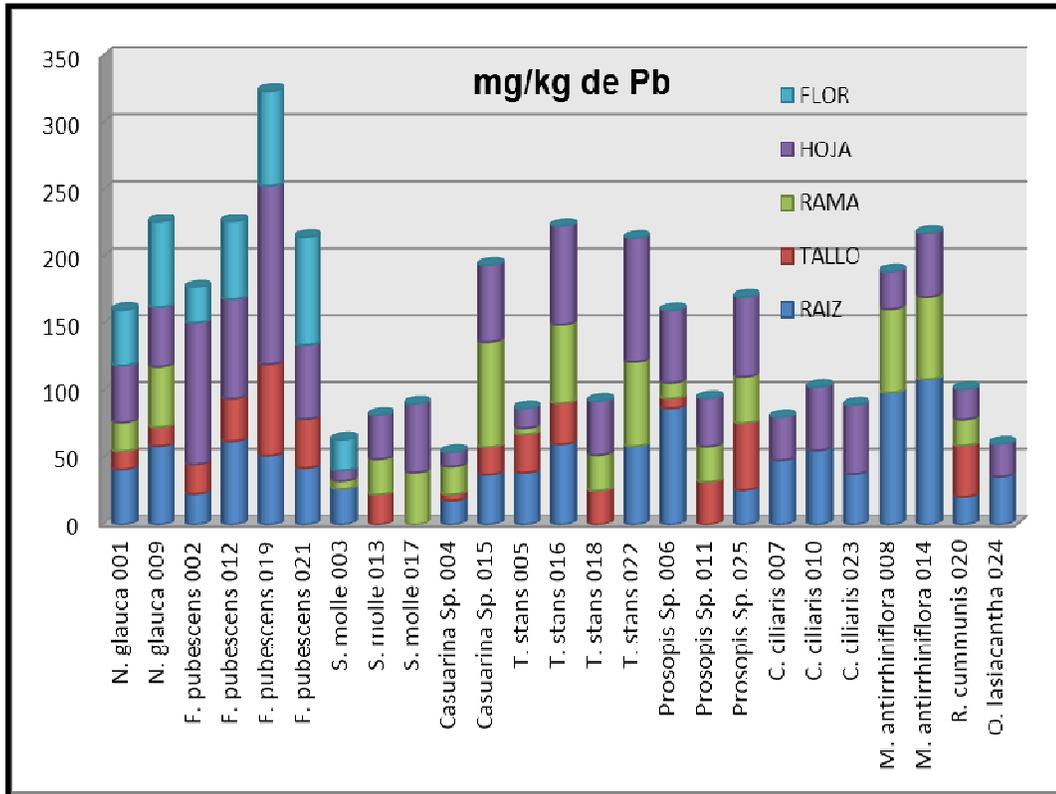


Figura 37. Concentración de plomo y su distribución en la planta.

El Zn es uno de los elementos de menor concentración en los jales, se encuentra por debajo del Pb y As, en la presa número 1 es el que presenta mayor fracción soluble. En la Figura 38 son tres las especies que mostraron mayor concentración de este elemento; la *N. glauca* en primer lugar, seguida de *T. stans* y *F. pubescens*. Estas tres especies son las que encabezan la lista de aquellas que mejor se han adaptado a la presencia de metales y metaloides, pues son de las especies nativas más abundantes en la zona, además son las que concentran en mayor proporción a todos los elementos estudiados en este trabajo. Otras que concentran menor cantidad de Zn en proporción a las primeras son: *Prosopis Sp.*, *C. ciliaris*, *M. antirrhiniflora*, *R.*

cummunis y *O. lasiacantha*, con concentraciones superiores a los 250 mg/kg; esto nos da una idea de la facilidad que tienen las plantas para absorber el Zn, pues las concentraciones más bajas de este elemento son superiores a las concentraciones más altas de los demás elementos. Es evidente que el mecanismo empleado por las plantas para la acumulación del Zn es la fitoextracción, ya que 23 muestras trasladaron los elementos a su estructura aérea, y solo la muestra 010 de *C. ciliaris* y la muestra de *O. lasiacantha* fijan el metal en mayor proporción hacia la raíz.

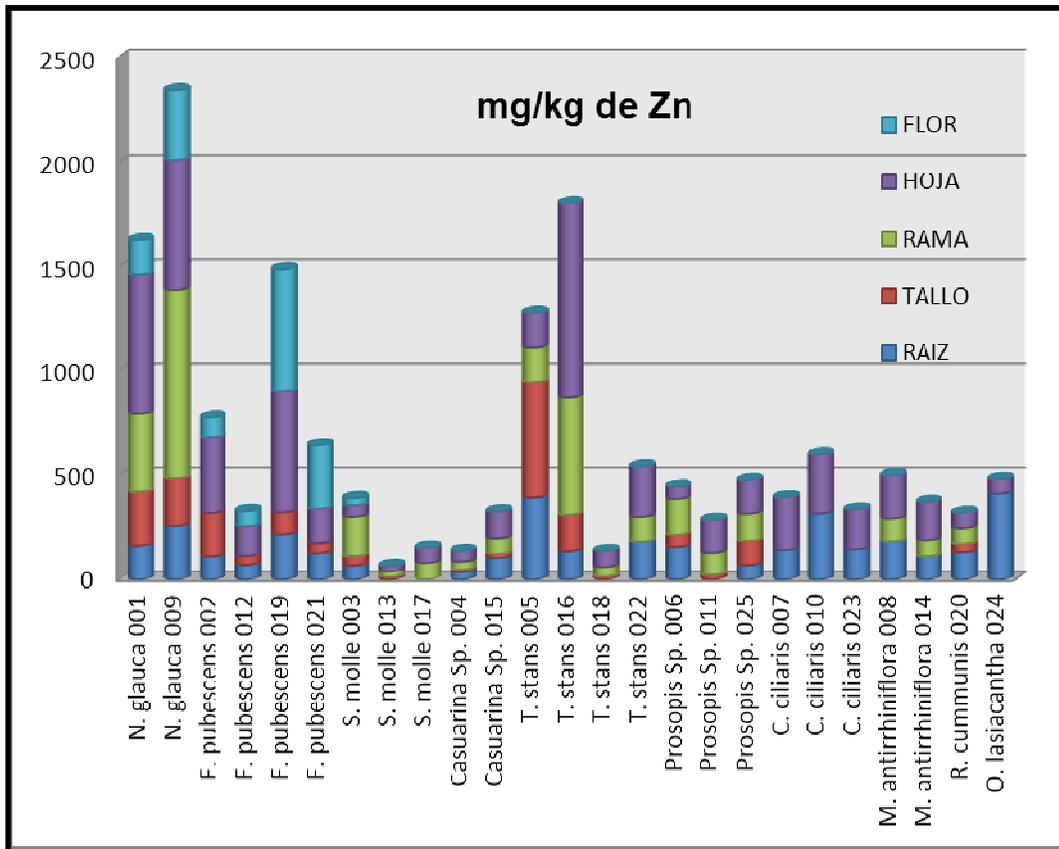


Figura 38. Concentración de zinc y su distribución en la planta.

Las muestras de aguacate y maíz reportadas en la Tabla 6, fueron analizadas con la misma metodología que las demás muestras. En general, las concentraciones en estas fueron bajas; el As no fue acumulado por ninguna muestra, el Cu en algunos casos reportó concentraciones por debajo de



6mg/kg, el Cd por debajo de 2 mg/kg. El Pb en general se encontró en bajas concentraciones; solo la muestra de hoja de maíz alcanzó a rebasar los 20mg/kg. El Zn fue el elemento más concentrado, las muestras de raíz y tallo lo contenían en más de 200mg/kg.



5.- USO DE PLANTAS PARA EL CIERRE DE LAS PRESAS DE LALES.

5.1 Plantas con mayor potencial

De acuerdo con lo observado en las gráficas la *N. glauca*, *F. pubescens* y *T. stans* son las especies que en general acumularon en mayor proporción los elementos analizados. La muestra 009 de *N. glauca* acumuló poco más del 90% del contenido total de As en su parte aérea, más del 90% del Cu, más del 85% del Cd, más del 67% de Pb y cerca del 80% de Zn también fueron acumuladas en la estructura podable de esta especie. Las ramas de esta especie son delgadas, por lo que no representa mayor dificultad realizar la poda.

En el caso de la *F. pubescens* la muestra 002, con la mayor acumulación de As, Cd y Zn concentró más del 70% de As, más del 64% de Cd y cerca del 60% de Zn en la estructura podable. Las muestras de la especie *T. pubescens* presentan un comportamiento similar, concentrando el mayor porcentaje de los elementos acumulados en su estructura podable. Estas dos son especies arbustivas de ramas delgadas y flor abundante y junto con la *N. glauca* son de las especies endémicas más abundantes, no solo en las presas sino en toda la región, su adaptación a los metales y metaloides ha sido evidente, son igual de numerosas e igual de sanas que las que no se encuentran sobre las presas, el tamaño también es muy similar.

Otra especie que destaca en la acumulación de elementos, especialmente el Pb, es la *M. antirrhiniflora* a pesar de ser la más pequeña en términos de masa y volumen. Esta especie trasloca los elementos en mayor proporción hacia la parte aérea, sin embargo en el caso del Pb poco más del 50% lo contiene la raíz.



Otra especie interesante, no tanto por su capacidad de acumulación sino por su estructura, es la *Prosopis Sp.*, que produce espinas, igual que la *O. lasiacantha* y puede ser utilizada para formar barreras que impidan el tránsito de fauna hacia el vaso de la presa. Esta especie acumula principalmente Cu, Pb y Zn en su parte no cosechable, es decir en el tallo y la raíz, aunque el mayor porcentaje en esta última.

Dos especies cuya estructura se compone únicamente de raíz y hojas son la *C. ciliaris* y la *O. lasiacantha*, aunque esta última también produce frutos. Estas plantas presentan características de fitoestabilización y concentran cantidades similares de cada elemento. Ambas especies cuentan con raíces abundantes y muy fuertes que podrían brindar estabilidad física a la presa, además son especies arbustivas que no representarían problemas para crecer en suelos con pendiente, como lo haría un árbol, con suelo tan fino como el de las presas de jales.

Las especies más grandes: *R. cumunis*, *Casuarina Sp.* y *S. molle*, mostraron ser las menos indicadas para rehabilitar un suelo contaminado pues las tres especies fueron las que presentaron menor concentración de elementos, solo *Casuarina Sp.* y la *R. cumunis* concentraron Pb. En proporciones similares a las de la *Prosopis Sp.*, sin embargo consumen más agua que el resto de las especies y solo pueden ser útiles como una barrera para evitar la dispersión de los jales por efecto del viento.

Ninguna especie analizada puede ser considerada como hiperacumuladora según los criterios descritos en este texto, sin embargo son especies endémicas que han logrado adaptarse a la presencia de metales y metaloides, y pueden ser utilizadas para reforestar las presas.

5.2 Propuesta para el uso de las plantas en el cierre

Dado que lo que nos interesa en primera instancia es evitar la migración de los EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos) y brindar estabilidad química, la

primera acción que se propone es reforestar el vaso de la presa con las especies con mayores concentraciones de los elementos como son: *N. glauca*, *F. pubescens* y *T.stans*, para lograr un sustrato libre de EPT.

Otra acción que nos puede ayudar a impedir el desplazamiento de jal a los alrededores, es crear una barrera de plantas contra la erosión eólica. Esta barrera puede formarse con las especies arbustivas que no fueron eficientes en la concentración de elementos como son: *R. cumunis*, *Casuarina Sp.* y *S. molle*, que han desarrollado mecanismos de tolerancia contra estos elementos; la barrera puede ubicarse en la base de la presa, donde se crean las corrientes de aire.

En la Figura 39 se observa tránsito de fauna doméstica en la zona, por lo que es necesario crear una barrera que impida a los animales llegar al vaso de la presa a alimentarse con las especies concentradoras de elementos. La barrera estaría formada por las especies que producen espinas, como son: *Prosopis Sp.* y *O. lasiacantha* alrededor del vaso.



Figura 39. Fauna transitando las presas de jales.

Por último, para brindar también estabilidad física a la presa, se recomienda reforestar la cortina de la presa con las especies que mostraron raíces fuertes y abundantes, como son: *Cenchrus ciliaris* y *Opuntia lasiacantha*, ya que estas especies no tienen dificultad para crecer en laderas tan inclinadas como las de la cortina de la presa; por las características de sus raíces, que crecen horizontalmente y se entierran.

La Figura 40 muestra un esquema con las recomendaciones antes descritas para una mejor comprensión de la reforestación.

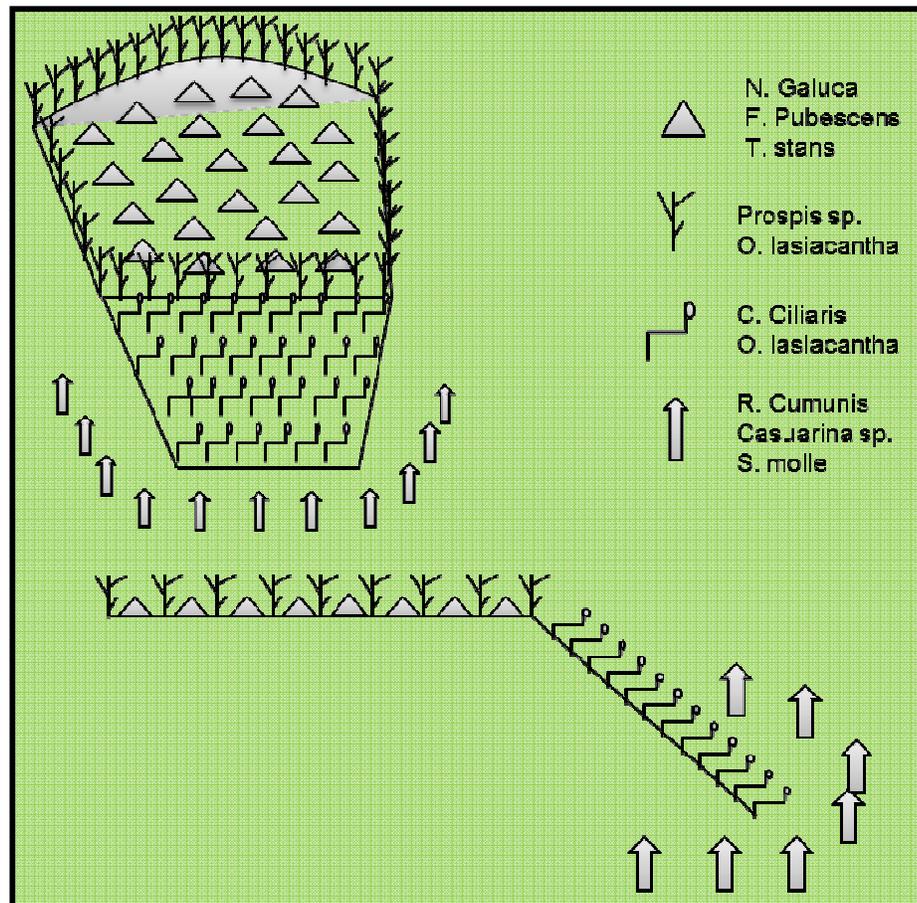


Figura 40. Propuesta de reforestación.



6. CONCLUSIONES

- Se identificaron taxonómicamente once especies de plantas que crecen sobre las presas abandonadas: *Nicotina glauca*, *Flaveria pubescens*, *Schinus molle*, *Casuarina Sp.*, *Tecoma stans*, *Prosopis Sp.*, *Cenchrus ciliaris*, *Maurandia antirrhiniflora*, *Ricinus cummunis*, *Opuntia lasiacantha* y *Opuntia tomentosa*.
- Se identificaron las especies con mayor concentración de elementos tóxicos. Algunas muestras de *N. glauca* alcanzaron concentraciones de hasta 2344.77mg/kg de Zn, 134.94mg/kg de Cd y 123.59 mg/kg de As. Las muestras de *F. pubescens* se leyeron concentraciones de hasta 223.52mg/kg de Cu y 323.44mg/kg de Pb.
- Se logró conocer las concentraciones de As, Cu, Pb, Cd y Zn en cada parte de las muestras colectadas. La *Nicotina glauca*, *Flaveria pubescens*, *Schinus molle*, *Casuarina Sp.*, *Tecoma stans*, *Prosopis Sp.*, *Maurandia antirrhiniflora* y *Ricinus cummunis* concentraron en mayor cantidad los elementos en las partes aéreas, mientras que la *Cenchrus ciliaris* y *Opuntia lasiacantha* lo hicieron en la raíz.
- Contrario a lo esperado, las especies más grandes como *Ricinus cumunis*, *Casuarina Sp.* y *Schimus molle*, fueron las de menor concentración de elementos.
- Las especies *Prosopis Sp.*, *Cenchrus ciliaris* y *Opuntia lasiacantha*, debido a su estructura, pueden ser utilizadas para mejorar la estabilidad de la presa, ya que poseen abundantes y fuertes raíces que crecen horizontalmente sobre el terreno.
- Las especies *Prosopis Sp.*, y *Opuntia lasiacantha* pueden utilizarse para formar una barrera natural contra el tránsito de fauna hacia el vaso de la presa, puesto que producen espinas; además presentan el mecanismo de fitoestabilización.



- Las especies estudiadas mostraron adaptación a los elementos tóxicos, porque físicamente no se observaron daños o alteraciones en su estructura; su apariencia era semejante a las plantas de la zona que crecen fuera de suelos contaminados.
- Las especies grandes como *R. cumunis*, *Casuarina Sp.* y *S. molle* se han adaptado a la presencia de elementos tóxicos, por su gran tamaño; pueden utilizarse para evitar la erosión eólica.
- El mecanismo más utilizado por las especies estudiadas es el de fitoextracción, ocho de las especies lo presentaron: *Nicotina glauca*, *Flaveria pubescens*, *Schinus molle*, *Casuarina Sp.*, *Tecoma stans*, *Prosopis Sp.*, *Maurandia antirrhiniflora* y *Ricinus cummunis*.
- Ninguna especie analizada puede ser considerada como hiperacumuladora según los criterios descritos en la bibliografía consultada.
- Con la información obtenida en este trabajo, se podrá hacer una adecuada planeación para la reforestación de las presas de jales abandonadas y brindarles estabilidad física y química.



BIBLIOGRAFÍA

- Armienta M.A., Talavera O., Morton O., Barrera M. 2003. *Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, Mexico. Bull. Environmental Contamination and Toxicology. (2003) 71:387-393.*
- Carrillo González R., González Chávez C. 2006. *Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. Environmental Pollution, 144 (2006) 84-92.*
- Chaney Rufus L., Li Yin-Ming, Brown Sally L., Homer Faye A., Malik Minnie, Angle Scott J., Baker Alan J.M., Reeves Roger D., Chin Mel. 2000. *Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop comercial phytoextraction systems: approaches and progress. In: Phytoremediation of contaminated soils and water. Norman Ferry, Bañuelos Gary (editors). Lewis Publishers Inc. USA. 389 pp.*
- Chang Peichung, Kim Ju-Yong, Kim Kyoung-Woong. 2005. *Concentrations of arsenic and heavy metals in vegetation at two abandoned mine tailings in South Korea. Environmental Geochemistry and Health (2005) 27:109-119.*
- CONAGUA, 2002. *Comisión Nacional del Agua. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tolimán, Estado de Querétaro. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México, D.F.*
- Conesa Héctor M., Faz Ángel, Arnaldos Raquel. 2007. *Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). Chemosphere 66 (2007) 38-44*
- Environment Australia (EA). 1997. *Managing sulphidic mine wastes and acid drainage. Best Practice Environmental Management in Mining. ISBN 0 642 19449 1.*
- Environment Australia. 1995. *Mailing Containment. Best Practice Environmental Management in Mining. ISBN 0 642 19423 8.*



- Fabio N. Moreno, Chris W.N. Anderson, Robert B. Stewart, Brett H. Robinson. 2005. Mercury volatilisation and phytoextraction from base-metal mine tailings. *Environmental Pollution* 136 (2005) 341-352.
- García Meza J.V., Ramos E., Carrillo Chávez A., Durán de Bazua C. 2004. Mineralogical and chemical characterization of historical mine tailings from the Valenciana mine, Guanajuato, Mexico: Environmental implications. *Bull. Environmental Contamination and Toxicology*. (2004)72:170-177.
- Gilbert Y. S. Chan, Zhi H. Ye, Ming H. Wong. 2003. Comparison of Four *Sesbania* Species to Remediate Pb/Zn and Cu Mine Tailings. DOI: 10.1007/s00267-003-2901-1
- González Chávez M. C., Pérez Moreno J. y Carrillo González R. (editores). 2005. *El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos mineros*. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Estado de México. 161pp.
- González Gallardo Israel. 2009. *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.
- INEGI a (1985). *Carta de efectos climáticos regionales Noviembre – Abril*. 1:250,000, Pachuca F14-11)
- INEGI b (1985). *Carta de efectos climáticos regionales Mayo – Octubre*. 1:250,000, Pachuca F14-11)
- INEGI c (1985). *Carta de uso de suelo y vegetación*, 1:250,000 Pachuca F14-11)
- INEGI d (1985). *Carta de uso potencial ganadero*, 1:250,000 Pachuca F14-11)
- INEGI (2004). *Anuario estadístico Querétaro de Arteaga*. Edición 2004. Aspectos geográficos.



- J. Pichtel, K. Kuroiwa, H.T. Sawyerr. 2000. *Distribution of Pb, Cd and Ba in soils and plants of two contaminated sites. Environmental Pollution* 110 (2000) 171-178
- José Enrique Santos Jallath, Israel González Gallardo, Geovanni Rodríguez Cruz, Ana Alejandrina Castro Rodríguez, Luis Gilberto Torres Bustillos, José de Jesús Huevo Casillas. 2009. *Plantas Nativas para Estabilizar Metales en Jales Generadores de Ácido.*
- Juan Carlos Rodríguez Ortiz, Humberto Rodríguez Fuentes, Gerardo de Lira Reyes. 2006. *Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos contaminados. Revista Fitotecnia mexicana, julio septiembre, año/vol. 29, número 003 Sociedad mexicana de Fitogenética, A. C. Chapingo México pp. 239-245.*
- Li M.S., Luo Y.P., Su Z.Y. 2007. *Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. Environmental Pollution* 147 (2007) 168-175.
- Lottermoser Bernd. 2007. *Mine Wastes. Characterization, treatment and environmental impacts. Second Edition. Springer. U.S.A. 304 pp.*
- Mendoza Amézquita E., Armienta Hernández M.A., Ayora Carlos, Soler Albert, Ramos Ramírez E. 2006. *Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 23, Núm. 1, 2006, 75-83.*
- Minera La Negra, 2008. *Video institucional [Disco Compacto]. Aurcana Corporation y Reyna Mining Engineering. México.*
- MarguíE., Queraltl., Carvalho M.L., HidalgoM. 2007. *Assessment of metal availability to vegetation (Betula pendula) in Pb-Zn ore concentrate residues with different features. Environmental Pollution* 145 (2007) 179-184



- Nazmul Haque, Jose R. Peralta-Videa, Gary L. Jones, Thomas E. Gill, Jorge L. Gardea-Torresdey. 2007. Screening the phytoremediation potential of desert broom (*Baccharis arthroides* Gray) growing on mine tailings in Arizona, USA. *Environmental Pollution* xx (2007) 1-7
- Ongley Lois K., Sherman Leslie, Armienta Aurora, Concilio Amy, Ferguson Salinas Carrie. 2007. Arsenic in the soils of Zimapán, México. *Environmental Pollution* 145 (2007) 793-799.
- Padmavathiamma Prabha K. & Li Loretta Y.. 2007. Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. *Water Air Soil Pollut* (2007) 184:105–126.
- Razo Israel, Carrizales Leticia, Castro Javier, Díaz-Barriga Fernando, Monroy Marcos. 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, air and soil pollution* 152: 129-152 2004.
- Ripley Earle, Redmann Robert, Crowder Adele. 1996. Environmental Effects of Mining. First Edition. St. Lucie Press. USA. 356 pp.
- Romero Francisco M., Armienta M. A., Villaseñor G., and González J.L.. 2006. Mineralogical constraints on mobility of arsenic in tailings from Zimapán, Hidalgo, México. *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 26 (1/2/3): 23 – 40.
- Romero Francisco M., Armienta M.A., González Hernández G. 2007. The solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry*, Vol. 22. 109-127.
- Salt E. David. 1998. Phytoextraction: Present Applications and Future Promise. In: Bioremediation of contaminated soils. Donald L. Wise, Debra J. Trantolo; Edwar J. Cichon, Hilary I. Inyang, Ulrich Stottmeister (editors). Marcel Dekker, Inc. USA. 779-744 pp.



Sengupa Mritunjoy. 1993. *Environmental impacts of mining. Monitoring, restoration and control.* Lewis Publishers. USA. 494 pp.

US EPA. 2000. *Introduction to phytoremediation.* Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-99/107.

US EPA. 2001. *Brownfields Technology Primer: Selecting and Using phytoremediation for Site Cleanup.* Office of Solid Waste and Emergency Response. U.S. Environmental Protection Agency. EPA 542-R-01-006.

Visoottivisetha P., Francesconib K., Sridokchana W. 2002. *The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land.* *Environmental Pollution.* 118(2202). 453-461.