



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MOVILIDAD DE
ARSÉNICO Y METALES PESADOS EN UN SISTEMA
JAL-SUELO Y SU ACUMULACIÓN EN LAS ESPECIES
NICOTIANA GLAUCA Y *OPUNTIA LASIACANTHA*

Tesis

Que para obtener el Título de

Ingeniera de Minas y Metalurgista

Presenta

Soledad Viridiana Guzmán Herrera

Director

M. en I. José Enrique Santos Jallath



México D.F.

Junio 2015

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”.

Agradecimientos

Infinitas gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de retomar mis estudios y a la Facultad de Ingeniería por cambiar mi vida.

Al M.I. José Enrique Santos Jallath por su dirección y asesoría.

A mis sinodales: M.I. Alejandrina Castro, Ing. Guadalupe Ordaz, Ing. Mauricio Mazari, M.S. José Huevo, por sus valiosos comentarios y aportaciones.

A la Ing. Guadalupe Urquiza por su apoyo y consejos en el trabajo de análisis.

Dedicatoria

A mi madre Catalina Herrera por desear y luchar por una vida mejor. Gracias por creer en mí y apoyarme, por enseñarme a ser fuerte y defender lo que creo y pienso, porque sé que hiciste lo mejor y aquí tienes parte del resultado.

A mi hermana Verónica por los maravillosos recuerdos de mi niñez y porque siempre fuiste mi buen ejemplo.

A mis Abuelos Soledad y Jesús por consentirme y por darme una gran familia.

A las mujeres de mi vida porque sé que tengo lo mejor de cada una, porque me han enseñado con su ejemplo a salir adelante Gracias Lupita, Bali, Nieves, Rosa y Lucía.

A David Herrera, por toda esa música que inundo mis oídos desde niña.

A José Santos por ser maestro pero sobre todo por ser amigo.

A Víctor Becerra, gran parte de lo que ahora soy se debe a tu presencia en mi vida.

ÍNDICE

ÍNDICE	5
Lista de Figuras	8
RESUMEN.....	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. ANTECEDENTES	14
2.1. Generalidades de la mina La Negra	14
2.1.1. Localización y acceso al sitio de estudio	14
2.1.2. Medio físico y geográfico	15
2.1.3. Geología del yacimiento	17
2.1.4. Operación de la mina y planta	18
2.2. Estudios realizados con especies vegetales	19
2.2.1. Estudios realizados en especies que crecen en suelos contaminados con metales	19
2.2.2. Estudios realizados en especies que crecen en los depósitos de jales	20
2.3. Estudio realizado en plantas de la mina la Negra.....	22
2.4. Características de las especies en estudio.....	23
2.4.1. Especie <i>Nicotiana glauca</i>	23
2.4.2. Especie <i>Opuntia lasiacantha</i>	25
3. MARCO TEÓRICO	27
3.1. Metales pesados	27
3.2. Comportamiento ambiental de los metales pesados.....	29
3.3. Principios de Fitorremediación.....	31
3.3.1. Fitoextracción	31
3.3.2. Rizofiltración.....	32
3.3.3. Fitovolatización	32
3.3.4. Fitoestabilización	32
3.4. Mecanismos de acumulación y asimilación en plantas	33
3.4.1. Flujo de masa	33

3.4.2.	Difusión	33
3.4.3.	Intercepción con la raíz	34
3.4.4.	Zonas de absorción de la raíz	34
3.5.	Factores que influyen en la disponibilidad y acumulación de los metales pesados.....	36
3.6.	Estudios realizados en invernaderos.....	37
4.	METODOLOGÍA	39
4.1.	Planteamiento del experimento.....	39
4.2.	Preparación del experimento.....	39
4.2.1.	Preparación de macetas.....	39
4.2.2.	Colocación del jal, suelo y planta.....	40
4.2.3.	Conservación de la especie vegetal	41
4.3.	Muestreo	41
4.3.1.	Plan de muestreo	41
4.3.2.	Procedimiento de Muestreo	42
4.4.	Preparación de las muestras.....	44
4.5.	Determinación de la concentración total en plantas, suelo y jal	45
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	48
5.1.	Resultados del Análisis Químico.....	48
5.2.	Acumulación de metales pesados en las plantas	49
5.2.1.	Acumulación en la especie <i>Nicotiana glauca</i>	49
5.2.2.	Acumulación en la especie <i>Opuntia lasiacantha</i>	54
5.3.	Comportamiento de los metales pesados en el sistema suelo-jal de la <i>Nicotiana glauca</i>	57
5.3.1.	Sistema <i>Nicotiana glauca</i> blanco.....	58
5.3.2.	Sistema <i>Nicotiana glauca</i> 1.....	59
5.3.3.	Sistema <i>Nicotiana glauca</i> 2.....	61
5.3.4.	Sistema <i>Nicotiana glauca</i> 3.....	63
5.4.	Comportamiento de los Sistemas de <i>Opuntia lasiacantha</i>	65
5.4.1.	Sistema de <i>Opuntia lasiacantha</i> blanco	65
5.4.2.	Sistema de <i>Opuntia lasiacantha</i> 1	67

5.4.3. Sistema de <i>Opuntia lasiacantha</i> 3	69
5.5. Metales presentes en agua de riego.	71
6. CONCLUSIONES	73
REFERENCIAS.....	74

Lista de Figuras

Figura 1. Localización y acceso a la mina La Negra (INEGI, 2010).	14
Figura 2. Acuífero Tolimán fuente: CONAGUA, 2002.	15
Figura 3. Carta de climas Cadereyta de Montes, Qro. (FIFOMI, 2004).	17
Figura 4. Imágenes Nicotiana glauca.	24
Figura 5. Imágenes de Opuntia lasiacantha	26
Figura 6. Rutas y procesos biogeoquímicos de los metales que se pueden llevar a cabo en el suelo (Sparks, 2005).	30
Figura 7. Factores que influyen en la disponibilidad y acumulación de metales (López, 2009.)	36
Figura 8. Arreglo del sistema jal-suelo y planta para la especie N. glauca.	40
Figura 9. Arreglo del sistema jal-suelo y planta para la especie O. lasiacantha.	41
Figura 10. Datos meteorológicos de 2009 a 2011, CONAGUA 2012.	41
Figura 11. Tabla con intervalo entre de Muestreos.	42
Figura 12. Toma de muestra de N. glauca.	42
Figura 13. Toma de muestra de O. Lasiacantha.	43
Figura 14. Muestras tomadas de O. lasiacantha.	43
Figura 15. Toma de muestras de Lixiviados.	44
Figura 16. Filtrado de Lixiviado.	45
Figura 17. Peso y preparación de la muestra.	46
Figura 18. Preparación de muestra para digestión.	46
Figura 19. Digestor de Microondas MARS.	47
Figura 20. Resultados de Análisis Químico a especies vegetales.	48
Figura 21. As en hoja y tallo en muestras de N. glauca.	49
Figura 22. Cd en hoja y tallo en muestras de N. glauca.	50
Figura 23. Cu en hoja y tallo en muestras de N. glauca.	51
Figura 24. Pb en hoja y tallo en muestras de N. glauca.	52
Figura 25. Zn en hoja y tallo en muestras de N. glauca.	53
Figura 26. As en penca y raíz en muestras de O. lasiacantha.	54
Figura 27. Cd en penca y raíz en muestras de O. lasiacantha.	55
Figura 28. Cu en penca y raíz en muestras de O. lasiacantha.	55
Figura 29. Pb en penca y raíz en muestras de O. lasiacantha.	56
Figura 30. Zn en penca y raíz en muestras de O. lasiacantha.	57
Figura 31. Metales presentes en el suelo de N. glauca blanco.	58
Figura 32. Metales presentes en Lixiviado de N. glauca blanco.	58
Figura 33. Metales presentes en suelo y jal de N. glauca 1.	59
Figura 34. Metales presentes en Lixiviado de N. glauca 1.	60
Figura 35. Metales presentes en Suelo y Jal de N. glauca 2.	61
Figura 36. Metales presentes en Lixiviado de N. glauca 2.	62

Figura 37. Metales presentes en Suelo y Jal de <i>N. glauca</i> 3.	64
Figura 38. Metales presentes en Lixiviado de <i>N. glauca</i> 3.	65
Figura 39. Metales presentes en suelo de <i>O. lasiacantha</i> blanco.	66
Figura 40. Metales presentes en Lixiviado de <i>O. lasiacantha</i> blanco.	67
Figura 41. Metales presentes en Suelo y Jal de <i>O. lasiacantha</i> 1.	68
Figura 42. Metales presentes en Lixiviado de <i>O. lasiacantha</i> 1.	69
Figura 43. Metales presentes en Suelo y Jal de <i>O. lasiacantha</i> 3.	70
Figura 44. Metales presentes en lixiviado de OL3.	71
Figura 45. Metales pesados presentes en el agua de riego.	71
Figura 46. pH en lixiviados y agua de riego.	72

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la acumulación de metales pesados y arsénico en las especies *Nicotiana glauca* y *Opuntia lasiacantha*, mediante la observación de la interacción del sistema jalesuelo; dichas especies vegetales han mostrado un comportamiento resistente a los metales pesados (Rodríguez, 2010), presentes en los depósitos de jales provenientes del beneficio de minerales de mina La Negra.

Para cumplir con el objetivo se recolectaron plántulas de estas especies las cuales después fueron trasplantadas a macetas que contenían jales cubierto de suelo, para reproducir las condiciones de post operación de las presas de jales, las plantas crecieron y se desarrollaron, bajo condiciones ambientales libres, en el Distrito Federal, por 21 meses. Posteriormente, se cuantificó: arsénico, cadmio, cobre plomo y zinc, presentes en las partes aéreas de la *N. glauca* así como en la penca y raíz de *O. lasiacantha*.

En general la especie *Nicotiana glauca* acumulo As y Cd en mayor medida en la hoja mientras que el Cu, Pb y Zn se acumulan en tallo y hoja por lo que se comprueba la hipótesis de que la especie tiende a acumular arsénico y metales pesados en su parte aérea por lo que podría considerarse una especie para extracción

La *Opuntia lasiacantha* no acumuló As ni Cu en ninguno de los sistemas analizados, a los siete meses, presentando acumulación, hasta los veintiún meses, únicamente en la raíz. Por el contrario el Cd, Pb y Zn se acumulan en penca y raíz, desde los primeros meses del experimento; por lo anterior esta especie se considera como estabilizadora solo para algunos elementos y en función del tiempo de contacto.

Es destacable que el Zn se hace presente en las dos especies en concentraciones muy altas probablemente debido a sus funciones como nutriente. El Pb en las dos especies presenta acumulación en un rango de tiempo más amplio que para otros metales.

La principal propuesta que se deriva de esta tesis es que mediante el correcto tratamiento de los depósitos de jales se puede reducir el riesgo ambiental de dispersarse, por efecto del viento.

1. INTRODUCCIÓN

En México, la industria minera juega un importante papel en el aspecto económico; en el año 2010, dicha industria, representó el 4.6% del PIB nacional (SGM). Sin embargo, en el aspecto ambiental, existe un gran problema, ya que el sector minero genera millones de toneladas de residuos, los cuales son una fuente potencial de elementos tóxicos como el plomo, cadmio y arsénico. En la actualidad, las compañías mineras invierten grandes sumas de dinero para evitar o controlar el impacto ambiental que trae consigo la explotación minera, ya que más del 99% del material minado es, al final del proceso de beneficio, considerado como residuo (Lottermoser, 2007).

Hay diferentes formas para disponer dicho residuo, conocido como jal, una de ellas es la utilizarlo para relleno en la mina, además de la alternativa de mayor uso, que consiste en eliminar la mayor cantidad de agua para disponerlo como jal espesado, en pasta o bien seco. La alternativa más usual en México son las presas o depósitos de jales que son sitios construidos en superficie donde se almacena el residuo en forma de pulpa con un 60 a 70 % de agua. Con el tiempo estos depósitos pierden humedad y se quedan en el sitio de manera permanente.

Las partículas del jal son muy finas y por lo tanto sumamente susceptible de ser removida por agentes como el agua y el aire, lo que propicia su dispersión y acumulación tanto en los suelos cercanos al depósito como en cuerpos de agua, representando un riesgo para los organismos vivos (Puga et al. 2006), es por eso que al término de la vida útil de una presa de jales se debe de llevar a cabo un conjunto de medidas para restituir el sitio afectado.

De acuerdo con la normatividad Mexicana, la NOM 141 SEMARNAT, 2003 establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales. Esta norma establece que dichas presas al término de su vida operativa deben de cumplir ciertas medidas que garanticen que es un sitio seguro; las cuales son:

-
- a) Que el depósito no emita partículas sólidas al ambiente; ya que los componentes de la presa, como el vaso o el talud, al ir perdiendo humedad, son susceptibles a la erosión.
 - b) No deben formarse escurrimientos a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.
 - c) La presa no debe fallar, para lo cual se construyen canales de desvío en la periferia que impidan que el agua pluvial se acumule ocasionando inestabilidad.

Además, la norma señala que el sitio puede volver a utilizarse para cualquier otra actividad o simplemente quedar integrado a las condiciones naturales del entorno, siendo esta alternativa la más recurrente. Esto dependerá de las condiciones climáticas, geológicas, hidrológicas, económicas, ambientales y sociales particulares de cada mina.

Uno de los pasos para integrar el sitio afectado al entorno consiste en recubrir el residuo con suelo fértil y reforestar; el recubrimiento estará en función de la peligrosidad del residuo, para un residuo considerado como peligroso se podrá utilizar: geotextil, material arcilloso y materiales neutralizantes como la roca caliza; discernir entre cualquiera de ellos será también cuestión de disponibilidad y costo.

En zonas aledañas a depósitos de residuos mineros, e incluso sobre las presas de jales, crecen de manera natural especies vegetales, generalmente endémicas, que concentran elementos potencialmente tóxicos.

Este hecho ha llamado la atención de diversos investigadores a lo largo de todo el mundo, en Egipto (Rashed,2010), Estados Unidos (Nazmul, 2007), China (Leung, 2006; Li, 2007), Corea (Chang, 2005), España, Perú y México, por mencionar algunos, han hecho estudios con diversas especies vegetales encontrando que algunas de ellas además de adaptarse a las condiciones extremas de suelos con alto contenido de metales pesados y arsénico, acumulándolos en partes aéreas o en la raíz. La cantidad que acumulan y la parte donde la acumulan las hace pertenecientes al grupo de especies aptas para la remediación de sitios contaminados.

Esta capacidad de las plantas para acumular metales ha sido aprovechada para desarrollar métodos de remediación para sitios

contaminados, a los cuales se les llama métodos de fitorremediación (US EPA, 2000).

En mina La Negra, localizada en Maconí Querétaro, Rodríguez (2010) realizó un estudio en el cual se encontró que, de las diversas especies de plantas endémicas que crecen en las presas de jales, algunas tienen la capacidad de acumular metales y metaloides en cantidades variables en su estructura. En este estudio se encontró que la especie *Nicotiana glauca* fue la que presentó el mayor contenido de elementos metálicos acumulados en las partes aéreas; mientras que en la especie *Opuntia lasiacantha* presenta la mayor concentración de elementos metálicos en la raíz.

El uso de estas especies vegetales para la reforestación brindará diversos beneficios a la presa de jales ya que la *N. glauca* se podrá usar para fitoextracción ya que por sus características, la especie no es ingerida por animales. Utilizar la *O. lasiacantha* permitirá dar estabilidad al suelo, por la gran extensión de sus raíces y para estabilizar los elementos tóxicos en la raíz, logrando con ello una menor movilidad de los constituyentes tóxicos del jal.

El objetivo de este estudio fue evaluar el proceso de acumulación de los elementos metálicos, en las dos especies ya mencionadas, mediante la observación de la transferencia de arsénico y metales pesados en el sistema jal-suelo y su interacción con la planta, así como la distribución de los mismos en los distintos tejidos de ésta.

El trabajo experimental se realizó en macetas en las que se depositó una capa de jal cubierta por una capa de suelo y plantando un retoño de cada especie para así reproducir las características del recubrimiento de las presas de jales en etapa de post operación. Es importante destacar que se utilizaron distintos tipos de jales con diferentes características.

2. ANTECEDENTES

2.1. GENERALIDADES DE LA MINA LA NEGRA

2.1.1. Localización y acceso al sitio de estudio

Aurcana Corporation es propietaria desde el año 2006, de la unidad minera La Negra, localizada en la porción nororiental del estado de Querétaro, en la comunidad de Maconí, municipio de Cadereyta de Montes, (Figura 1), cuyas coordenadas UTM son: Latitud: 2303793N Longitud 445740E Elevación 1940 msnm.

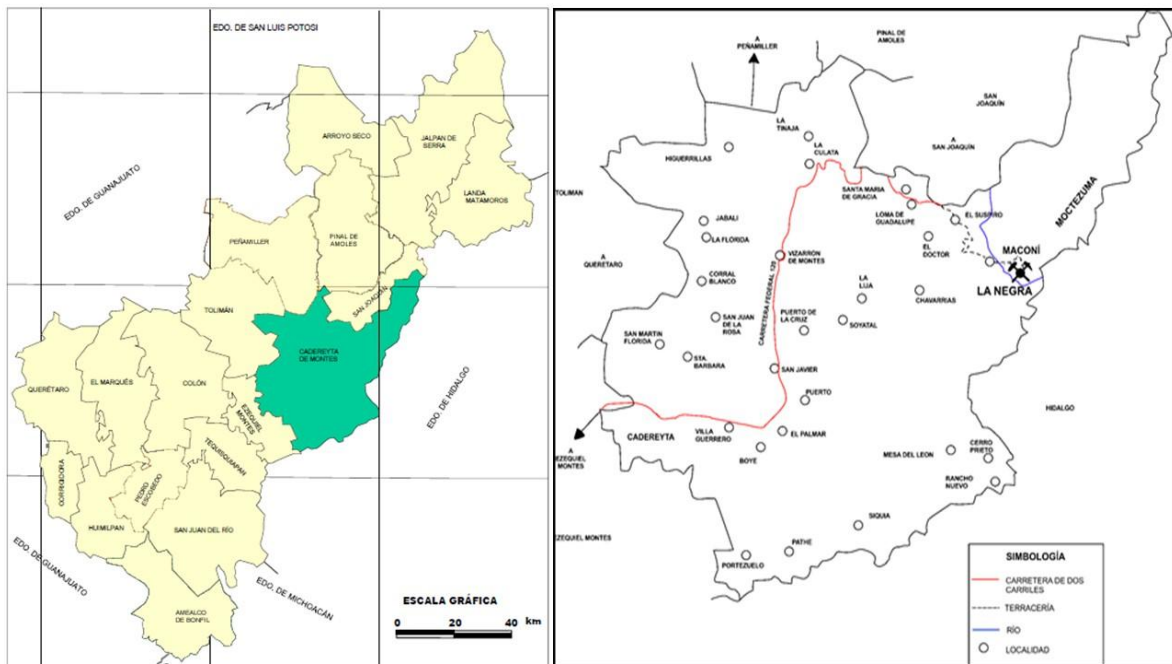


Figura 1. Localización y acceso a la mina La Negra (INEGI, 2010).

La mina La Negra se localiza al S 56° E y 34.2 km en línea recta de la Ciudad de Cadereyta de Montes; su acceso es por la carretera federal 120, San Juan del Río Xilitla, hasta el km 79, donde se continúa por la carretera estatal a San Joaquín. Después de llegar al puente de Agua Fría se toma el rumbo a Maconí, por camino asfaltado durante 8 km y camino de terracería; 6 km, después de Maconí, se ubica la entrada principal de la mina (Figura 1).

2.1.2. Medio físico y geográfico

Fisiografía

El distrito minero de Maconí está localizado en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y la subprovincia Carso Huasteco que cubre el 38.29 % del territorio municipal (FIFOMI, 2004), en el borde occidente llamado provincia de sierras altas. Esta subprovincia está compuesta de rocas sedimentarias marinas caracterizándose por sierras alargadas con orientación noroeste-sureste, fuertemente plegadas y fracturadas, que originan imponentes elevaciones y escarpes dando como resultado una topografía ampliamente accidentada, constituidos por roca caliza parcialmente metamorfoseada, correspondiente a la formación conocida como el Doctor.

Hidrografía

La región noreste del municipio, zona donde se ubica la unidad minera La Negra, está dominada por la subcuenca hidrológica del río Moctezuma la cual es una de las tres subcuencas de la región hidrológica del Panuco, cubriendo el 29.39% del territorio Municipal. La entidad registra escasa precipitación debido a la barrera orográfica que forma la Sierra Gorda, que la divide en dos vertientes; la del Golfo de México y la del Océano Pacífico.

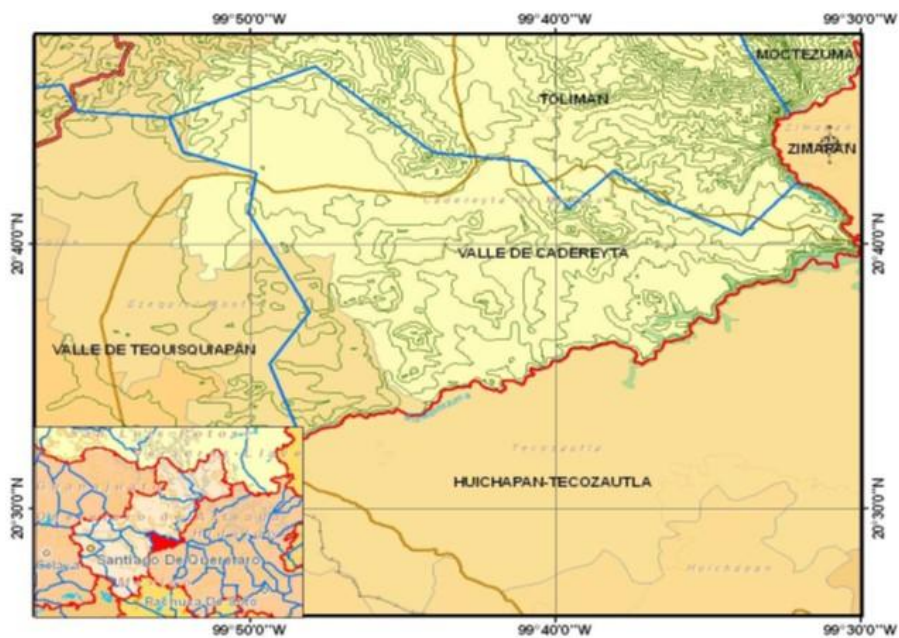


Figura 2. Acuífero Tolimán fuente: CONAGUA, 2002.

El agua subterránea, de acuerdo a la región hidrológica Cuenca del Río Pánuco y a la ubicación de mina La Negra, está en el acuífero Tolimán que tiene una extensión de 89 km² (Figura 2) ; se ubica en la porción central del estado y comprende los municipios de Tolimán, Cadereyta, San Joaquín, Pinal de Amoles, Peñamiller y Colón (CNA, 2002). El río Tolimán nace en la porción suroeste del valle, adopta un rumbo hacia el noreste, es afluente del río Extórax y Moctezuma.

Actualmente no se tienen vedas para el aprovechamiento de agua del subsuelo dentro de este valle, por lo que está considerado zona de libre alumbramiento.

Clima y precipitación

El clima dentro del municipio es muy variado debido a las diferentes elevaciones topográficas existentes. De acuerdo con la carta climática del INEGI (Figura 3) el clima en Maconí es semicálido subhúmedo y semiseco, climas que predominan en el lado oeste del río Moctezuma desde la mina La Negra hasta Mesa de León y cerro Pardo.

Clima Semicálido, templado subhúmedo

Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; con precipitación anual entre 500 y 2,500 mm y precipitación del mes más seco de 0 a 60 mm; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.

Clima Semiárido, templado

La temperatura media anual esta entre 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío esta entre -3°C y 18° C, y la temperatura del mes más caliente es menor de 22°C; las lluvias de verano del 5% al 10.2% anual. El promedio anual de la temperatura para la zona es de 16° C a 18 ° C. La temperatura media anual varía entre 18° a 20° (CONAGUA, 2002).

Se cuenta con dos estaciones para medir la precipitación total anual, una de ellas se encuentra en el poblado del Doctor, ubicada en la parte más alta de la barrera orográfica y la otra en la porción de llanuras en la población de Vizarrón de Montes. La precipitación media anual reportada

para las partes más altas es de 806.6 mm y de 457.4 mm para las llanuras, con una precipitación media anual de 407 mm.

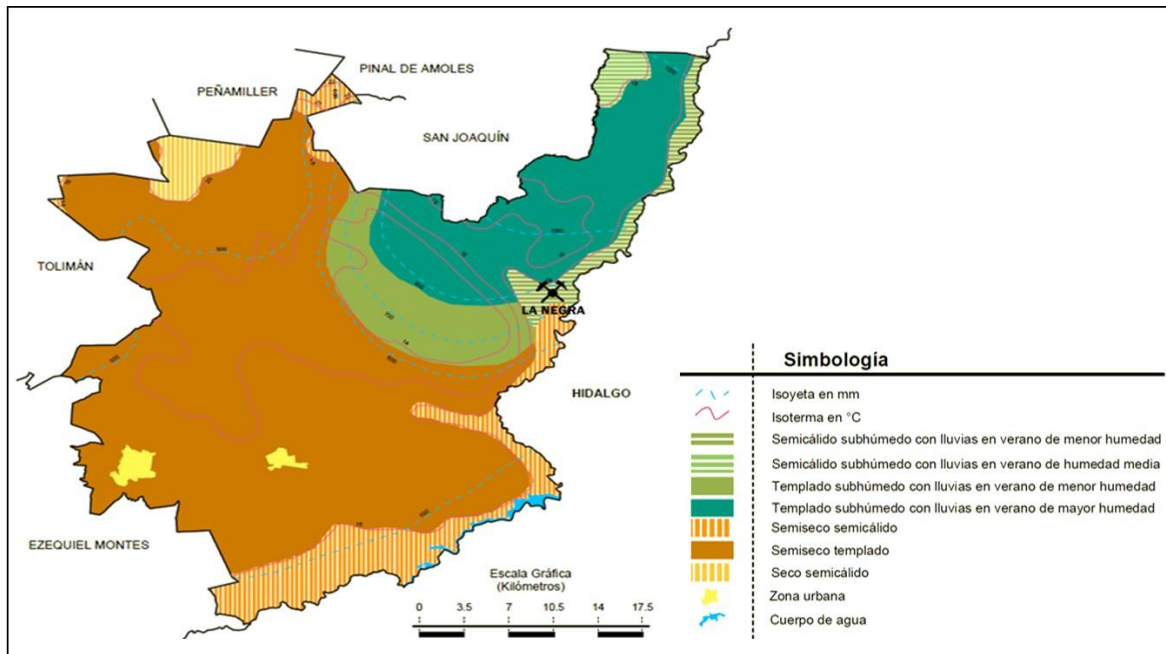


Figura 3. Carta de climas Cadereyta de Montes, Qro. (FIFOMI, 2004).

Flora y Fauna

La vegetación varía con la elevación; la flora característica de la región incluye matorrales, órganos, ocotillo cardenches, lechuguilla, maguey y nopal en las depresiones y coníferas como pino, enebro, encino y cedro hacia las partes altas, que corresponde a la Sierra Gorda.

La fauna silvestre incluye pequeñas variedades de mamíferos, tales como: roedores, tuzas, ratones de campo, comadrejas, ardillas, conejos, liebres, zorrillos, zorras, tlacuaches, tejones y murciélagos. Se pueden encontrar reptiles y lagartos como: culebras, víboras (chirriónera, cascabel y coralillo), lagartijas, escorpiones y ajolotes.

2.1.3. Geología del yacimiento

La mina está enclavada en la parte centro meridional de la Sierra Gorda queretana es parte de la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental compuesta por numerosas formaciones marinas mesozoicas deformadas y

plegadas. Estructuralmente se caracteriza por pliegues anticlinales y sinclinales NW-SE con fallamiento normal preferentemente E-W.

Los tipos de mineralización que prevalecen en la región son los depósitos hidrotermales y los de tipo skarn, con depósitos de Zn-Cu-Pb y Ag, con forma de chimeneas y de las cuales se desprenden algunos mantos.

La mineralización consiste en sulfuros masivos contenidos y restringidos al skarn de granate y calcita. La mineralogía de los sulfuros en secuencia paragenética: pirita, pirrotita, arsenopirita, marmatita, calcopirita y galena. La plata está contenida en la galena en forma de hessita y en algunos casos asociada a la calcopirita. Algunas zonas ricas en plata contienen abundante arsenopirita. En forma general la mineralización tiene como roca encajonante al bajo a un Intrusivo diorítico y al alto el skarn de granate próximo a la caliza.

2.1.4. Operación de la mina y planta

El sistema de explotación es tumba por subniveles con barrenación larga, el mineral tumbado cae directamente en los conos de captación localizados en el nivel principal, donde se efectúa el acarreo del mineral con camiones hasta el almacén en superficie o directo a la planta de beneficio donde el mineral es recibido a un tamaño de 21", para pasar al proceso de trituración, con la finalidad de reducir su tamaño hasta un 80%. La finalidad de este proceso es entregar el mineral con un tamaño de partícula uniforme para la molienda y posteriormente a la flotación.

Los minerales de Cu y Pb son seleccionados para flotarse en una primera etapa de flotación bulk y los minerales de Zn son deprimidos, para posteriormente ser activados y flotados en un circuito por separado. Después de varias etapas de limpieza se obtiene un concentrado de Cu-Pb y un concentrado de Zn.

La última parte del proceso de beneficio es el bombeo de colas finales. La pulpa con las colas finales de la flotación es enviada por gravedad hasta un cárcamo y de ahí es bombeada a través de tubería a una distancia aproximada de 5 Km, hasta el bordo de la presa de almacenamiento de jales No. 5. El asentamiento natural del material fino permite recuperar el 90% del agua clarificada, la que se recupera por medio de un sistema de drenaje para reincorporarse al proceso.

2.2. ESTUDIOS REALIZADOS CON ESPECIES VEGETALES

La necesidad de encontrar nuevos métodos de remediación, económicos y amigables con el entorno, ha llevado a dirigir la atención de diversos investigadores a la capacidad de las plantas para acumular metales; dichos estudios, a lo largo de todo el mundo, confirman el hecho de que además de acumular metales, algunas especies se adaptan a condiciones en que las concentraciones de metales y metaloides están presentes.

2.2.1. Estudios realizados en especies que crecen en suelos contaminados con metales

Generalmente los depósitos de jales tienen problemas de dispersión por acción del viento y el agua. Se han analizado suelos aledaños a los depósitos de jales encontrándolos contaminados con metales pesados, provenientes de estos depósitos; en dichos suelos, e incluso en las presas de jales, se observa crecimiento de especies vegetales endémicas e inducidas, esta vegetación ha sido estudiada para evaluar la acumulación de metales pesados; algunos de esos estudios se presentan en este apartado.

Carrillo *et al.* (2006) investigó las plantas que crecen en suelos contaminados alrededor de cuatro depósitos de residuos: El Bote, San Martín, Fresnillo y Noria de Ángeles, en el estado de Zacatecas, México. Encontró 70 especies de 18 familias creciendo en estos sitios; algunas de estas especies endémicas se consideran potencialmente tolerantes a los metales como la *Polygonum aviculare* que acumuló 9236 mg/Kg de Zn, concentración muy cercana a los criterios para considerarla como especie hiperacumuladora. Determinó que varios elementos fueron absorbidos por las mismas especies vegetales, colectadas en sitios diferentes. También observó especies inducidas, como *eucalyptus sp.*, *casuarina cunninghamiana* y *Schinus molle*, que aunque tenían la habilidad de crecer en suelo contaminado presentaban indicios de clorosis, necrosis, y hojas secas, por lo que no se hicieron análisis de los metales que contenían ya que para estas especies la esperanza de vida es solo de algunos años expuestos a los residuos. Así que cita los factores que para su investigación son los que definen la acumulación de metales en las plantas, estos son: la

especiación y concentración del metal así como el pH del suelo, el tipo de planta y su edad.

Li *et al.* (2007) examinó la concentración de metales pesados en el suelo y plantas dominantes en la zona minera restaurada de Guangx, China. Siete especies de plantas, fueron las más abundantes en la zona restaurada. Sin embargo fueron 36 especies de 22 familias las que colonizaron la zona así mismo en la zona fueron sembradas las especies Chinese chesnut (*C. henryi*), *Osmanthus* (*O. fordii*) y Mao bamboo (*Phyllostachys pubescens*) para generar recursos económicos. El suelo donde crecían estas especies era ácido y con altas concentraciones de Pb, Cd, Cu y Mn otras especies de las cuales 12 son las que presentan las más altas concentraciones de metales; aquí dos ejemplos: la *Imperata cylindrica* var. *Major* con 5.9 mg/kg de Cu, 0.28 mg/kg de Cd, 3.4 mg/kg de Pb, 1064.0 mg/kg de Fe y 260.0 mg/kg de Mn, todos acumulándose en sus brotes; la *Parthenocissus heterophylla* acumuló en la raíz las siguientes cantidades: 22.5 mg/kg de Cu, 0.62 mg/kg de Cd, 10.6 mg/kg de Pb, 3635.0 mg/kg de Fe y 816.5 mg/kg de Mn. El autor destaca en sus conclusiones la importancia de la correcta post operación y monitoreo de los depósitos de jales, debido a la posible siembra de especies comestibles como ocurrió en Guangx.

Rashed (2010) analizó 10 especies de plantas que crecían cerca de la Mina Wadi El-Allaqi al sur de Egipto, en el desierto del este. Reportó en mayor abundancia especies como la *Aerva Javanica* conocida comúnmente como algodón del desierto y *Acia Raddiena* que concentra y acumula los siguientes metales Ag, As, Au, Cd, Mo, Zn y Pb en niveles más altos que *A. javanica*, mientras que esta acumula Co, Cu, Cr, Hg, Mn y Ni en niveles más altos que la *A. Raddiena*. Esto indica que algunas especies son selectivas para acumular algunos metales y que la concentración de estos depende de dicha selectividad y la abundancia de metales en el suelo. Además de que estas plantas pueden ser utilizadas como biomarcadores de suelos contaminados.

2.2.2. Estudios realizados en especies que crecen en los depósitos de jales

La fitoremediación es considerada una técnica en pro del medio ambiente. La aplicación de esta técnica ha generado cierta preocupación en relación con la invasión y alteración de los ecosistemas ya que la introducción de plantas ajenas al medio podría alterar la función

del ecosistema (Carrillo y Gonzales 2006) por lo que encontrar especies endémicas que acumulen metales es una buena opción para no alterar el entorno.

El crecimiento de especies vegetales en depósitos de residuos ha sido observado desde hace mucho tiempo, por lo que se han dirigido diversas investigaciones para conocer la capacidad de estas especies para acumular metales y algunas de ellas ser consideradas en la remediación de presas de jales, algunos estudios se describen brevemente a continuación:

Chang *et al.* (2005) estudio plantas que crecieron en dos depósitos de residuos, con diferentes características, Duckum cuyas operaciones terminaron en 1994 y Myoungbong cerrada desde 1970; ambas en Corea del Sur. 32 especies fueron muestreadas para analizar la capacidad de acumular arsénico y metales pesados y usarlas para fitoextracción, al muestrear las especies no se encontró deterioro en su crecimiento, al ser analizadas los resultados mostraron alta acumulación de metales como: *Plantago asiata* con 28mg/Kg de As, *Osmunda asiática* 20.2 mg/Kg de Cu, *Pteridium aquilinum* con 87.1 mg/Kg de Pb y *Populus davidiana* con 499 mg/Kg de Zn. Concluyendo que entre más joven es la especie vegetal menos es la concentración de metales, ninguna especie se consideró como hiperacumuladora y atribuye los contenidos de arsénico a la capacidad de las plantas a tolerar este metal.

Visoottiviseth *et al.* (2002) reportó haber encontrado plantas acumuladoras de As en jales en dos diferentes zonas: distrito de Phibun, donde recolectó 36 especies y el distrito de Bannang Sata, donde 18 especies fueron colectadas, ambos distritos en Tailandia. Los resultados mostraron que en el primer distrito se encontraron siete especies con altas concentraciones de As y en el segundo distrito fueron cuatro. Llegando a la conclusión de que cuatro especies eran las más adecuadas para la remediación debido a que acumulaban el As en la hoja; estas fueron: *Pityrogramma calomelanos* cuya concentración fue de 8350 mg/g; *Pteris vittata* con una concentración de 6030 mg/g considerándolas como dos especies hiperacumuladoras de As en comparación con las especies *Melastoma malabathricum* concentrando 43mg/g y *Mimosa pudica* con 77 mg/g de As, cuya concentración se consideró como razonable.

Haque *et al.* (2007) analizó la posibilidad de ocupar la especie *Baccharis sarothroides*, una especie de arbusto, que crecía en abundancia en un depósito de jales al norte de Claypool Arizona en el distrito minero de Globe-Miami; para ello muestreó varias plantas de la misma especie en cinco diferentes zonas y encontró que las cantidades de metales y metaloides no afectaban su crecimiento ya que la planta acumulo Pb, Ni, Co y As en la raíz además de que las concentraciones de estos eran más alta que las demás con lo que demostró que esta especie tiene una gran habilidad para tolerar los metales pesados por lo que puede ser considerada como una especie hiperacumuladora.

Leung *et al.* 2006, analizó la habilidad que tenían algunas plantas para absorber, acumular y tolerar metales como Pb, Zn, Cu, Cd y As; estas plantas crecían en jales mineros en cinco diferentes sitios en la ciudad de Chenzhou al sur de China, para ello muestreo 48 especies pertenecientes a 26 familias, determinó las concentraciones de los mencionados metales en las partes aéreas y raíz de la planta, encontrando que cuatro eran las especies que tenían altas concentraciones de metales; estas fueron *Chrysanthemum moritolum* y *Miscanthus florodulus* cuyas concentraciones internas reflejaban las concentraciones del residuo, *Cytodon dactylon* en el que las concentraciones de metales en los brotes se mantienen un nivel bajo aun cuando la concentración del residuo cambie y *Pteris vittata*, especie que concentra los metales en las partes aéreas de la planta aun cuando las concentraciones externas sean bajas.

Puga *et al.* (2006) analizó la concentración total de arsénico y zinc en especies de plantas que crecen a diferentes distancias de la presa de jales, cuyo resultado fue que las concentraciones de As y Zn disminuyen a medida que las especies muestreadas se alejaban de la presa de jales. Las especies con las concentraciones más altas fueron: huizache (*Acacia farnesiana*), táscate (*Juniperus deppeana*), jarrilla (*Baccharis glutinosa*), mesquite (*Prosopis juliflora*) y el zacate pata de gallo (*Cynodon dactylon*). No se encontraron daños en las especies.

2.3. ESTUDIO REALIZADO EN PLANTAS DE LA MINA LA NEGRA

El presente estudio se realiza con base en el análisis previo hecho por Rodríguez (2010) en el que se estudiaron las plantas nativas que crecen de manera natural en los depósitos de jales de la mina La Negra para determinar la capacidad de acumular o fijar los metales pesados y

arsénico contenidos en los jales, para poder utilizarlas en la reforestación de los depósitos.

Se seleccionaron 11 especies nativas que crecían en tres de las cinco presas de jales, para éstas especies se determinó la concentración promedio de arsénico y metales pesados que contenían los diversos tejidos de la planta raíz, tallo, hoja y flor.

El análisis de la distribución del arsénico y los metales pesados en las diferentes partes de la planta muestran resultados de interés para el presente trabajo por lo que se decidió estudiar las especies la *O. lasiacantha* y la *N. glauca* debido a los porcentajes de acumulación, los cuales se presentan a continuación:

Opuntia lasiacantha, acumulo arsénico y metales pesados en mayor proporción en la raíz, el 97.4 % de As, el 97 % de Cd, el 60 % de Pb, el 100 % de Cu y el 85.9 % de Zn. Por lo que esta especie puede ser utilizada en las presas de jales para fijar al arsénico y los metales pesados en la zona de la rizósfera.

Nicotiana glauca presentó las más altas concentraciones de los cinco elementos analizados, trasladando los elementos hacia la parte aérea. El 93.7 % del arsénico acumulado se encuentra distribuido en el tallo, hoja y la flor. En el caso del cadmio, esta distribución corresponde al 93.2 %, para el cobre es de 90.8 % y para el zinc es 89.4%. La distribución del plomo en la planta varía ligeramente ya que en la raíz se tiene el 24.2 % del plomo acumulado y el resto está en la parte aérea. Por lo que esta especie tiene capacidad de acumular cantidades significativas de arsénico y metales pesados sin llegar a ser una especie hiperacumuladora.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO

2.4.1. Especie *Nicotiana glauca*

Nombre científico: *Nicotiana glauca* R. C. Graham

Familia: Solanaceae

Nombre común: árbol del Tabaco, palán-palán, gandul, bobo.

Descripción: Se trata de un arbusto o arbolillo de hoja perenne (Figura 4) originaria de Sudamérica, tiene una amplia distribución en México, crece espontáneamente, aparece de manera silvestre por doquier, no necesita

cuidados, siendo los mejores lugares para su crecimiento zonas templadas cálidas, áridas y subtropicales, las regiones secas y húmedas, junto a los caminos y riberas de los ríos, hasta altitudes de 3.000 m, pudiendo alcanzar hasta 7 u 8 metros de altura. Las hojas tienen ciertas variabilidades morfológicas y pueden ser ovaladas o lanceoladas, de color verde claro con una capa de pruina verde azulada, las ramas son quebradizas de corteza verde, las flores llegan a tener una longitud de cinco centímetros de color amarillo y de cáliz tabular, los frutos son cápsulas ovoides o elipsoidales. El fruto se abre espontáneamente y posee multitud de semillas (entre 10.000 y 100.000) las cuales se caracterizan por su ligereza y su excelente flotabilidad, por lo que la dispersión se realiza por viento y agua (Carrere, 2007).

Esta planta ha presentado efectos tóxicos; por anabasina que es un alcaloide presente en diferentes partes de la planta lo que la hace repelente a los herbívoros siendo variados los síntomas presentados por los animales al ingerir la planta (Carrere, 2007).

Esta planta se comporta como pionera en ecosistemas perturbados y resiste concentraciones elevadas de diversos contaminantes. Existen estudios que reportan su capacidad de retener en sus tejidos altas concentraciones de Pb, Zn, Cd y Co (Guerrero, 2005). Por estas características, *N. glauca*, es considerada un modelo ideal para llevar a cabo estudios de fitorremediación.



Figura 4. Imágenes *Nicotiana glauca*.

2.4.2. Especie *Opuntia lasiacantha*

Nombre científico: *Opuntia lasiacantha* Pfeiff

Familia: *Cactaceae*

Nombre común: *Nopal, Nopal De Cerro*

Descripción: es una especie fanerógama nativa de México ampliamente distribuida en toda América. En México se encuentra en lugares a nivel del mar hasta las planicies del centro y norte del país, aunque se da mayormente en zonas áridas, está presente en toda la República Mexicana (Esparza, 2010).

Planta arbolada, de color verde (Figura 5) y flores de color naranja y amarillo considerada planta arborescente, arbustiva o rastreras, con tallos carnosos armados de espinos, artículos aplanados de forma lanceolada, elípticos, las flores son grandes, frecuentemente amarillas, aunque a veces son de color rosa, anaranjado o rojizo. El fruto es globoso, ovoide con espinas setosas y pulpa jugosa, semillas lenticulares. Puede propagarse mediante dos métodos: Multiplicación asexual (pencas y fracciones de penca) y sexual (semilla) siendo el primer caso el más recomendable, debido a que la propagación es más sencilla y mediante este se logrará mantener las características de la variedad escogida como madre (Sáenz, 2006).

La especie muestra gran adaptabilidad a la fluctuación del pH. Las raíces del nopal tienden a ubicarse a profundidades someras en suelos porosos y arenosos. Pueden tolerar temperaturas extremas de 10 a 50 °C, con respecto a la cantidad de agua el nopal es poco exigente y presenta amplios márgenes de tolerancia debido a su fisiología y a la facultad de almacenar agua en sus tejidos.



Figura 5. Imágenes de Opuntia lasiacantha

3. MARCO TEÓRICO

3.1. METALES PESADOS

Los elementos metálicos conforman la mayoría de los elementos presentes en la tabla periódica, algunos de estos elementos son nutrientes esenciales para plantas y animales. No obstante cuando estos elementos están presentes en los sistemas ambientales a concentraciones superiores a ciertos niveles, ya sea por causa de desequilibrios naturales o por introducción antropogénica, pueden ser considerados como tóxicos (Domenech, 2006).

El término metales pesados está asociado a aquellos metales que causan un impacto ambiental significativo, hace referencia a elementos químicos cuya densidad es mayor a 6 g/cm^3 ; prácticamente los metales de transición pueden considerarse de metales pesados, excepciones a esta definición son el titanio (4.5 g/cm^3) y el arsénico (5.7 g/cm^3) que a pesar de estar considerado como no metal se puede clasificar como metal pesado por sus propiedades de carácter ambiental. Dentro de los metales pesados se distinguen dos grupos:

- 1) Oligoelementos o micronutrientes. Son los requeridos en cantidades traza por plantas y animales; necesarios para que los organismos completen su ciclo de vida, pero son tóxicos una vez superado cierto umbral de concentración, como ejemplos se pueden citar al Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
- 2) Sin función biológica conocida. Son altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos, e incluyen Cd, Hg, Pb, Bi, Sn, Ti.

El término elementos traza, también es usado para referirse a algunos metales pesados, relacionando a las propiedades tóxicas del elemento y su concentración más que por su densidad. Se pueden englobar a los elemento traza como todos aquellos que se encuentran presentes en concentraciones no detectables mediante técnicas de análisis clásicas y se presentan en el rango de 100 a 0.01 mg/kg (Pérez, 2006). En el presente trabajo se optó por utilizar el término metaloide para referirse al As y metales pesados para referenciar Cd, Cu, Pb y Zn.

Existen varias fuentes de emisión de metales pesados al ambiente. De forma natural provienen principalmente del intemperismo y erosión; sin embargo las emisiones por fuentes antropogénicas son las mayores aportadoras de metales pesados y arsénico, provocando condiciones de mayor disponibilidad para los seres vivos.

La industria minera es una fuente importante de emisión de metales, ya sea en menas o en residuos de la explotación como los jales, que debido a su composición y disposición, puede existir migración de los elementos contenidos en ellos al entorno.

La interacción de los sistemas con el agua, su retención en el suelo, la temperatura, el pH, la porosidad del suelo y otros factores determinantes influyen sobre la intensidad de las reacciones que se llevan a cabo (Li, 2007; Carrillo y González, 2006; Rashed, 2010). Su disponibilidad depende de las condiciones del suelo, como el tamaño de partícula, la capacidad de intercambio catiónico y de factores de las plantas, como la superficie y exudados de la raíz (Salas, 2007).

Los cinco elementos estudiados en este trabajo se catalogan bajo el concepto general de metales pesados debido al problema medioambiental que surge cuando se originan emisiones localizadas con concentraciones altas y por los riesgos debido a su toxicidad; por ejemplo, el arsénico afectó plantas dañando su proceso metabólico y disminuyendo la germinación de semillas (Ruiz y Armienta, 2012).

El plomo puede producir en las plantas una inhibición del crecimiento y de la acción enzimática y reduce la producción de clorofila (Ruiz y Armienta, 2012).

El Zinc y Cadmio al tener la misma configuración poseen las mismas propiedades (Guerrero, 2005), El Cd tiende a ser más noble formando enlaces más covalentes, coordina menos aniones en su estructura y es más fácilmente reducible, los compuestos de Cd son muy tóxicos; ya que tiende a depositarse y adherirse a la materia orgánica del suelo; varias plantas lo absorben eficazmente y lo concentran dentro de sus tejidos, una vez absorbido a nivel molecular es conocido como bloqueador del calcio en la membrana plasmática. En general, se sabe que el cadmio desplaza al calcio y al zinc en determinadas proteínas además de causar estrés oxidativo. El Zn es un elemento relativamente abundante con funciones

biológicas conocidas por lo que es considerado un micronutriente; la presencia conjunta de Cd y Zn se explica porque el Cd es un subproducto de la minería de Zn. (Guerrero, 2005).

El cobre es un micronutriente, esto significa que el contenido de Cu en las plantas es menor que el de otros nutrientes como el nitrógeno N. En efecto, las plantas contienen 2,500 veces menos Cu que N y aun así el Cu es tan necesario para el crecimiento como lo es el N. Las plantas necesitan el Cu para completar su ciclo de vida, es decir para producir semillas viables, sin Cu, no habría fotosíntesis ya que este nutriente es necesario para la formación de clorofila el material que le da su color verde a las plantas y que les permite absorber la luz solar utilizada durante este proceso, deficiencias más severas producen clorosis y muerte por las deficiencias de Cu desarrollan tallos débiles y parecen marchitarse ligeramente inclusive bajo condiciones de humedad adecuada (Ruiz y Armienta, 2012).

3.2. COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DE LOS METALES PESADOS

Los metales y metaloides obedecen procesos dinámicos de biogeoquímica en zonas de interés donde se llevan a cabo la mayor parte de interacciones químicas y físicas con el suelo. La heterogeneidad del sustrato y la cercanía del ambiente a la superficie, donde las interacciones de complejación tienen lugar e involucran a la roca, tipo de suelo, agua, aire y organismos biológicos presentes, son los que regulan el hábitat natural y determinan la disponibilidad de recursos indispensables para la vida.

Los procesos biogeoquímicos afectan el estado de oxidación de los metales, controlando su solubilidad, movilidad, biodisponibilidad y toxicidad (López, 2009). Los metales ingresan en forma de iones a la solución del suelo (fase líquida-acuosa).

La sorción de metales, incluyendo a algunos compuestos alcalinos (como el potasio y el calcio), a metales de transición (como el cadmio y el níquel) en minerales inorgánicos (arcillas minerales, óxidos metálicos y oxihidróxidos) y sustancias orgánicas húmicas son de los mecanismos más importantes que controlan el destino, transporte y biodisponibilidad de los metales en los ambientes de suelo y agua. Por lo que el suelo puede contener metales como iones libres, complejos ligados a materia orgánica o a inorgánica.

En la Figura 6 se ilustra cómo los resultantes de estas reacciones de complejación y los iones libres pueden ser tomados por las plantas, ser retenidos en superficies minerales, en la materia orgánica natural del suelo y microbiota, o ser transportados al subsuelo por lixiviación o por transporte facilitado por coloides, precipitar como sólidos y quedar como partículas ocupando la fase porosa del suelo. Las raíces y microorganismos afectan el transporte y solubilidad de metales en el suelo. Algunos microorganismos pueden metabolizar ciertos metales como el mercurio, selenio, estaño, arsénico y cromo a través de reacciones de oxidación-reducción y de metilación (Adriano, 2001; Sparks, 2005)



Figura 6. Rutas y procesos biogeoquímicos de los metales que se pueden llevar a cabo en el suelo (Sparks, 2005).

Varios mecanismos de retención de metales están relacionados con el sólido (sorbente) con el que interactúan. Para los sistemas naturales en suelos y sedimentos, están las arcillas minerales, los óxidos metálicos y los oxihidróxidos, así como las sustancias húmicas asociadas a la materia orgánica (López, 2009)

Estos sorbentes se caracterizan por una gran carga superficial y alta superficie de carga, las cuales juegan un rol primordial en la sorción de metales. La superficie de carga puede ser negativa y no cambiar con respecto al pH en el caso de minerales arcillosos de carga constante como lo son la montmorillonita y la vermiculita. Esta carga constante resulta de la sustitución iónica en la estructura de la arcilla (sustitución isomórfica); sin embargo, esta superficie de carga puede ser variable dependiendo de los cambios de pH debido a los grupos funcionales en la superficie de los

sorbentes. Arcillas minerales como la caolinita presentan esta variabilidad (Sparks, 2005).

Fuerzas químicas y físicas son involucradas en la sorción de metales de una solución. La sorción de metales (retención) a metales de transición (como el cadmio y el níquel) son retenidos en minerales inorgánicos (arcillas minerales, óxidos metálicos y oxihidróxidos) y las sustancias orgánicas húmicas son de los mecanismos más importantes que controlan el destino, transporte y biodisponibilidad de los metales en los ambientes de suelo y agua. De esta manera, el suelo puede contener metales como iones libres, complejos ligados a materia orgánica o a inorgánica. (López, 2009)

3.3. PRINCIPIOS DE FITORREMEDIACIÓN

Las plantas poseen mecanismos específicos para absorber, translocar y acumular nutrientes, sin embargo algunos metales y metaloides aunque no son esenciales para las plantas son absorbidos, translocados y acumulados debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos esenciales (Ruiz y Armienta, 2012).

El crecimiento de ciertas especies vegetales se ha convertido en una metodología in situ muy conveniente para la depuración de suelos contaminados pues se utilizan algunas especies que favorecen los procesos de eliminación de contaminantes; según la Agencia de protección al medio ambiente (US EPA), la Fitorremediación se basa en los mecanismos de sorción de las plantas; de donde se derivan: Fitoextracción, Fitoestabilización, Fitovolatización y Rizofiltración. Según US-EPA (2000) se definen a continuación:

3.3.1. Fitoextracción

En este proceso los metales se acumulan en el tejido de las plantas donde es permanentemente almacenado. Las plantas llamadas hiperacumuladoras son las adecuadas para este tipo de trabajos de fitoextracción ya que pueden absorber 100 veces más metales que otras plantas. Se definen como hiperacumuladoras aquellas capaces de acumular niveles superiores al 0.1 % en peso seco del vegetal de cationes metálicos como Cu, Pb Ni, Co, etc. o niveles superiores a 1% de metales esenciales como Zn o Mn (Domenech, 2006), una de las principales desventajas es que este tipo de plantas son generalmente de crecimiento

lento con una pequeña biomasa y sistemas de raíces poco profundas (US EPA, 2000). Después de que estas plantas son utilizadas para procesos de remediación, debe ser cosechada para después recuperar los metales o eliminar la biomasa correctamente. El proceso estará limitado por la zona de influencia de las raíces (US EPA, 2000).

3.3.2. Rizofiltración

Rizofiltración es la adsorción, absorción o precipitación en raíces de las plantas, de los contaminantes que se encuentran en solución donde se encuentra inmersa la raíz. Dependiendo del contaminante se podrá concentrar o translocar. Los exudados de las raíces de las plantas pueden provocar la precipitación de algunos metales. Los contaminantes se eliminan al retirar la planta de la solución y darle algún tratamiento específico,

Este método presenta ciertos inconvenientes como: que el pH de la solución influente tendrá que ser ajustado continuamente, se requerirá un sistema bien diseñado para controlar la concentración del afluente y del caudal además deberá maximizar la zona de contacto haciendo coincidir la profundidad de la unidad a la profundidad de las raíces, las plantas (especialmente plantas terrestres) tendrían que ser cultivadas en un invernadero o vivero (US EPA, 2000).

3.3.3. Fitovolatilización

La fitovolatilización es utilizada para extraer metales volátiles del suelo, como el mercurio, de los sedimentos y suelos, los cuales son emitidos a la atmósfera a través de la respiración de las plantas como vapor detoxificado.

3.3.4. Fitoestabilización

La Fitoestabilización se define como (1) la inmovilización de un contaminante en el suelo a través de la absorción y la acumulación por las raíces, la adsorción sobre las raíces, o precipitación dentro de la zona de las raíces de las plantas, y (2) el uso de plantas y raíces para evitar la migración de contaminantes a través del viento, la erosión del agua, la lixiviación y dispersión del suelo (US EPA, 2000)

En este proceso las plantas son utilizadas para estabilizar los metales, presentes en el suelo reduciendo la erosión por aire y agua; esto puede ocurrir por: sorción, precipitación, formación de complejos, o la reducción de valencia del metal (US EPA 2000). Las desventajas consisten en que los contaminantes permanecen en el lugar además de que la vegetación y el suelo pueden requerir mantenimiento a largo plazo como, fertilización o modificación mediante enmiendas para evitar la liberación de los contaminantes y la lixiviación (EPA, 2000).

3.4. MECANISMOS DE ACUMULACIÓN Y ASIMILACIÓN EN PLANTAS

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran, pero en distinto grado dependiendo de la especie vegetal y de las características y contenido de metales en el suelo (Rashed, 2010). Las plantas pueden adoptar diversas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Ruiz y Armienta, 2012). Para que cualquier compuesto sea absorbido por una planta, éste debe de estar en contacto con su raíz. Existen tres mecanismos para que esto ocurra: flujo de masa, difusión e intercepción con la raíz.

3.4.1. Flujo de masa

Los compuestos son transportados en forma de iones a la raíz vía flujo de agua. Las plantas transpiran agua lo cual causa un gradiente que permite al agua fluir hacia la raíz. Si los compuestos se encuentran en forma soluble en agua, serán absorbidos a través de la raíz. Este es un mecanismo importante por medio del cual la planta absorbe nutrientes o iones que están abundantemente en el suelo, pero se encuentran débilmente fijados al él, como lo son el Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , Cl^- y H_3BO_3 . Los factores que influyen en el flujo de masa son la textura (poca humedad en el suelo disminuye el flujo de masa), el tamaño del sistema de raíces de la planta (profundidad, grosor), la temperatura del suelo (temperaturas frías reducen la transpiración de la planta).

3.4.2. Difusión

La difusión ocurre en la solución del suelo, los iones disueltos en ella se moverán de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración. El área alrededor de la raíz en una planta con crecimiento activo tiene una baja concentración de nutrientes, así que los nutrientes que se encuentran en la solución del suelo, migrarán hacia el área de la

raíz. Los nutrientes que son absorbidos por las raíces de las plantas a través de este mecanismo son el potasio (K) y el fósforo (P), ambos son de baja solubilidad.

El principal factor que influye en la difusión es el gradiente de concentración, de los compuestos o nutrientes en el suelo, y ésta dado por el coeficiente de tortuosidad del suelo. La tortuosidad es el camino que los iones toman en la difusión. Una porosidad del suelo grande y una adecuada humedad hacen decrecer la tortuosidad, haciendo que la difusión sea más fácil. A poros pequeños y reducida humedad, la tortuosidad se incrementa. La movilidad de los iones o átomos es afectada por la temperatura, por la que el rango de difusión se hace mayor al incrementar está; así también, a bajas temperaturas la difusión se ve limitada. Las propiedades químicas y físicas del suelo también influyen en la movilidad de iones. A bajos pH la difusión de iones se da más rápidamente que en pH alcalinos.

3.4.3. Intercepción con la raíz

Con la extensión continua de las raíces a través del suelo, existe un contacto continuo de las raíces con el suelo que no se encuentra expuesto a la intemperie. Las superficies de las raíces están directamente interaccionando con los nutrientes y compuestos del suelo en este proceso de desplazamiento. La cantidad de nutrientes absorbidos por intercepción de raíz dependen del volumen de la raíz. Típicamente, no más del 1% en volumen del suelo está en contacto por las raíces. Los nutrientes como el calcio y el magnesio son comúnmente absorbidos por intercepción con la raíz. La micorriza (asociación simbiótica entre un hongo "fungi" y las raíces de la planta) puede incrementar la superficie de área de las raíces y elevar la sorción de nutrientes por este mecanismo.

3.4.4. Zonas de absorción de la raíz

El sistema de raíces en la planta es el encargado de la sorción de nutrientes ya sean móviles o no. Los nutrientes "móviles" forman compuestos solubles que no interactúan con los sólidos del suelo y podemos hallarlos en concentraciones comparativamente altas en la solución del suelo. La zona de sorción de estos será comparativamente más grande a la de los nutrientes que no lo son. Un ejemplo son los nitratos (NO_3^-). Los nutrientes inmóviles son insolubles y se encuentran fijados a

partículas sólidas en el suelo. La zona de sorción para estos nutrientes se encuentra mayormente localizada alrededor de las raíces; éste es el caso del potasio y del fósforo.

3.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISPONIBILIDAD Y ACUMULACIÓN DE LOS METALES PESADOS.

Factores fisicoquímicos	Magnitud	Descripción
Acidez del suelo	En general se considera que el pH Normal de los suelos esté entre 6 y 7, los suelos con pH<4.5 se consideran muy ácidos y los suelos con pH>8.5 son alcalinos.	Se ha comprobado que a pH básico los suelos presentan adsorción más fuerte para los metales pesados inhibiendo en cierta medida con ello su solubilidad.
Textura	Representa la composición granulométrica del suelo; Clasificación del tipo de suelo: Arenoso> 30 %, franco del 10 al 30 % y arcilloso> 30 %	Los suelos francos son suelos considerados como óptimos debido a la proporción de las fracciones orgánicas que los caracteriza: 40% de arcilla y limo y un 20% de arcilla.
Salinidad	determinada por el contenido de sales en el suelo Parámetro de influencia en la movilización de los metales pesados por dos mecanismos: 1) los cationes asociados a las sales (sodio y potasio) pueden remplazar a metales pesados en la adsorción, 2) los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg.	
Materia orgánica	Los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión	Sirve como fuente de alimento a las especies vegetales y a microorganismos participa en los procesos de meteorización de la materia mineral movilizando cationes metálicos y facilitando nutrientes a los organismos.
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	En general mientras mayor sea la capacidad de intercambio catiónico (CIC) mayor será la capacidad del suelo de fijar los metales.	El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y de su radio iónico hidratado, a mayor tamaño y menor valencia, menos fuertemente quedaran retenidos.
El potencial Redox	La disponibilidad y movilidad de los metales pesados en el suelo depende del estado de oxidación en que se encuentren, la solubilidad de los metales depende del pH y de las condiciones oxidantes o reductoras. Según Pérez (2006) "la solubilidad de Zn, Cd, Cu y Pb es mucho menor en condiciones reductoras que en condiciones oxidantes cuando se encuentran en medio ácido	
Carbonatos	Un suelo es calizo a partir de un 10% de carbonato de calcio, existiendo exceso al superar el 20%.	El suelo es calizo influye la textura, contribuye en el empobrecimiento del humus. Además, eleva el pH y bloquea formas insolubles de ciertos nutrientes indispensables para la planta, por ejemplo, al manganeso, zinc y cobre.

Figura 7. Factores que influyen en la disponibilidad y acumulación de metales (López, 2009.)

3.6. ESTUDIOS REALIZADOS EN INVERNADEROS

Maldonado et al. (2007), Estudió el comportamiento de *Tithonia tubiformis*, planta que debido a su crecimiento y desarrollo en un lugar en Guanajuato en el que se depositaron jales antiguamente; con lo que se demostró que la planta era tolerante a los metales pesados, seleccionó 44 de esas plantas jóvenes y las trasplantó a macetas que contenían jal para posteriormente analizar los principales tejidos: raíz, tallo y hoja para la cuantificación de Pb y Zn; 4.5% de las plantas no sobrevivió. Sin embargo, de las restantes presentó un incremento al doble de tamaño de las plantas control, así mismo dichas plantas presentaron una mayor producción de raíces secundarias. Adjudicando este comportamiento a una forma de adaptación para sujetarse al sustrato y tener mayor superficie para la absorción de nutrientes. Con respecto a la acumulación de metales se observó que la especie vegetal presentó en la raíz 11.03 mg/kg, en el tallo 8.05 mg/kg y en la hoja 12.98 mg/kg, absorbiendo de un 20 a 30 % del plomo contenido en el jal. Observó que cuando la planta se encuentra en el jal puede desarrollar mecanismos de tolerancia al plomo, argumentando que el plomo es captado por difusión pasiva a través de las raíces. Para el Zn los resultados obtenidos en la planta, con respecto al contenido de jal fueron, 69.72 mg/kg en raíz, 54.88 mg/kg en tallo y 171.89 mg/kg en hoja. El autor define este comportamiento a que cuando la planta crece en un medio rico en zinc el exceso de este metal es almacenado en los cloroplastos de las hojas por lo que la hoja presenta mayor acumulación, con lo que demuestra que la especie es una buena bioremediadora de los metales contenidos en los desechos mineros, además de la gran formación de biomasa en corto tiempo y que es fácilmente cosechable.

Ruiz y Armienta (2012) presenta la acumulación de As y metales pesados en la planta de maíz *Zea mays L.*; crecidas en sustratos impactados con residuos mineros. Bajo condiciones de invernadero, que permitieron evaluar la transferencia y efecto de los metales y metaloides procedentes únicamente del suelo, y con el arreglo en macetas con jal y suelo, evaluando la acumulación de metales en la planta así como sus efectos en su desarrollo por 30 y 70 días. Se encontró que la tasa de germinación fue del 93.18% de un total de 44 semillas. Las concentraciones de metales y metaloides en las raíces de la planta fueron superiores a las medidas en la parte aérea; así mismo las mayores concentraciones se presentaron en

función de la distancia entorno al jal de "El Fraile" en Taxco Gro. Las plantas sembradas en los sustratos con mayores concentraciones de arsénico y metales pesados mostraron síntomas visibles de afectación como necrosis, clorosis, adelgazamiento de las hojas e inhibición del crecimiento. El plomo y el zinc fueron los elementos con mayor concentración en las plantas y en los sustratos. Además a los 70 días de crecimiento el Zn presentó concentraciones de 54.7 a 3555.4 mg/kg y el Pb de 11.1 a 320.3 mg/kg en las raíces; en la parte aérea se determinaron contenidos de 30.8 a 519.8 mg/kg de Zn y 3.7 a 38.5 de Pb. A los 30 días los contenidos de Zn en la raíz variaron entre 88.9 y 504.8 mg/kg así como 25.2 y 300.9 mg/kg de Pb. En la parte aérea 15.5 a 555.6 mg/kg de Zn y de 2.2 a 10.8 mg/kg de Pb. Adjudicando las concentraciones de Zn en la planta al carácter esencial de este metal. Para evaluar la habilidad de la planta para translocar los metales de la raíz a la parte aérea se calculó el factor de translocación (FT), a los 70 días, el único elemento que presentó un valor de $FT > 1$ fue el As con valores de 1.08 y 2.29, lo que indica que el As es un elemento transferible a las plantas del maíz mientras que el resto de los metales presentaron un $FT < 1$. Sin embargo, aunque el Cd y Zn no llegaron a sobrepasar esta restricción si se encuentran muy cercanos a ella por lo que dichos metales son considerados junto con el As como los más susceptibles de transferirse. Al analizar los factores de bioconcentración se encontró que los valores son bajos para la mayoría de los elementos indicando que en esta especie no hay hiperacumulación.

4. METODOLOGÍA

4.1. PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO

El experimento se realizó con base en análisis previos hechos por Rodríguez (2010), donde encontró que algunas especies endémicas se han adaptado a los elementos tóxicos que contienen los jales, en mina La Negra, alcanzando altas concentraciones en sus diferentes partes como la *N. glauca*, que acumuló en sus partes aéreas zinc, cadmio y arsénico, y la *O. lasiacantha* que acumuló una gran cantidad de As en la raíz. Con lo anterior se diseñó el experimento utilizando estas dos especies que por sus características podrá ser útil para la reforestación de los depósitos mineros en etapa de cierre.

4.2. PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO

4.2.1. Preparación de macetas

El experimento se realizó en macetas de dos diferentes formas:

Macetas cilíndricas, cuyas dimensiones son 20 cm de diámetro en la base, 28 cm de diámetro superior y 25 cm de alto, a las que se le hicieron perforaciones en todo el contorno a dos alturas: 5 y 15 cm de la base.

Macetas rectangulares de 77 cm de largo, 22 cm de ancho y 20 cm de altura, cuyas perforaciones se hicieron a 4 y 10 cm de la base y en cada pared de la maceta.

Las perforaciones más cercanas a la base se realizaron para poder muestrear jal y las superiores para muestrear el suelo, estas perforaciones permitieron muestrear toda la periferia del jal o suelo, formando así una muestra representativa. Todas las perforaciones se taparon con corchos para evitar la salida del material durante el experimento y solo se retiraban para realizar los muestreos.

4.2.2. Colocación del jal, suelo y planta

Se utilizaron dos tipos de jal, uno de mina La Negra, muestreado de las presas 4 y 5; mientras que el jal Z fue obtenido de un estudio anterior realizado en otra mina.

El suelo se compró en Xochimilco; es una mezcla de suelo con materia orgánica y fertilizante natural.

Las especies vegetales utilizadas fueron recolectadas en la localidad de Maconí fuera de la zona de influencia de las presas de jales. Dichas muestras fueron colocadas en bolsas con suelo para su traslado a la Ciudad de México. Después se plantaron en una pequeña maceta para que echaran raíz y crecieran un poco, para después ser trasplantadas a la maceta que se preparó para el experimento.

Las macetas cilíndricas fueron para los ejemplares de la especie *N. Glauca* (Figura 8) ya que por las características de la raíz de la especie no necesita de gran espacio para crecer. El arreglo del sistema jal-suelo en estas macetas se hizo colocando 5 cm de jal en el fondo (1.75 kg), después se colocaron 15 cm de suelo, donde se plantó la especie vegetal.



Figura 8. Arreglo del sistema jal-suelo y planta para la especie *N. glauca*.

Para la *Opuntia Lasiacantha* se utilizaron las macetas rectangulares (Figura 9), ya que esta especie tiene un crecimiento de raíces amplio. El arreglo se realizó colocando 4 cm de jal equivalente a 3.5 kg y 10 cm de suelo donde se plantó la especie.



Figura 9. Arreglo del sistema jal-suelo y planta para la especie *O. lasiacantha*.

Las macetas con la especie *N. glauca* fueron tres, dos con jal de mina La Negra (NG1 y NG2) y una con jal Z (NG3). Las macetas con *O. lasiacantha* fueron dos una con jal de mina La Negra (OL1) y otra con jal Z (OL3). Con el objetivo de llevar un control de los resultados, para cada especie vegetal se sembró un ejemplar solo con suelo; nombrado blanco.

4.2.3. Conservación de la especie vegetal

Las especies permanecieron a la intemperie, bajo las condiciones climáticas de Ciudad Universitaria en México D.F. las cuales se presentan en la siguiente tabla (Figura 10).

Presion Atmosferica D.F.	585 mmHg				
DISTRITO FEDERAL EST. C.U	ANUAL mm.	DISTRITO FEDERAL EST. C.U	T MIN °C	T MED °C	T MAX °C
PRECIPITACION MEDIA 2009	59.4	TEMPERATURA MEDIA 2009	11.1	17.7	24.4
PRECIPITACION MEDIA 2010	58.2	PRECIPITACION MEDIA 2010	10.5	17.0	23.6
PRECIPITACION MEDIA 2011	65.2	PRECIPITACION MEDIA 2011	10.6	17.4	24.2

Figura 10. Datos meteorológicos de 2009 a 2011, CONAGUA 2012.

Las plantas se regaron una vez a la semana en temporada regular y en temporada de lluvia no fueron regadas.

4.3. MUESTREO

4.3.1. Plan de muestreo

El objetivo del muestreo fue recolectar una cantidad de muestra de los tejidos, de la planta, donde se sabe por Rodríguez (2010) que acumulo

metales. El muestreo se realizó de suelo, jal, tallo y hoja para la *N. glauca* y suelo, jal, raíz y penca de *O. lasiacantha*.

En la misma fecha que se muestrearon las plantas; se tomó muestra del lixiviado, agua de riego que se filtra por el sistema jal-suelo, este lixiviado fue colectado por la parte inferior de cada maceta (Figura 16). La duración total de la prueba fue de 1 año 9 meses, del 18 de Septiembre 2009 al 24 Junio 2011 (Figura 11).

MUESTREO	MES
M1	0
M2	7
M3	21

Figura 11. Tabla con intervalo entre los Muestreos.

4.3.2. Procedimiento de Muestreo

Muestreo de especies vegetales

La toma de las muestras para la *N. glauca* (Figura 12): se realizó cortando hojas y tallo. Para la *O. Lasiacantha* (Figura 13) se cortó un trozo de penca para obtener la muestra de la raíz, se retiró, con ayuda de una espátula, el sustrato hasta encontrar la raíz para cortarla.



Figura 12. Toma de muestra de *N. glauca*.



Figura 13. Toma de muestra de *O. lasiacantha*.

Muestreo de suelo y jal

Para muestrear el suelo y el jal, se retiró el corcho que tapaba cada orificio y con ayuda de un popote, al que se le hizo un corte diagonal en la punta para usarlo como espátula, se tomaba muestra de cada orificio hasta tener una muestra representativa. Todas las muestras se colocaron en bolsa de plástico para transportarlas (Figura 14).



Figura 14. Muestras tomadas de *O. lasiacantha*.

Muestreo de Lixiviado

La toma del lixiviado (Figura 15) se hizo agregando agua hasta saturar el sustrato. La recolección se hizo con recipientes colocados debajo de cada maceta; este es un proceso que llevaba aproximadamente 3 a 4 horas.



Figura 15. Toma de muestras de Lixiviados.

4.4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

En el laboratorio se separaban las plantas para lavarlas con agua corriente para eliminar todo el polvo o suelo que podrían haber acumulado, posteriormente se enjuagaban con agua destilada y se colocaban sobre papel absorbente para quitar el exceso de agua; finalmente fueron colocadas en una bolsa de papel de estraza para meterlas al horno; se utilizó bolsa ya que por la cantidad de muestras permitía más fácil su manejo. El horno utilizado fue de convección programado a una temperatura de 50°C funcionando intermitentemente hasta que las muestras estuvieran secas aproximadamente 5 a 8 días. Una vez secas las muestras se molieron con mortero.

La preparación de suelos y jales se realizó colocándolos en charolas para que perdieran humedad de manera natural, aproximadamente 5 días, ya sin humedad se molió, con mortero, hasta quedar a 200#.

El lixiviado (Figura 16) se filtró con una bomba de vacío utilizando papel filtro Whatman del No. 40, se registró el pH inicial y el volumen filtrado. De cada lixiviado se conservó una botella (60 ml) y un duplicado. Las muestras de lixiviado fueron refrigeradas aproximadamente a -2°C, hasta el día en el que serían analizadas.



Figura 16. Filtrado de Lixiviado.

4.5. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN TOTAL EN PLANTAS, SUELO Y JAL

El método para determinar la concentración de metales pesados contenidos en las muestra fue la espectroscopia de absorción atómica, utilizando la técnica de llama.

Para el análisis de muestras sólidas, como es el caso de tejidos vegetales, se requiere de un tratamiento previo para transformar las muestras en formas químicas solubles. Este procedimiento involucra ataques con mezclas de ácido a temperaturas altas y/o presiones elevadas, a este método se le conoce como digestión y es el paso previo al análisis. Este procedimiento y el análisis se realizaron en el laboratorio de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Digestión de plantas, suelo y jal

La preparación de las muestras para el proceso de digestión consistió en pesar 0.5 gr de la muestra en una balanza analítica marca OHAUS. Para pesar la muestra se coloca sobre papel glasin para evitar estática, después la muestra fue colocada en un vaso fabricado de teflón (Figura 17), que se coloca sobre una gradilla para después agregar los ácidos correspondientes, siguiendo las instrucciones del equipo, las cuales varían dependiendo del tipo de muestra.



Figura 17. Peso y preparación de la muestra.

Los ácidos y el volumen agregados a las muestras vegetales fueron:

Agua desionizada 5 ml, HNO_3 1 ml, HCL 0.5 ml.

Para el suelo y jal los volúmenes fueron:

Agua desionizada 10 ml, HNO_3 5 ml, HCL 1 ml HF 4 ml

Formando una muestra de 20 ml en total.

A los vasos se les colocó una contra-tapa para ayudar a regular la presión y una tapa la cual tiene un pequeño orificio que ayuda a eliminar los gases que pudieran formarse durante el procedimiento (Figura 18). Los vasos se colocaron en el carrusel del horno, el cual tiene una protección para cada vaso de fibra de vidrio.



Figura 18. Preparación de muestra para digestión.

Para digerir la muestra se utilizó un digestor marca CEM modelo Marsxpress, (Figura 19), el cual somete la muestra a 130°C alcanzando esta temperatura en 10 minutos (rampa de temperatura) y manteniéndola así

por 30 minutos; en este tiempo la muestra es sometida además de la temperatura, a alta presión que hará que la muestra sólida se digiera.



Figura 19. Digestor de Microondas MARS.

Terminado este proceso se dejó enfriar la solución ya que en la etapa de enfriamiento la temperatura solo baja hasta los 80 grados, por lo que para evitar cualquier accidente con los vapores generados se deja enfriar a temperatura ambiente. La muestra digerida se filtró con papel Whatman No. 4 mediano, y se colocó en frasco de plástico de 50 ml, estos frascos se etiquetaron y se almacenaron en cuarto frío hasta el día de su análisis.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO

A continuación se presentan los valores obtenidos para las hojas y tallo de *N. glauca*, penca y raíz de *O. lasiacantha*.

	NG1		NG2		NG3		NGB		OL1		OL3		OLB		
	HOJA	TALLO	HOJA	TALLO	HOJA	TALLO	HOJA	TALLO	PENCA	RAIZ	PENCA	RAIZ	PENCA	RAIZ	
	mg/kg														
As	0.002 a 0.490	0.002 a 0.437	0.66 a 0.728	0.002 a 0.327	0.002 a 0.667	0.002 a 0.219	0.002 a 0.423		0.002	0.002	0.002 a 0.479	0.002	0.002	0.002	0.002
Cd	1.36 a 1.87	0.767 a 0.859	3.329 a 1.990	1.329 a 0.640	1.6 a 1.252	0.505 a 0.308	0.886 a 1.284	0.364 a 0.629	0.65 a 0.77	0.468 a 0.782	0.461 a 0.259	0.367 a 2.891	0.087 a 0.447	0.123 a 0.298	
Cu	10.881 a 52.810	<LD a 12.859	27.84 a 18.08	<LD a	33.91 a 203.92	<LD a	<LD a 17.010	<LD a	<LD a	<LD a 67.667	<LD a	<LD a	<LD a	<LD a	
Pb	<LD a 2.286	1.589 a 3.025	0.07 a 2.300	0.136 a 3.279	<LD a 1.54	0.330 a 0.686	<LD a 2.874	<LD a 1.485	<LD a 7.65	0.607 a 9.22	0.42 a 7.245	0.105 a 8.574	<LD a 7.323	0.291 a 6.606	
Zn	43.35 a 133.61	32.81 a 93.09	67.1 a 82.6	30.45 a 54.49	427.66 a 961.87	127.5 a 495.21	50.42 a 71.10	27.5 a 48.23	105.77 a 157.7	8.78 a 30.81	87.8 a 291.9	8.8 a 717.45	28.78 a 87.39	15.27 a 17.03	

Figura 20. Resultados de Análisis Químico a especies vegetales.

5.2. ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS PLANTAS

En los siguientes incisos se considera que la concentración inicial de los elementos metálicos en la planta de 0 mg/kg debido a que las plántulas utilizadas en el estudio fueron recolectadas de una zona alejada de la influencia de los depósitos de jales.

Se presentan las especies *N. glauca* con la notación NG, uno y dos para denotar que contiene jal de mina La Negra y tres de jal Z. La especie *O. lasiacantha* se denota como OL, uno y tres para denotar el jal del sistema.

5.2.1. Acumulación en la especie *Nicotiana glauca*

En la Figura 20 se observa que la concentración de **As** en NG1 aumenta en la hoja iniciando en 0.002 mg/kg hasta 0.490 mg/kg; así mismo, el tallo presenta una concentración de 0.002 a 0.437 mg/kg. Lo anterior indica una clara tolerancia de la planta para este elemento.

El arsénico en NG2 presente en la hoja, tiene una concentración inicial de 0.66 y alcanza 0.728 mg/kg a los 21 meses, mientras que en el tallo los valores son de 0.002 y llegan a 0.327 mg/kg. Como se observa en este sistema es el tallo el que presenta la mayor acumulación. El comportamiento de NG2 es similar a NG1 con una mayor acumulación en la hoja que en el tallo.

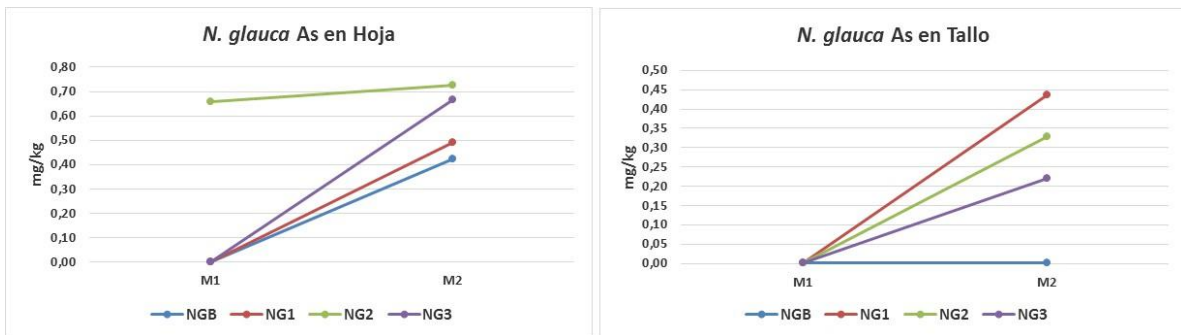


Figura 21. As en hoja y tallo en muestras de *N. glauca*.

El As en NG3 se hace presente en la hoja principalmente con valores que van de 0.002 a 0.667 mg/kg, mientras que en el tallo la variación va de 0.002 a 0.219 mg/kg, siendo la hoja (Figura 21) la parte que más acumula As. Estos resultados, tienen un comportamiento similar a los de los sistemas anteriores, permiten considerar que para el arsénico la planta aplica un

mecanismo de translocación para llevar el elemento en mayor proporción a la hoja.

En el caso de la muestra de referencia NGB se aprecia que hay una acumulación de As en la hoja que pasa de un valor inicial 0.002 a 0.423 mg/kg y en el tallo el valor permanece constante de 0.002 mg/kg; Dado que la muestra NGB es muestra de referencia (sin jal), se asume que el suelo utilizado para el experimento, comprado en Xochimilco, tiene una cierta concentración de arsénico.

En el caso del **Cd** (Figura 22) se observa que hay dos comportamientos diferentes, en las muestras NGB y NG1 sí hay un incremento gradual en la concentración de cadmio tanto en hoja como en tallo, mientras que en las muestras y NG3 hay un aumento en la concentración a los 7 meses para después disminuir a los 21 meses. Este comportamiento se aprecia tanto en la hoja como en el tallo. Para NGB se registra un aumento de 0.886 a 1.284 mg/kg en la hoja, y en el tallo el incremento va de 0.364 a 0.629 mg/kg; en este caso es importante señalar que el suelo utilizado también contiene una concentración importante de Cd y es el que está tomando la planta.

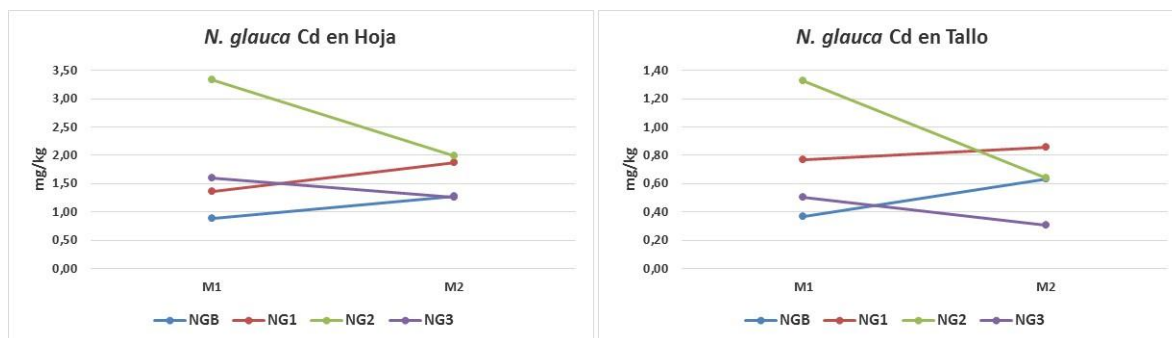


Figura 22. Cd en hoja y tallo en muestras de *N. glauca*.

En el sistema NG1 el aumento va de 1.360 a 1.867 mg/kg de Cd en la hoja y en el tallo de 0.767 a 0.859 mg/kg (Figura 22), siendo similar el comportamiento al de NGB. En NG2 el valor de Cd en la hoja inicialmente es de 3.33 mg/kg y después disminuye a 1.99 mg/kg, y lo mismo sucede en el tallo, primero sube la concentración a 1.329 y después baja a 0.640 mg/kg. Para el caso de la NG3 el Cd se acumula en la hoja a 1.6 mg/kg y después la concentración baja a 1.252 mg/kg; mientras que en el tallo hay un aumento a 0.505 mg/kg y después una disminución a 0.308 mg/kg.

Estos resultados parecen dar la idea que para la acumulación del cadmio la planta tiene un mecanismo cíclico de acumulación y liberación del elemento; lo cual se podría observar si se realizaran un mayor número de muestreos.

Para el **Cu** (Figura 23) se observa que hay tolerancia de la planta por este metal ya que hay un incremento gradual de la concentración en la hoja, sin embargo, en el tallo no hay acumulación y la concentración se mantiene constante a excepción de la muestra NG3, la cual contiene jal Z con condiciones distintas al de la mina La Negra, lo cual hace pensar que en este caso influye la asociación mineralógica presente en los jales ya que el jal Z presenta acidez lo que se corrobora con el pH (Figura 46) bajo del lixiviado.

En la hoja de NG1 se aprecia un incremento (Figura 23) en la concentración del cobre primero a valores de 10.881 mg/kg y después a 52.810 mg/kg; en el tallo de un valor menor a 0.1 mg/kg hasta 12.859 mg/kg. Se puede ver como el Cu al ser considerado un micronutriente la planta lo absorbe en mayor medida que los otros metales.

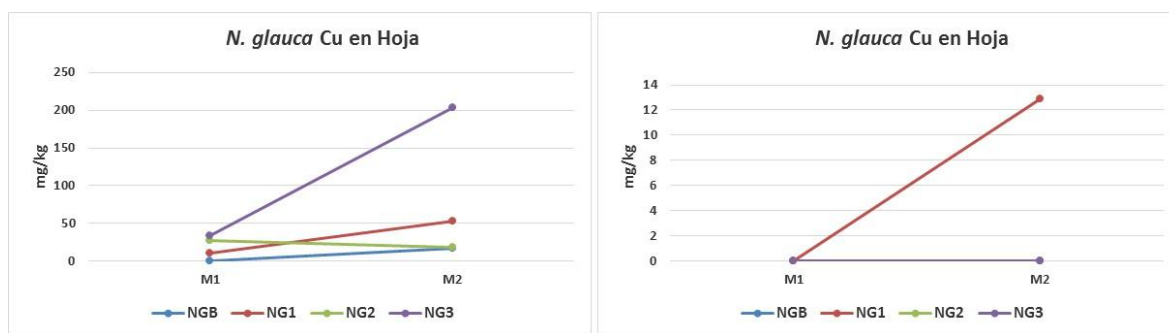


Figura 23. Cu en hoja y tallo en muestras de *N. glauca*.

El Cu en la planta NG2 presenta una concentración en la hoja de 27.84 mg/kg, a los 7 meses y en el muestreo dos a los 21 meses, la concentración disminuye a 18.08 mg/kg, esto puede deberse a la concentración de Cu en el suelo (Figura 32). En el tallo los valores se mantienen inferiores al límite de detección de 0.01 mg/kg. Comparada con NG1 las diferencias presentes son importantes pues los valores en la hoja aumentan y en NG2 disminuyen, mientras que en el tallo permanecen constantes.

El Cu en NG3 presenta un aumento importante en el contenido en la hoja (Figura 23) de 33.91 a 203.920 mg/kg; este metal no presenta valores por

encima de 0.1 mg/kg en el tallo, lo que indica que la movilidad del metal es hacia la hoja. Además, al tener un jal diferente al de La Negra en este sistema, se puede considerar que la composición mineralógica también incluye en la liberación y acumulación del metal cobre por parte de la planta.

La acumulación de **Pb** en todas las muestras (Figura 24) se presenta de forma gradual, aunque se observa que ocurre de manera más lenta que para los otros metales, ya después de iniciado el experimento a los 7 meses no se observa una acumulación significativa en las plantas y es hasta los 21 meses cuando ya se ve con claridad la presencia del metal en las hojas y el tallo. En las muestras con jal de La Negra (NG1 y NG2), se observa cierta acumulación del metal en el tallo, mientras que en la muestra con el jal Z la permanencia del metal en el tallo es menor; esto puede también estar relacionado con la composición mineralógica de ambos jales.

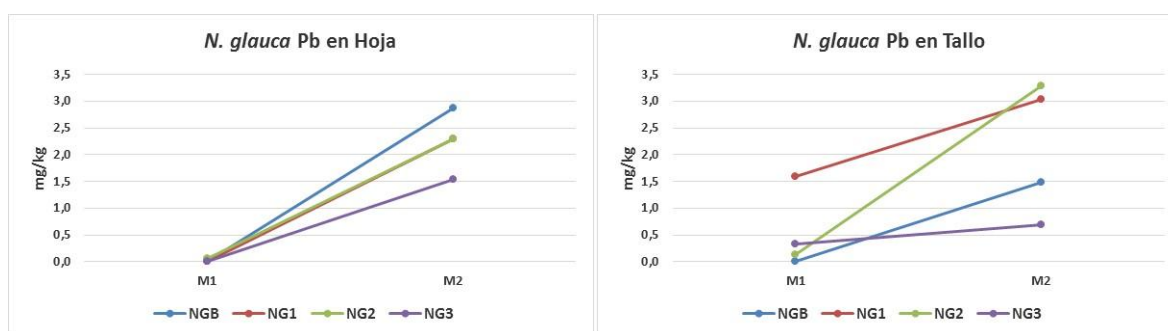


Figura 24. Pb en hoja y tallo en muestras de *N. glauca*

Para el Pb de NG1 la acumulación del metal en el tallo de la planta es de 1.436 mg/kg, ya que va de 1.589 a 3.025 mg/kg (Figura 24). En la hoja la acumulación se manifiesta después de los siete meses pues en este mes la concentración está por debajo del límite de detección y a los 21 meses aumenta a 2.286 mg/kg con lo que se observa una clara absorción mayor en la hoja.

La NG2 presenta valores de plomo en la hoja que van en aumento, en el muestreo de siete meses mostró una concentración de 0.07 mg/kg y después se incrementa hasta 2.3 mg/kg. En el tallo se tiene el mismo comportamiento la concentración aumenta a 0.14 mg/kg y después a 3.3 mg/kg, por lo que una mayor cantidad de metal se acumuló en el tallo; contrario a lo que ocurre en NG1 cuya acumulación es mayor en la hoja.

La presencia de Pb en NG3 se presenta en la hoja con una concentración menor a la acumulada en las muestras con jal de La Negra, esta se mantiene por debajo del límite de detección hasta el muestreo de siete meses y después ya se observa la acumulación de 1.54 mg/kg a los 21 meses así mismo el tallo va de 0.33 a 0.68 mg/kg. En esta muestra la acumulación en el tallo es menor a la acumulada en las hojas.

La concentración de **Zn** en los jales de la mina La Negra es menor comparada con la del jal Z y esto se ve reflejado en la cantidad acumulada por las plantas, siendo mayor en la muestra NG3. En todos los casos se observa que una buena parte del Zn se acumula en el tallo y una mayor parte va a la hoja.

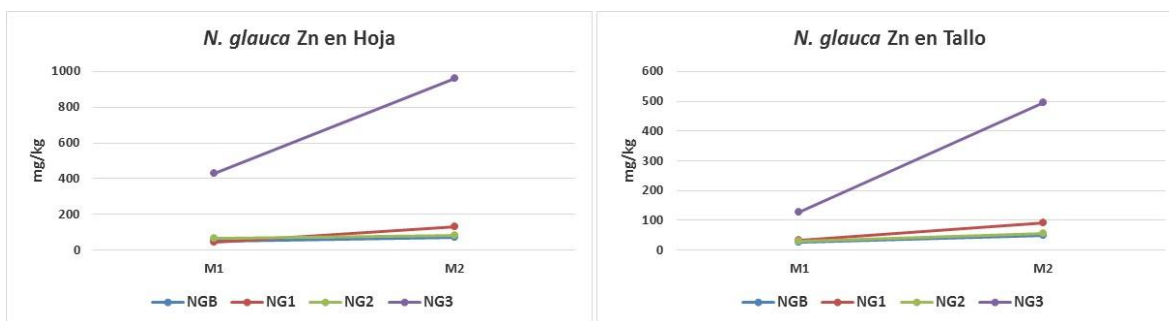


Figura 25. Zn en hoja y tallo en muestras de *N. glauca*.

La concentración del Zn en NG1 es apreciable en todas las partes de la planta analizadas, ya que se observa en la planta (Figura 25) un aumento en la concentración primero a 43.530 mg/kg y después a 133.610 mg/kg en la hoja, siendo el aumento en el tallo primero a 32.810 mg/kg y después a 93.090 mg/kg. Estos resultados comprueban la tolerancia de las plantas respecto al Zn presente en el suelo y el jal debido a que es considerado un micronutriente.

En NG2 aumenta la concentración tanto en la hoja (Figura 25) como en el tallo siendo la acumulación mayor en el tallo pues pasa de 30.45 a 54.49 mg/kg y los valores en la hoja son de 67.1 a 82.6 mg/kg, apreciando que la acumulación en ambas partes es importante.

La NG3 acumuló una mayor concentración de zinc en las partes aéreas de la planta (Figura 25) comparada con las muestras NG1 y NG2. Los valores en la hoja se incrementaron de 427.66 a 961.87 mg/kg y en el tallo de 127.5 a 495.2 mg/kg acumulando una mayor cantidad del metal en la hoja sin

demeritar que también en el tallo el contenido de metal es mucho más alto que en los otros sistemas adjudicando esto a la composición del jal Z.

5.2.2. Acumulación en la especie *Opuntia lasiacantha*

En el estudio realizado por Rodríguez (2010) la especie *Opuntia lasiacantha* se clasificó como especie fitoestabilizadora debido a que los metales permanecen en la raíz y prácticamente es nula la acumulación en la penca.

Para este experimento se observaron los siguientes resultados:

El As (Figura 26) no se acumula en la penca de ninguno en los tres sistemas, OLB, OL1 y OL3, manteniéndose constante la concentración en 0.002 mg/kg. En la raíz tampoco se tiene presencia de arsénico, salvo en la muestra OL1 en la que se muestra un ligero incremento al termino del experimento (21 meses).

El As no se hace presente en la penca OL1 (Figura 26) a corto plazo, ya que permanece constante en 0.002 mg/kg y en la raíz la concentración aumenta de 0.002 a 0.479 mg/kg pero después de un tiempo significativo (21 meses) Estos datos confirman el señalamiento que hizo Rodríguez (2010) que esta especie vegetal mantiene el As en la raíz.

La planta OL3 tampoco presenta absorción en ninguna de las partes analizadas (Figura 26) manteniéndose en un valor de 0.002 mg/kg.

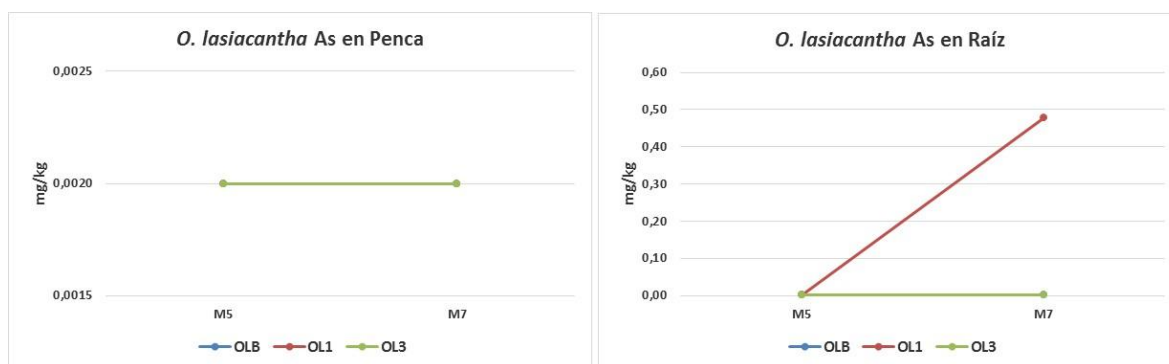


Figura 26. As en penca y raíz en muestras de *O. lasiacantha*.

Para el **Cd**, a diferencia del arsénico, la planta sí muestra afinidad ya que se observa la presencia de este elemento en la penca y en la raíz, aunque en menores concentraciones comparado con la *Nicotiana glauca*.

La planta OL1 presenta un incremento en la penca primero a 0.65 y después a 0.77 mg/kg de Cd y en la raíz aumenta de 0.468 a 0.782 mg/kg; como se observa (Figura 27) la planta absorbe el metal contenido en el suelo y lo lleva hasta la penca. Este metal está presente en ambas partes muestreadas prácticamente en la misma proporción en penca y raíz.

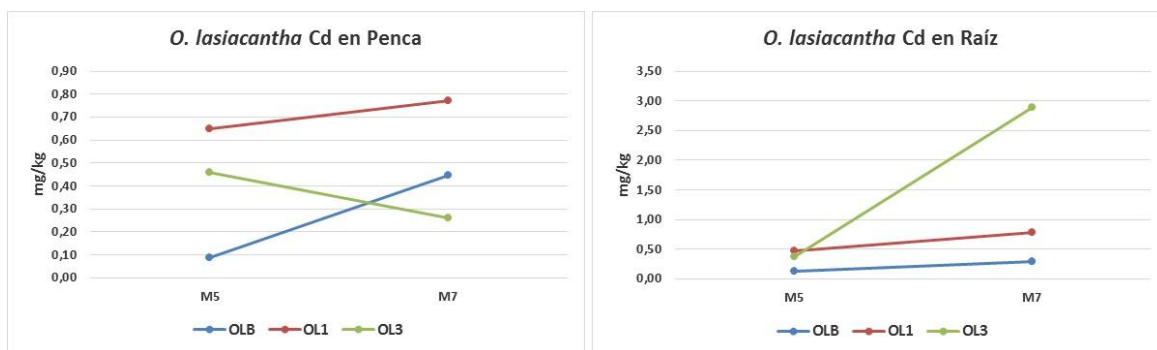


Figura 27. Cd en penca y raíz en muestras de *O. lasiacantha*.

El sistema OL3 muestra disminución en la concentración de la penca iniciando en un valor de 0.461 a 0.259 mg/kg de Cd; mientras que en la raíz presenta 0.367 a 2.891 mg/kg; indicando que es en la raíz donde se concentra la mayor cantidad del metal siendo este el comportamiento esperado para esta especie.

El **Cu**, al igual que él As, no se acumula en la penca ni en la raíz y es solo en el sistema OL1 que presenta un incremento en la raíz, al finalizar el experimento a los veintiún meses. En la penca de OLB, OL1 y OL3 (Figura 28) no hay acumulación manteniéndose por debajo del límite de detección. La concentración en la raíz de OL1 Y OL3 se mantiene constante a lo largo del experimento en un valor menor a 0.1 mg/kg.

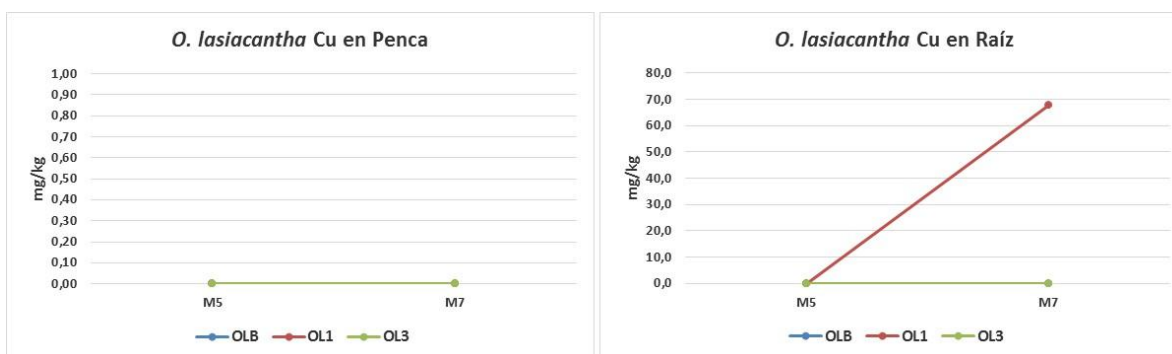


Figura 28. Cu en penca y raíz en muestras de *O. lasiacantha*.

Es en el sistema OL1 que la raíz acumula Cu considerable pues inicia en un valor inferior al límite de detección hasta 67.66 mg/kg al término del experimento.

El **Pb** es asimilado por la planta (Figura 29) desde los primeros meses del experimento. En la planta OLB la acumulación se parecía en mayor medida en la raíz ya que la concentración pasa de 0.105 a 8.574 mg/kg; en la penca se aprecia acumulación hasta los veintidós meses iniciando en un valor por debajo del límite de detección hasta 7.232 mg/kg.

En el sistema OL1 el plomo aumenta tanto en la penca como en la raíz. En la penca inicia con un valor inferior al límite de detección (0.05 mg/kg) y después aumenta a 7.65 mg/kg; en la raíz inicia en un valor de 0.61 mg/kg y llega hasta 9.22 mg/kg; como se observa (Figura 29) que al principio hay cierta resistencia a acumular el metal en la penca y al paso del tiempo esta resistencia cede probablemente por la concentración de este metal en el suelo, lo que se ve en la concentración en la penca al cierre de los muestreos; por el contrario desde los primeros meses la raíz acumula el metal siendo esta la que presenta la mayor cantidad de plomo.

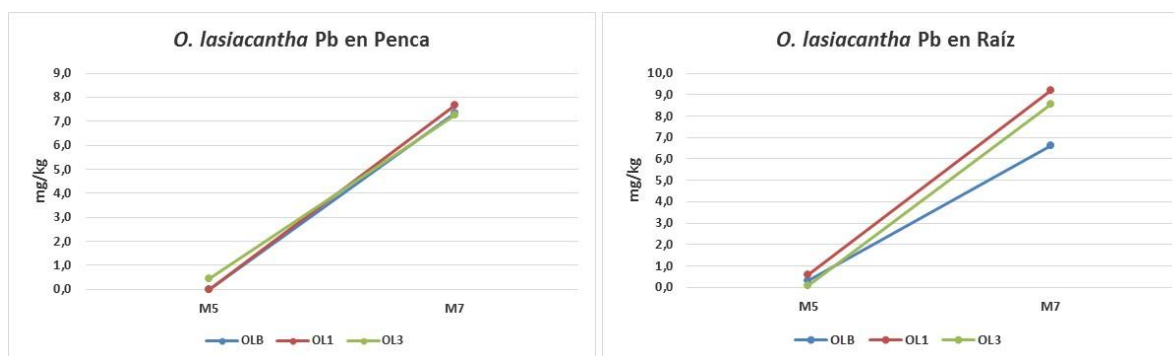


Figura 29. Pb en penca y raíz en muestras de *O. lasiakantha*.

Los valores de Pb en la penca de OL3 (Figura 29) son de 0.42 a 7.245 mg/kg y la raíz 0.105 a 8.574 mg/kg. Estos resultados muestran que particularmente para el caso del plomo la planta sí conduce el metal a su parte aérea.

Dado que en los tres sistemas la concentración se presenta tanto en penca como en raíz no se puede considerar a la especie estabilizadora para este metal.

En el caso del **Zn** la planta muestra concentraciones considerables, en comparación con los otros metales, desde el inicio del experimento (Figura 30); acumulando tanto en penca como en raíz.

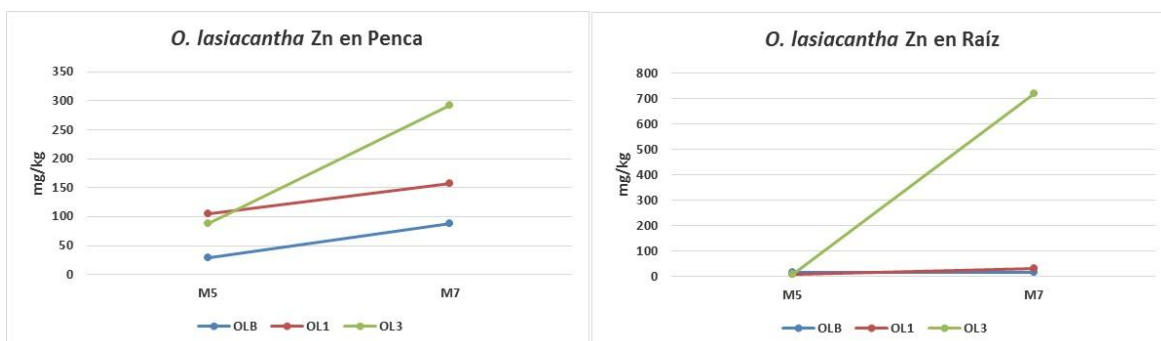


Figura 30. Zn en penca y raíz en muestras de *O. lasiacantha*.

En el sistema OLB el Zn se acumula en la penca de 28.78 a 87.39 mg/kg y en la raíz la concentración es menor de 15.27 a 17.03 mg/kg; aunque el suelo utilizado como sustrato tiene una concentración de zinc al inicio del experimento, es destacable es que es la penca acumula en mayor proporción que la raíz, lo que indica la selectividad de la especie por ciertos metales en función de la concentración.

En el sistema OL3 (Figura 30) la mayor acumulación la tuvo en la raíz a los veintidós meses con concentraciones de 8.8 a 717.45 mg/kg de zinc; sin embargo el metal también se acumuló en la penca de 87.8 a 291.9 mg/kg.; como se aprecia la mayor acumulación a los 7 meses es en la penca probablemente por la necesidad del metal para su crecimiento ya que al concluir el experimento la mayor acumulación la presenta la raíz que al principio presento acumulación menor.

5.3. COMPORTAMIENTO DE LOS METALES PESADOS EN EL SISTEMA SUELO-JAL DE LA *NICOTIANA GLAUCA*

En este apartado se hace una descripción del comportamiento que tuvieron los metales pesados en el sistema conformado por la capa de jal y la capa de suelo, ya que de acuerdo con lo señalado por Katagiri (2012), la planta influye en la transferencia de los metales contenidos en el jal hacia el suelo de recubrimiento lo cual se observó en las presas de jales de

La Negra. Por otro lado, la interacción del sistema con el agua de riego que se utilizó durante todo el experimento para promover el crecimiento de las plantas, también tiene un efecto sobre la transferencia de los metales del jal al suelo y viceversa.

5.3.1. Sistema *Nicotiana glauca* blanco

La caracterización del suelo utilizado para el experimento se aprecia en la Figura 31, que como ya se mencionó fue comprado en Xochimilco, tenía inicialmente concentraciones de As y metales pesados lo que ocasiono que las plantas utilizadas como referencia (NGB y OLB) acumularan estos elementos.

El As presente en el suelo disminuyó de 167.33 a 0.57 mg/kg, al igual que el Cd que pasó de 44.96 a 0.07 mg/kg y el Cu que prácticamente se mantuvo en los mismos valores de 31.94 a 32.59; sin embargo el Pb y el Zn experimentaron un incremento en el suelo ya que aumento de un valor inferior al límite de detección a 15.65 mg/kg, en el Pb y el Zn de 94.75 aumento a 160.44 mg/kg. Como se aprecia, el contenido

inicial del suelo permitió la acumulación en las plantas.

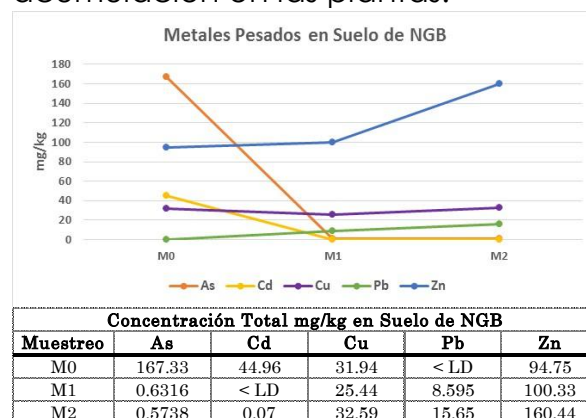
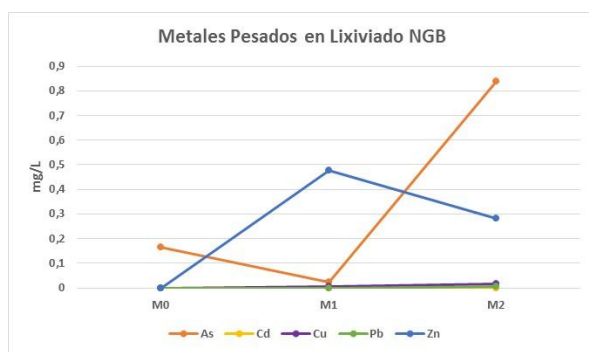


Figura 31. Metales presentes en el suelo de *N. glauca* blanco.

El lixiviado obtenido del riego con agua tiene valores iniciales menores al límite de detección para todos los metales (Figura 46) y con excepción del arsénico que presenta un valor inicial de 0.19 mg/kg.



Concentración Total mg/L en Lixiviado de NGB					
Muestreo	As	Cd	Cu	Pb	Zn
M0	0.1656	< LD	< LD	< LD	< LD
M1	0.0234	< LD	0.0042	< LD	0.476
M2	0.8389	< LD	0.0151	0.0061	0.2831

Figura 32. Metales presentes en Lixiviado de *N. glauca* blanco.

En general las concentraciones se incrementan al final del experimento; el As a 0.84 mg/L, el Cd se mantiene en un valor menor

al límite de detección, Cu 0.01 mg/L, Pb 0.006 mg/L y el Zn 0.28 mg/L (Figura 32). Estas concentraciones muestran que las

interacciones que ocurren en el suelo tienden a solubilizar los elementos contenidos en él.

5.3.2. Sistema *Nicotiana glauca* 1

La tendencia del As en el suelo de este sistema es a disminuir (Figura 33) ya que la concentración inicial baja significativamente de 167.33 a 0.38 mg/kg, y parte de este arsénico está siendo acumulada por la planta (Figura 21). Sin embargo, esta disminución en la concentración presente en el suelo, también se puede asociar con el aumento de As en el jal ya que se observa un incremento en la concentración del jal de 7,434 a 11,196.40 mg/kg, esto se debe a la especiación química del elemento.

El Cd está presente de manera natural en el suelo utilizado ya que muestra una concentración de 44.96 mg/kg; sin embargo, éste es acumulado por la planta (Figura 22) y la concentración en el suelo disminuye por debajo del límite de detección en los muestreos de siete y veintiún meses; y esto es congruente porque en el jal este elemento está insoluble (Figura 33). Por otro lado, la concentración de Cd en el jal baja de 79.60 a 38.72 mg/kg y esto se puede explicar debido a que la planta está liberando el elemento de los jales y lo lleva a su parte aérea.

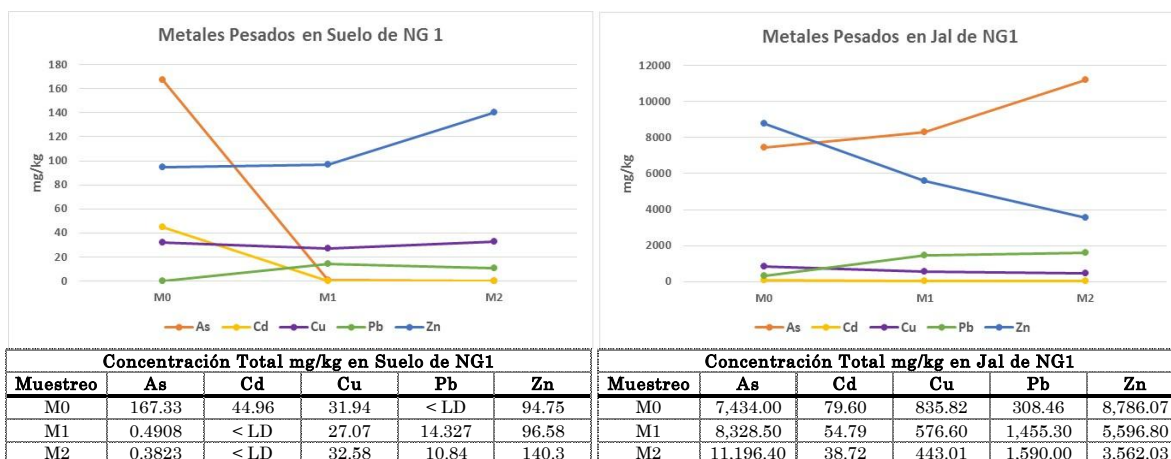


Figura 33. Metales presentes en suelo y jal de *N. glauca* 1.

Aunque en la Figura 33 no es apreciable la movilidad del metal en el suelo, con la disminución de la concentración de cadmio en el jal se justifica la teoría respecto a la capacidad de la planta para movilizarlo ya que en la

gráfica del lixiviado (Figura 34) se aprecia que la concentración soluble en el primer muestreo es menor al límite de detección y para los siguientes muestreos el valor se conserva por debajo de 0.05 mg/L lo que indica que la presencia de Cd en el lixiviado es mínima y la interacción es entre el jal suelo y planta.

El Cu en el suelo (Figura 33) propiamente se mantiene en los mismos niveles a través del tiempo ya que inicialmente en el suelo se tienen 31.94 mg/kg, a los siete meses se tienen 27.07 mg/kg y después llega hasta una concentración final de 32.58 mg/kg lo que no indica una clara interacción del suelo para transportar el cobre hacia la planta, pues prácticamente se mantiene constante. En el jal la concentración disminuyen gradualmente, al inicio se tienen 835.82 mg/kg, a los siete meses baja a 576.60 mg/kg y finalmente a los veintidós meses se tienen 437.38 mg/kg. Esto es congruente con la explicación anterior ya que la concentración de Cu en el suelo se mantiene prácticamente constante y la planta sí está acumulando Cu en las hojas (Figura 23).

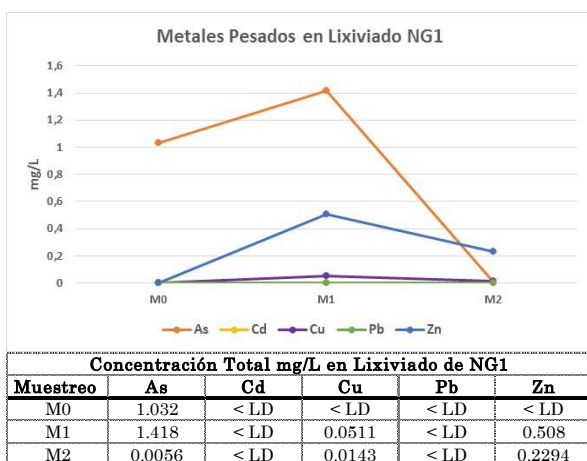


Figura 34. Metales presentes en Lixiviado de *N. glauca* 1.

Por otro lado en la gráfica de lixiviado obtenido de este sistema (Figura 34), la concentración de Cu va de un valor inicial por debajo del límite de detección a 0.051 mg/L en el muestreo intermedio y 0.014 mg/L al final, lo que indica que la planta está ayudando a la liberación de este elemento. Esta solubilidad del Cu, al igual que la del cadmio, se puede atribuir a la actividad de los microorganismos en la planta.

En el suelo la concentración de plomo aumenta (Figura 33) iniciando en un valor menor al límite de detección al inicio de la prueba hasta un valor de 14.327 mg/kg a los 7 meses, y de 10.84 mg/kg a los 21 meses. Sin embargo, la concentración del Pb en el jal también muestra un incremento iniciando en 308.46 a 1590.00 mg/kg al concluir el experimento. Este fenómeno resulta difícil de explicar porque en ambos casos, tanto suelo como jal, la concentración aumenta. Y en la planta también hay un aumento en la concentración de plomo. Por otro lado, en el lixiviado

(Figura 34) no hay presencia de plomo soluble ya que las concentraciones están por debajo del límite de detección. Esto indica que la fase mineral del Pb presente en los jales (PbS) es altamente insoluble.

El Zn en el suelo de NG1 presenta un incremento (Figura 33) de 94.75 a 140.30 mg/kg, el cual puede explicarse porque se observa un fenómeno de transferencia del Zn contenido en el jal hacia el suelo. El Zn en el jal está disminuyendo ya que pasa de 8786.07 a 3562.03 mg/kg. Se puede asumir que la planta libera el Zn de los jales, lo lleva al suelo y de ahí lo toma para acumularlo en su estructura aérea. En el lixiviado el Zn está en forma insoluble (<L.D.) al inicio del experimento y posteriormente la solubilidad es de 0.229 mg/L (Figura 34); en este caso se puede considerar que la planta está contribuyendo a la disponibilidad de Zn.

5.3.3. Sistema *Nicotiana glauca* 2

El As está presente en el suelo del sistema (Figura 35) con un valor inicial de 167.33 mg/kg disminuyendo hasta 0.5 mg/kg y esto se explica al observar que si hay concentración de este metal en la planta (Figura 21). Sin embargo la concentración de As en el jal aumenta de 7434 a hasta 11732 mg/kg, lo que es similar a lo ocurrido en la muestra NG1. En este caso también se considera que puede haber una transferencia de arsénico del suelo al jal debido al riego con agua.

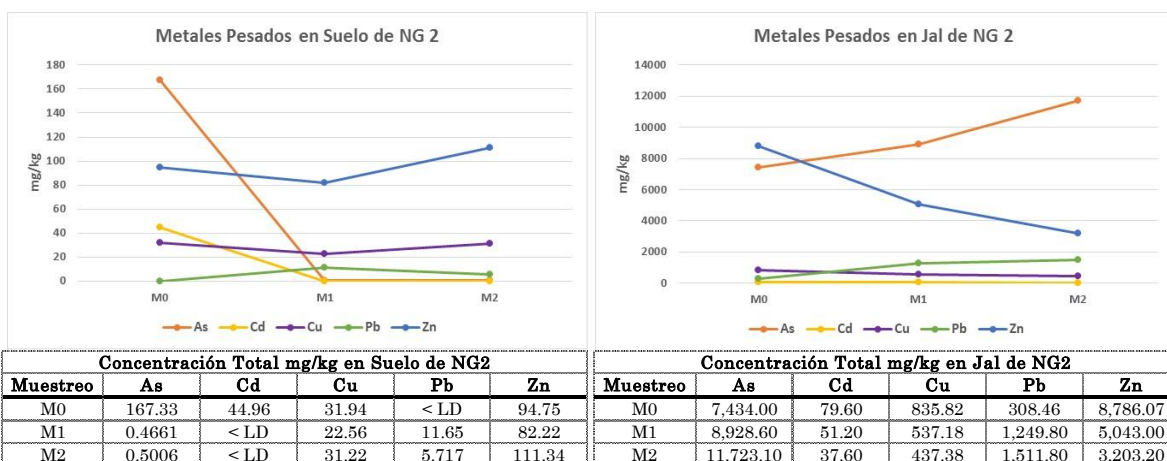


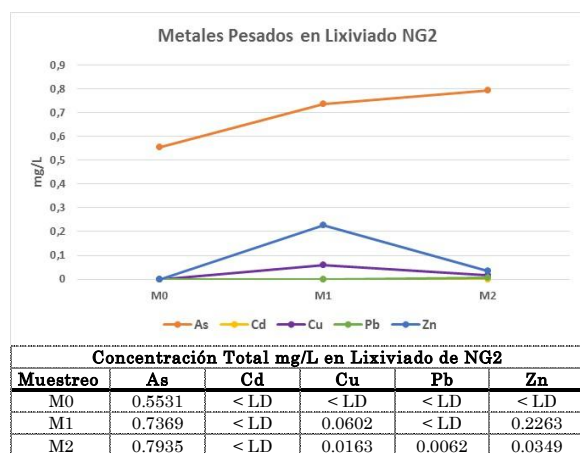
Figura 35. Metales presentes en Suelo y Jal de *N. glauca* 2.

En el lixiviado el As está en forma soluble al inicio del experimento ya que tiene una concentración inicial de 0.5531 mg/L, y posteriormente se

mantiene soluble puesto que hay un incremento en la concentración a 0.7935 mg/L y se mantiene hasta los 21 meses (Figura 36).

El Cd está presente inicialmente en el suelo con una concentración de 44.96 mg/kg en el primer muestreo y posteriormente disminuye a valores menores a 0.05 mg/kg. Esto indicando la interacción de la planta suelo y jal, ya que la plata acumula inicialmente el cadmio contenido en el suelo, pero posteriormente se observa que hay una transferencia del elemento a partir del jal directamente a la planta porque las concentraciones en el jal se reducen (Figura 35) de 79.60 a 37.60 mg/kg.

En el lixiviado (Figura 36) se observa que el cadmio se mantiene por debajo del límite de detección; al no estar presente en el lixiviado indica que no está soluble.



Los valores de Cu en el suelo (Figura 35) van de 31.94 mg/kg al inicio del experimento para mantenerse a los 21 meses en un valor de 31.22 mg/kg, por lo que prácticamente permanece constante y se puede apreciar que en la planta disminuye la concentración de Cu (Figura 23).

Figura 36. Metales presentes en Lixiviado de *N. glauca* 2.

En el jal, se observa una reducción en el contenido inicial pasando de 835.82 a 437.38 mg/kg, esto puede deberse a que la planta ayuda a liberar parte del cobre en los jales y lo lleva a su parte aérea.

En el lixiviado (Figura 36) este metal pasa de un valor inicial menor al límite de detección hasta 0.06 mg/L a los 7 meses y al finalizar el experimento a los 21 meses el valor disminuye a 0.016 mg/L con lo que se aprecia una ligera movilidad del cobre a partir de que la planta interactúa con el suelo y el jal.

El Pb en el suelo (Figura 35) al inicio del experimento está por debajo del límite de detección y en el primer muestreo la concentración aumenta a

11.65 mg/kg a los 7 meses, y después hay una disminución a 5.72 mg/kg a los 21 meses; la planta presenta acumulación del metal (Figura 24) y lo toma del suelo. Sin embargo, al igual que en la muestra NG1, en el jal se presenta un aumento en la concentración que pasa de un valor inicial de 308.46 a 1512 mg/kg, sin embargo en el lixiviado (Figura 36) no se aprecia solubilidad del metal ya que la concentración se mantiene menor al límite de detección. Esta baja presencia del metal en el lixiviado debe estar asociada a la estabilidad de la fase mineral presente en el suelo.

En NG2 la concentración de Zn en el jal disminuye (Figura 35) y los valores van de 8786 hasta 3203 mg/kg; y es el mismo comportamiento que tiene el suelo donde el Zn reduce su presencia de 94.75 mg/kg al inicio del experimento hasta 82.22 mg/kg a los 7 meses y 111.34 mg/kg a los 21 meses. La influencia de la planta en el suelo hace que el Zn se libere haciéndolo más soluble y sea más fácilmente asimilado por ésta (Figura 25), ocurriendo el mismo fenómeno que en NG1. En el lixiviado la presencia de Zn está por debajo del límite de detección al inicio y a los siete meses alcanza 0.226 mg/L y a los 21 meses de 0.035 mg/kg. En este caso es clara la influencia de la planta en la liberación y transporte del elemento.

5.3.4. Sistema *Nicotiana glauca* 3

En el suelo de este sistema (Figura 37) el As disminuye, los valores van de 167.33 a 0.43 mg/kg. De ahí que el As presente en la hoja aumente (Figura 21), sin embargo el jal también presenta una disminución importante de 2973.2 a 3.7 mg/kg. Esta baja en la concentración se debe a que cierta parte de As es moviliza hacia el lixiviado (Figura 38) pues la concentración soluble aumenta de 0.186 a 14.85 mg/L.

Para el Cd en el suelo (Figura 37) su concentración disminuye de 44.96 a 8.26 mg/kg, sin embargo el contenido del metal en el jal presenta un aumento de un valor inferior al límite de detección hasta 82.94 mg/kg a los 7 meses, disminuyendo a 30.25 mg/kg a los 21 meses debido a que hay una mayor liberación del metal en el jal, sin que este tenga presencia en la planta (Figura 22). Este fenómeno puede deberse también al transporte de cadmio en forma sólida por arrastre del agua de riego. En el lixiviado (Figura 38) se observa que sí hay presencia de cadmio soluble, a diferencia del jal de La Negra; se aprecia una mayor presencia del metal a los 7 meses pues los valores van de menor al límite de detección a 4.28 mg/L,

finalizando a los 21 meses con un valor de 2.12 mg/L, por lo que el Cd tiende a liberarse por la acción de la planta.

El contenido de Cu en el suelo presenta un aumento de 31.94 a 75.57 mg/kg, mismo aumento que se ve reflejado en la acumulación que muestra la planta en la hoja (Figura 23); así mismo el incremento en el suelo se relaciona con la baja en la concentración presente en el jal (Figura 37) pues pasa de 3488 a 345.4 mg/kg. Esto explica la movilidad del Cu a partir del jal y suelo hacia las partes aéreas de la planta y una parte al lixiviado (Figura 38) cuyo contenido de Cu soluble aumenta de un valor menor al límite de detección hasta 137.62 mg/L a los 7 meses y finaliza con 11.92 mg/L a los 21 meses, se aprecia una mayor movilidad del Cu en los primeros 7 meses.

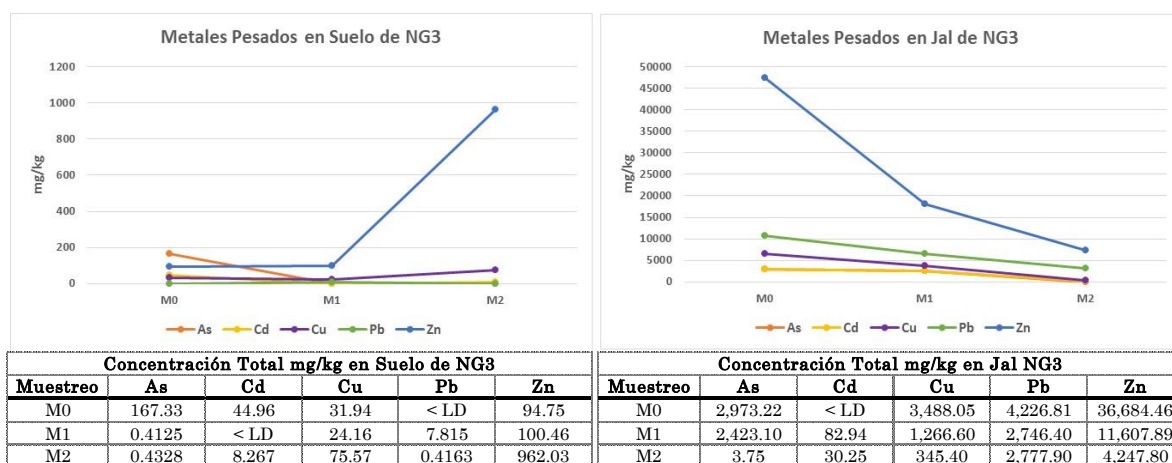
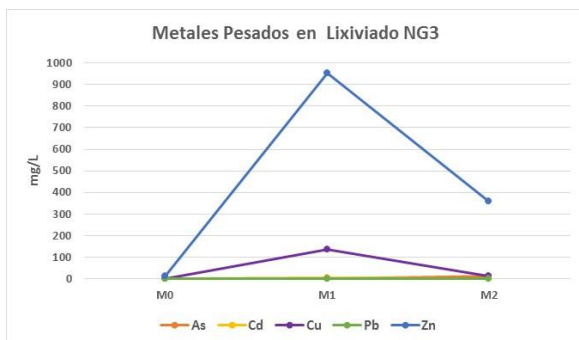


Figura 37. Metales presentes en Suelo y Jal de *N. glauca* 3.

El Pb en el lixiviado (Figura 38) se mantiene en una concentración menor al límite de detección; sin embargo la concentración del metal en el jal (Figura 37) disminuye de 4226.81 a 2777.9 mg/kg, apreciándose un aumento en el muestreo intermedio pasando de un valor por debajo del límite de detección hasta 7.82 mg/kg disminuyendo posteriormente hasta 0.42 mg/kg; esta transferencia de plomo del jal

al suelo, se justifica porque en la planta el metal se está acumulando en las partes aéreas (Figura 24). En el sistema NG3 se puede apreciar claramente la interacción de la planta para liberar el plomo y trasladarlo a la planta.



Concentración Total mg/L en Lixiviado de NG3					
Muestreo	As	Cd	Cu	Pb	Zn
M0	0.186	< LD	< LD	< LD	13.02
M1	0.028	4.288	137.62	< LD	951.90
M2	14.85	2.1226	11.92	< LD	359.90

Figura 38. Metales presentes en Lixiviado de *N. glauca* 3.

En cuanto al Zn en el suelo (Figura 37) se presenta un aumento de las concentraciones que van de 94.75 a 962.03 mg/kg, con ello se ve la clara interacción de la planta con el suelo y con el jal, ya que la concentración de este último baja de 36684 a 4247.8 mg/kg. La movilidad del Zn se observa también en el lixiviado (Figura 38) ya que aumenta de 13.02 a 359.9 mg/L pasando por un valor intermedio de 951.9 mg/L lo que nos indica que la movilidad del elemento es mayor en los primeros meses del experimento. Al comparar esta muestra con las que contienen jal de La Negra, se observa que hay una mayor transferencia del Zn debido a que las concentraciones en el jal también son mayores.

5.4. COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE *OPUNTIA LASIACANTHA*

5.4.1. Sistema de *Opuntia lasiacantha* blanco

El comportamiento de este sistema es la referencia para *O. lasiacantha* ya que está compuesto solo del suelo y la especie vegetal.

El contenido de As en el suelo de OLB (Figura 39) disminuye de 167.33 mg/kg a 0.84 mg/kg. Sin embargo la planta no muestra incremento en la concentración del metal (Figura 26) en la penca ni en la raíz, y por otro lado en el lixiviado (Figura 40) la concentración disminuye de 0.19 hasta 0.005 mg/kg, a los 7 meses manteniendo ese valor hasta los 21 meses. La *Opuntia* experimenta el mismo fenómeno que ocurre en la *Nicotiana* que es un aumento en la concentración de As, pero que no se puede explicar dado que el suelo no está en contacto con el jal.

El suelo de este sistema (Figura 39) inició con una concentración de Cd de 44.96 mg/kg, y al concluir el experimento, a los 21 meses, se redujo hasta un

valor inferior al límite de detección, esto puede atribuirse a la interacción de la planta con el suelo ya que en planta aumentó la concentración del metal en la parte aérea y en la raíz (Figura 27). Sin embargo en el lixiviado no hay presencia de cadmio soluble ya que las concentraciones son inferiores al límite de detección (Figura 40); esto indica que la planta libera el Cd para trasladarlo a la planta.

La concentración de Cu en el suelo de OLB disminuye de 31.94 a 26.07 mg/kg, pero la planta no presenta un incremento en el contenido de Cu (Figura 28). Sin embargo, en el lixiviado la concentración aumenta de un valor menor al límite de detección hasta 0.13 mg/L a los 7 meses y al finalizar el experimento con 0.009 mg/L, quizá el lixiviado sea el medio por donde se está perdiendo el cobre que no toma la planta.

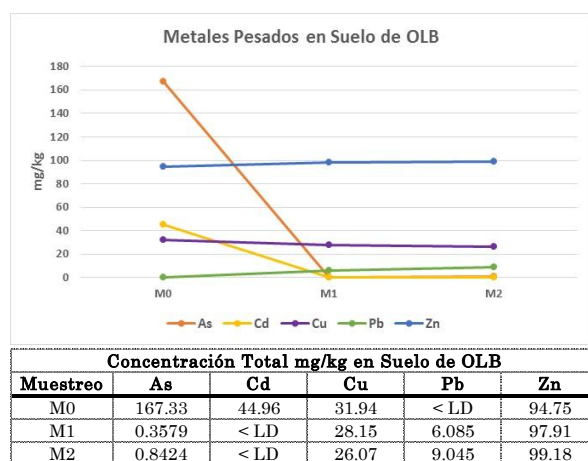


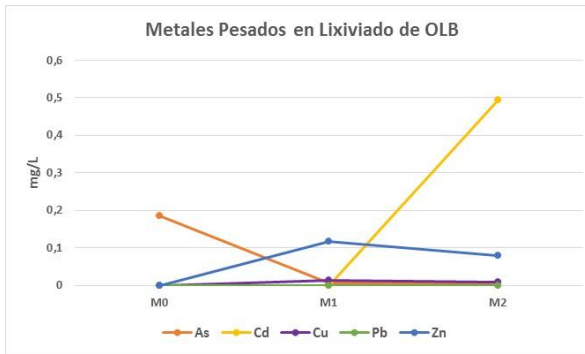
Figura 39. Metales presentes en suelo de *O. lasiacantha* blanco.

El Pb en el lixiviado está insoluble (Figura 40) ya que se mantiene a

En cuanto al Zn en el suelo de OLB (Figura 40) se aprecia un aumento de 94.75 a 99.18 mg/kg, y se asume que la planta ayuda a liberar el metal pues presenta un aumento en la concentración tanto en la penca como en la raíz (Figura 30). También la fracción soluble aumenta en el lixiviado (Figura 40) ya que pasa de un valor menor al límite de detección

lo largo del experimento en un valor menor al límite de detección, lo cual es congruente con la concentración total de plomo en el suelo que también está por debajo del límite de detección. Sin embargo, en el suelo se observa un incremento en la concentración que va de un valor inferior al límite de detección alcanzando 9.05 mg/kg a los 21 meses.

a 0.12 mg/L en el muestreo a los 7 meses y al finalizar el experimento la cantidad de Zn es de 0.08 mg/L, lo que indica que hay una movilidad mayor en los primeros meses.



Concentración Total mg/L en Lixiviado de OLB					
Muestreo	As	Cd	Cu	Pb	Zn
M0	0.186	< LD	< LD	< LD	< LD
M1	0.0056	< LD	0.0129	< LD	0.1168
M2	0.0055	0.4935	0.0089	< LD	0.0802

Figura 40. Metales presentes en Lixiviado de *O. lasiacantha blanco*.

5.4.2. Sistema de *Opuntia lasiacantha* 1

En la muestra OL1 ya el suelo tiene contacto con jal y se observa una reducción en el As del suelo de 167.3 a 0.74 mg/kg, lo que se puede relacionar con el aumento que la planta presenta un aumento en la raíz (Figura 26). Así mismo quizá debido a la actividad bacteriana de la planta y su interacción con el jal (Figura 41) el As se incrementa de 6767 mg/kg a 17685 mg/kg en el jal. Sin embargo, la movilidad del arsénico no es tan notable en el lixiviado ya que la fracción soluble disminuye ligeramente de 0.28 a 0.01 mg/L.

El Cd (Figura 41) disminuye en el suelo de 44.96 mg/kg a valores por debajo del límite de detección en los posteriores muestreos, esta disminución se asocia con el comportamiento de la especie vegetal que acumula Cd tanto en penca como en raíz (Figura 27). Sin embargo el comportamiento del jal indica que la planta libera el Cd en los primeros siete meses, pues pasa de un valor de 9.96 mg/kg a 118.84 mg/kg y a los veintidós meses disminuye a 57.78 mg/kg. Aun cuando la planta contribuye a liberar el metal en el jal en el lixiviado (Figura 42) no hay presencia de Cd soluble ya que las concentraciones se mantienen constantes, por debajo del límite de detección desde el inicio del experimento.

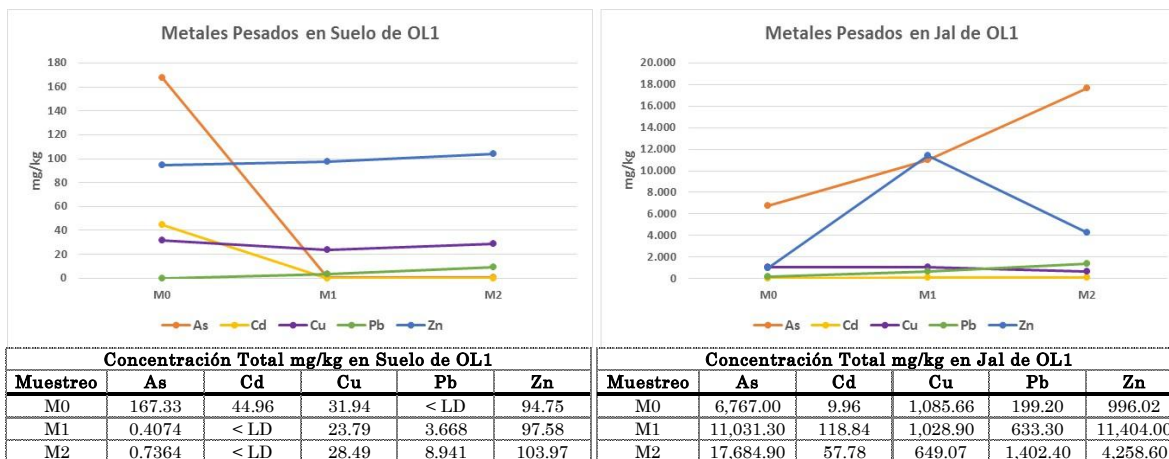


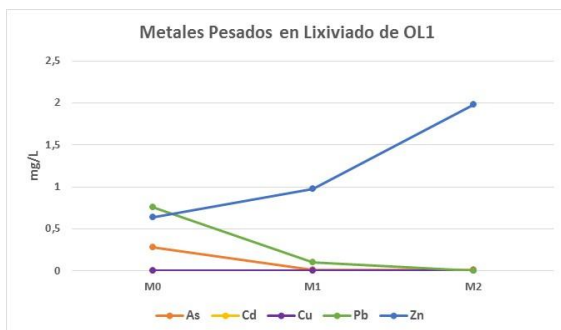
Figura 41. Metales presentes en Suelo y Jal de *O. lasiacantha* 1.

En el suelo la concentración de cobre baja de 31.94 a 28.49 mg/kg, mientras que en la raíz de la planta se observa significativo aumento (Figura 28) por lo que se podría considerar que la planta produce la movilidad del cobre. En el jal (Figura 41) hay una disminución del elemento pasando de 1086 mg/kg a 649 mg/kg por lo que en este caso si se puede señalar que hay un transferencia del jal al suelo y después a la planta. En el lixiviado la fracción soluble se mantiene en valores inferiores al límite de detección (0.005 mg/L).

Nuevamente se observa un incremento en la concentración de Pb tanto en el suelo (Figura 41) como en los jales. En el suelo pasa desde un valor menor al límite de detección a 3.67 mg/kg a los siete meses y 8.94 mg/kg a los veintidós meses, mientras que en el jal aumenta de 199 a 1402 mg/kg. En este caso sí se observa un incremento en la concentración de Pb acumulada por la planta, tanto en la penca como en la raíz (Figura 29). Por otro lado, en este caso particularmente sí hay plomo soluble pues al inicio el lixiviado tiene una concentración de 0.76 mg/L y posteriormente disminuye a un valor menor al límite de detección.

El Zn en OL1 aumenta su concentración en el suelo de 94.75 a 99.18 mg/kg y en el jal los valores van de 996 a 4259 mg/kg. Sin embargo, también en la planta hay acumulación de Zn (Figura 30), esta tendencia tanto en la planta como en el suelo y en

el jal puede asociarse a la contribución de la planta para liberar el Zn ya que en el lixiviado la concentración aumenta iniciando en 0.64 hasta 1.98 mg/L. Una vez liberado el Zn la planta se encarga de trasladarlo a su estructura aérea.



Concentración Total mg/L en Lixiviado de OL1					
Muestreo	As	Cd	Cu	Pb	Zn
M0	0.2831	< LD	< LD	0.7602	0.636
M1	0.0136	< LD	< LD	0.0978	0.9778
M2	0.0107	< LD	< LD	< LD	1.982

Figura 42. Metales presentes en Lixiviado de *O. lasiacantha* 1.

5.4.3. Sistema de *Opuntia lasiacantha* 3

El Zn en el suelo de OL3 (Figura 43), así como en OL1 y OLB, presenta un aumento en la concentración pasando de 94.75 mg/kg a los siete meses hasta 506.98 mg/kg a los veintidós meses, y este comportamiento se asocia a la interacción del suelo con el jal ya que en el jal la concentración disminuye de 34808 a 3967 mg/kg. Esta interacción del sistema se puede apreciar también en el hecho de que la planta acumula cantidades significativas de Zn tanto en la penca como en la raíz (Figura 30) También se observan una fracción de Zn soluble en el sistema ya que en el lixiviado (Figura 44) la concentración aumenta de 3.52 a 121 mg/L.

El Pb en el suelo (Figura 43) presenta nuevamente un incremento en su concentración, de un valor menor al límite de detección hasta 11 mg/kg, esta presencia en el suelo se debe a la liberación del metal a partir del jal pues los valores en el jal van de 4026 a 3081 mg/kg, y esta disminución es apreciable en la acumulación de plomo que se observa en la planta (Figura 29). En el lixiviado (Figura 44) hay un aumento en la fracción soluble, pasa de un valor menor al límite de detección a 0.097 mg/L a los siete meses. Dado que en el agua de riego no se encuentran indicios de este metal (Figura 45), la acumulación de plomo en el agua se debe a su liberación del jal con ayuda de la interacción con la planta.

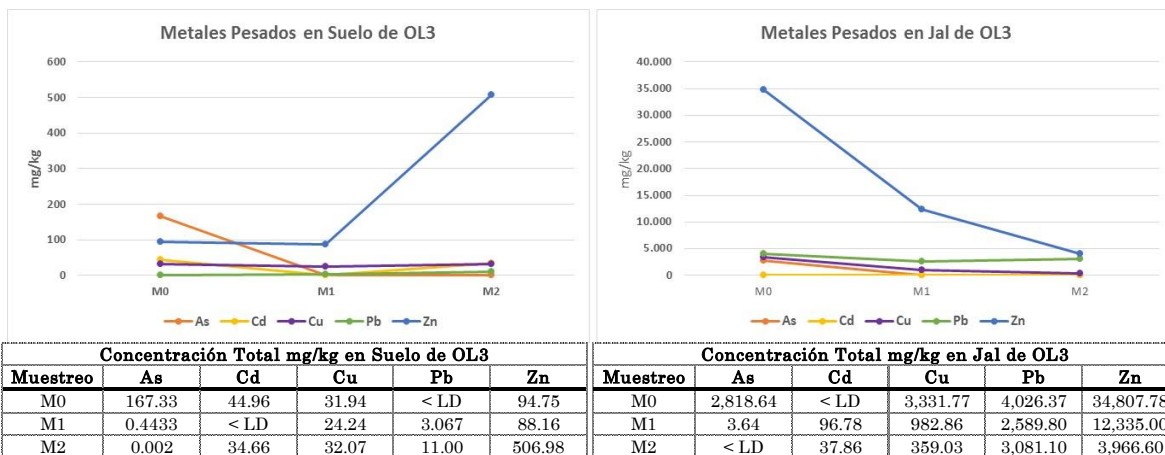


Figura 43. Metales presentes en Suelo y Jal de *O. lasiacantha* 3.

La presencia de Cu en el suelo en OL3 (Figura 43) aumenta muy ligeramente de 31.94 a 32.07 mg/kg, por lo que podría considerarse prácticamente constante, sin embargo, el comportamiento del jal en el sistema indica que la planta permite la liberación del cobre pues disminuye la concentración en el jal de 3332 a 359 mg/kg. En el lixiviado la concentración aumenta iniciando en un valor por debajo del límite de detección hasta 49 mg/L. En el agua de riego se aprecia una concentración de Cu 0.015 mg/L. Y en la plana no se presenta acumulación de cobre.

En el suelo (Figura 43) se aprecia una ligera pérdida de Cd de 45 a 35 mg/kg, comportamiento que se compara con la acumulación del metal en la raíz de la planta (Figura 27). En el jal el valor inicial fue inferior al límite de detección, pasando por un valor intermedio de 96.78 y finalizando con 37.86 mg/kg, y esta variación se puede relacionar con la reducción en la concentración del suelo. La fracción soluble en el lixiviado también aumenta iniciando en un valor menor al límite de detección y llegando a 5.14 mg/L al concluir el experimento (Figura 44). Este metal no tiene presencia en el agua de riego (Figura 45)

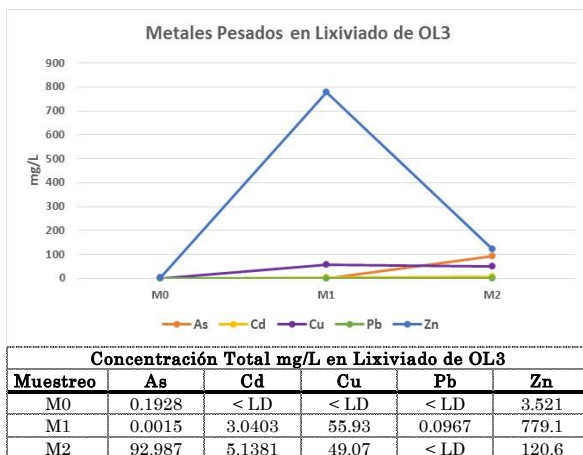


Figura 44. Metales presentes en lixiviado de OL3.

En el suelo (Figura 43) el As disminuye de un valor de 167.33 a 0.002 mg/kg, comportamiento que se asocia con la reducción en el jal que al inicio del experimento presentó 2819 mg/kg hasta el fin con un valor menor al límite de detección. La pérdida del As en el jal se puede relacionar con el hecho de que en el lixiviado (Figura 44) la fracción soluble aumenta de 0.19 mg/L hasta un valor de 92.99 mg/L.

Aunque en el suelo se aprecia la liberación del As, no hay acumulación del elemento en la planta (Figura 26).

5.5. METALES PRESENTES EN AGUA DE RIEGO

Para el riego se utilizó agua potable abastecida a Ciudad Universitaria la cual, al ser caracterizada (Figura 45) presenta una concentración de As, Cu y Zn superior al límite de detección sin sobrepasar los límites máximos permisibles por la secretaria de salud NOM 127 SSA 1994.



Figura 45. Metales pesados presentes en el agua de riego.

Los pH (Figura 46) del agua de riego se mantuvieron en un rango de 6.5 a 7.22 indicando la neutralidad del líquido con que se regaron las especies; por lo que se aprecia que los sistemas que contenían solo suelo se mantuvieron neutros. De manera general el comportamiento de todos los sistemas que contenían jal de la Negra se comportaron en un rango de 7.62 a 6.32.

SISTEMA	M0	M1	M2
	pH	pH	pH
OLB	7.14	6.72	7.37
OL1	7.60	6.48	6.83
OL3	6.4	3.17	2.53
NGB	6.63	6.82	7.27
NG1	7.41	7.57	7.10
NG2	7.11	6.83	7.62
NG3	6.32	2.85	2.50
Agua riego	7.22	6.99	6.5

Figura 46. pH en lixiviados y agua de riego.

Sin embargo para los sistemas que contenían jal Z presentaron un comportamiento inicial en el mismo orden que los otros sistemas pero al transcurrir el experimento se observó que para OL3 el pH bajo a 3.17 a los 7 meses y hasta 2.53 a los 21 meses; por otro lado la NG3 presentó en la toma del primer lixiviado 6.32, a los 7 meses 2.85 y a los 21 meses 2.5 indicando que por la composición mineralógica del jal Z se genera drenaje ácido.

6. CONCLUSIONES

El suelo utilizado contenía arsénico y metales pesados, por lo que las plantas de referencia también presentan acumulación en menores proporciones que las especies que estaban en el sistema jal-suelo.

Al realizar el riego se propició ampliar el horizonte del suelo y el jal por lo que pudo presentarse en el muestreo cierta mezcla ocasionando con ello concentraciones altas para el suelo o de disminución en el jal.

En los sistemas de *O. lasiacantha* el Cd se acumula en penca y raíz comprobando que la planta contribuye a la solubilidad del metal. pues en estudios realizados por Katagiri (2012) se comprueba que el Cd no es soluble en agua indicando que los procesos que realiza la planta hacen al Cd soluble.

El Pb presenta acumulación, a largo plazo, acumulándose en las partes áreas de la *N. glauca* y en la raíz de la *Opuntia*

El Zn para todos los sistemas fue el metal que más se acumuló en las plantas en cualquiera de sus partes por lo que para el caso de *O. lasiacantha* no es estabilizadora de este metal.

El As y Cu presentaron acumulación en la planta a largo plazo por lo que para conocer el comportamiento de estos será necesario analizar en plazos mayores su acumulación para estos metales

La movilidad y retención del As y metales pesados por las plantas estudiadas, hace posible su uso como técnica de estabilización de sitios contaminados con metales y para evitar la dispersión de polvos en las presas de jales

Utilizar especies endémicas permite una colonización pronta de la especie lo que contribuye a la etapa de remediación del cierre de cualquier mina.

REFERENCIAS

- Carrere Ricardo. 2007, El misterioso ciudadano Palán palán (Nicotiana glauca publicación
- 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 (Comisión Nacional del Agua), 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.
- CONAGUA, 2002. Comisión Nacional del Agua. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Cadereyta, estado de Querétaro. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México, D.F.
- Domenech Xavier, Química ambiental del Sistema terrestre. Reverte S.A. Barcelona, España 2006. Pp.119-206
- Domínguez Núñez María Teresa. 2009. Elementos traza en el sistema planta-suelo: implicaciones para la ecología de especies leñosas y la restauración de zonas degradadas. Tesis posgrado. Consejo superior de investigaciones científicas. Sevilla España.
- Esparza Sandoval Sandra, 2010. Distribución geográfica del género *Opuntia* (Cactaceae) en México. Tesis posgrado. Programa multidisciplinario de posgrado en ciencias ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
- FIFOMI (Fideicomiso de fomento minero. 2004 Inventario físico de los recursos minerales del municipio Cadereyta de Montes, Qro., Consejo de recursos minerales. México, D.F
- Galán Huertos Emilio, Romero Baena Antonio. (s/a) Contaminación de suelos por metales pesados. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Sevilla, España

-
- Guerrero Ruiz Antonio. 2005 Clasificación y naturaleza química de los contaminantes. Ed. Fernández. Universidad de educación a distancia Madrid España. 148-159 pp.
- Hernández Zamora Miriam Azucena. 2009. Estudio de la acumulación de plomo y cadmio por *Asphodelus fistulosus* L. y *Brassica juncea* L. para fitorremediar jales. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Biológicas y de la Salud.
- Katagiri Buentello Beatriz Sayuri. 2012. Estudio sobre la disponibilidad de metales en suelos que recubren depósitos de jales. Tesis profesional, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México
- 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* 147,168-175.
- Lottermoser Bernd. 2007. *Mine Wastes. Characterization, treatment and environmental impacts. Second Edition.* Springer. U.S.A.
- Leung H.M, Ye Z.H, Wong M.H. 2006. Survival strategies of plants associated with arbuscular mycorrhizal fungi on toxic mine tailing.; USA. *Chemosphere* 66 (2007) 905915.
- López Domínguez María Guadalupe 2009 Distribución y fitodisponibilidad de metales pesados (Sb, Hg, As) en los jales de la mina de antimonio de Wadley, estado de San Luis Potosí. Tesis doctoral, Programa de posgrado en ciencias de la tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maldonado Julieta, Amezcua Fernando, Mendoza Diana, Sosa Luis, Cano Carmen. 200) Bioremediación de metales de jales mineros con planta. Investigación y ciencia, Facultad de química Universidad de Guanajuato.
- 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, 75-83.
- Minera La Negra, 2008. Video institucional [Disco Compacto]. Aurcana Corporation y Reyna Mining Engineering. México.

-
- 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 sarothroides* Gray) growing on mine tailings in Arizona, USA. *Environmental Pollution* 153 (2008) 1-7
- Pérez Meléndez José Manuel. 2006. El potencial acumulador de Cd y Pb de la *Nicotiana tabacum* L variedad "Criollo 98" cultivada en suelos y sustrato artificial en San Juan y Martínez. Tesis doctoral, Universidad de Alicante. Pinar del Rio Cuba,
- Puga Soraya, Sosa Manuel, De la Mora Antonio, Pineda Carmelo, Jiménez Jorge. 2006. Concentraciones de As y Zn en vegetación nativa cercana a una presa de jales. *J. Environmental Pollution*, Vol. 26 (2): 75-82, 2006
- Rashed M.N. 2010. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *USA. Environmental Pollution* 178 (2010) 739-746
- Rodríguez Cruz Geovanni. 2010. Evaluación del uso de plantas para el cierre de presas de jales. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México
- Ruiz Huerta Esther Aurora y Armienta Hernández María Aurora. 2012. Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Rev. Int. Contam. Ambiental*. 28 (2) 103-117, 2012
- Salas Salmerón Fátima Karmina, 2007. Selección in vitro de plantas tolerantes a plomo para su uso en fitorremediación. Tesis de especialidad. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Sáenz Carmen, 2006 Utilización agroindustrial del nopal boletín de servicios agrícolas de la FAO 162.
- Secretaria de Salud. 1994, Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- SEMARNAT. 2003, NOM-141-SEMARNAT-2003 Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y posoperación de presas de jales.

SEMARNAT. 2005. Manual que establece los Criterios Técnicos para el Aprovechamiento Sustentable de Recursos Forestales no Maderables de Clima Árido y Semiárido. Dirección General del Sector Primario y Recursos Naturales Renovables. México.

Sparks, D. L. (2005) Toxic Metals in the environment: Role of the surfaces. Elements.1, pp. 193-197

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

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