

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”.
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS.



**FITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR Pb Y Zn MEDIANTE
LA ESPECIE VEGETAL *Nicotiana glauca* G.**

POR

LUIS ALBERTO PEREZ ZAVALA.

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA

DICIEMBRE DEL 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS.

FITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR Pb Y Zn MEDIANTE
LA ESPECIE VEGETAL *Nicotiana glauca* G.

TESIS DEL C. LUIS ALBERTO PEREZ ZAVALA QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORIA Y APROBADA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

ASESOR:

DR. MARIO GARCIA CARRILLO.

COASESOR:

DR. HECTOR MADINAVEITIA RIOS.

COASESOR:

ING. LUIS ANGEL BAZALDUA ZURITA.

COASESOR:

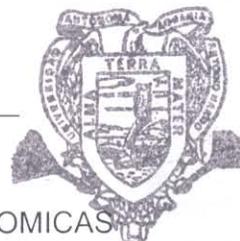
ING. JOEL LIMONES AVITIA

MC. VICTOR MARTINEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONOMICAS

TORREÓN, COAHUILA.

Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas
DICIEMBRE DE 2008



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS.

FFITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR Pb Y Zn
MEDIANTE LA ESPECIE VEGETAL *Nicotiana glauca* G.

TESIS DEL C. LUIS ALBERTO PEREZ ZAVALA QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORIA Y APROBADA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

PRESIDENTE:

DR. MARIO GARCIA CARRILLO.

VOCAL:

DR. HECTOR MADINAVEITIA RIOS.

VOCAL:

ING. LUIS ANGEL BAZALDUA ZURITA

VOCAL SUPLENTE:

ING. JOEL LIMONES AVITIA

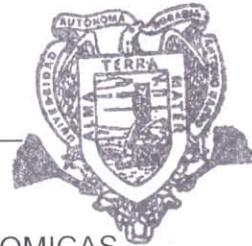
MC. VICTOR MARTINEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONOMICAS

Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA.

DICIEMBRE DE 2008



DEDICATORIA

A MI DIOS JESUS por haberme dado la oportunidad de nacer, de crecer y ahora de lograr uno de mis tantos sueños; A el y solo a el por la oportunidad tan grande de haberlo conocido y el que haya tenido tan grande misericordia para con mi vida y nunca haberme dejado pese a mis errores además de escuchar cada una de mis oraciones en tiempos de angustia dándome consuelo, porque el solo sabe cuanto mi alma le anhela.

A mi hermanita: Jessica Jazmín Pérez Zavala pese a que ya no esta conmigo en la tierra, se que esta con mi Señor y me mira en el cielo, a ti mi hermanita linda sea pues también este grande logro en mi vida y sea también mi amor y mi corazón porque te amo.

A mis padres: Luís Alberto Pérez Martínez y Celia Zavala Ovando, por haberme traído al mundo, por amarme pese a mis rebeldías y mis malos momentos, por darme todo su apoyo incondicional y de corazón para lograr este sueño. A mi padre por su enorme sacrificio por amor a mí el cual hoy se ve recompensado. A ti mama por tu gran manera de ser, por esa alma tan blanca y pura que tienes la cual siempre me aconsejaba, los amo con el amor tierno de nuestro señor JESUCRISTO.

A mis hermanos: Jesús Iván Pérez Zavala y Ana Celia Pérez Zavala, por darme todo su amor. A ti Iván porque se que tu llegaras muy lejos confiando en Dios, por tu paciencia y por compartir conmigo momentos bellos en nuestra niñez, juventud y siempre. Te amo hermano lindo. A ti mi chelita preciosa porque se que al igual que mama tu corazón es puro, te amo bebida hermosa.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS indiscutiblemente por su amor y su misericordia, porque siempre ha estado conmigo, ayudándome alcanzar cada sueño y meta. Y solo a él sea la honra, la gloria y el imperio.

A mi “Alma Terra Mater” por la estancia y las facilidades que esta me brindó para lograr mi carrera.

Al Doc. Mario García Carrillo por sus asesorías, por compartir sus conocimientos, por su valioso tiempo dedicado a la realización de este trabajo de tesis y por su gran calidad de ser humano.

Al Ing. Lucio Leos Escobedo por su apoyo, orientación y facilidades en el trabajo de campo de esta tesis.

Al MC. Cesar Martínez Lomas por permitirme formar parte de este proyecto y trabajar en conjunto, sus consejos y los esfuerzos hechos.

A mis amigos y primos: por haber compartido conmigo momentos hermosos e inolvidables y difíciles a lo largo de la carrera.

A todas aquellas personas que en algún momento me brindaron la mano y me dieron su apoyo y comprensión para terminar la carrera.

INDÍCE DE CONTENIDO

	Pagina
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE CONTENIDO	III
ÍNDICE DE CUADROS	V
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Antecedentes de la empresa Peñoles.....	4
2.2. Panorámica de la problemática.....	4
2.3. Metales Pesados.....	6
2.4. Disponibilidad de los metales pesados en el suelo.....	7
2.5. Comportamiento de los metales pesados en el suelo.....	8
2.6. Problemática Ambiental.....	9
2.7. Límites de Toxicidad.....	9
2.8. Plomo.....	10
2.8.1. Efectos del Plomo en la salud.....	11
2.8.2. Efectos del Plomo en el medio ambiente.....	12
2.8.3. Normatividad del Plomo en el suelo.....	12
2.9. Zinc.....	13
2.9.1. Efectos del Zinc en la salud.....	13
2.9.2. Efectos del Zinc en el medio ambiente.....	14
2.9.3. Normatividad del Zinc en el suelo.....	14
2.10. Remediación.....	15
2.10.1. Clasificación de las Técnicas de remediación.....	15
2.10.2. Fitorremediación.....	16
2.11. Procesos de entrada de metales pesados en las plantas.....	17
2.12. Virginio (Nicotiana glauca G.).....	18
2.13. Criterios de calidad para el agua de riego.....	18
2.13.1. Características Físicas.....	19
2.13.2. Características Químicas.....	19
2.13.3. Características Biológicas.....	20
2.14. Norma oficial Mexicana NOM-127-ssa1-1994.....	21
2.15. Investigaciones sobre Fitorremediación.....	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Localización geográfica.....	23
3.2. Desarrollo del experimento.....	23
3.2.1. Selección de la especie vegetal.....	23

3.2.2. Siembra.....	23
3.2.3. Primer trasplante.....	24
3.2.4. Segundo trasplante.....	24
3.2.5. Mezcla de sustratos.....	24
3.3. Agua de riego.....	24
3.4. Análisis de agua de riego.....	24
3.5. Primer análisis de suelo.....	25
3.6. Análisis vegetal.....	25
3.6.1. Primer análisis vegetal.....	25
3.6.2. Segundo análisis vegetal.....	25
3.6.3. Tercer análisis vegetal.....	25
3.6.4. Cuarto análisis vegetal.....	26
3.7. Segundo análisis de suelo.....	26
3.8. Tratamientos.....	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1. Concentraciones iniciales y finales de los metales pesados en el suelo.....	27
4.2. Resultados de los análisis físico-químicos del suelo.....	28
4.3. Resultados del análisis del agua de riego.....	29
4.4. Concentraciones del plomo y zinc en la <i>Nicotiana glauca</i> G. a nivel raíz, tallo y hoja.....	31
V. CONCLUSIONES.....	35
VI. RECOMENDACIONES.....	36
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	37

INDICE DE CUADROS

	pagina
CUADRO 1. Concentraciones iniciales y finales de metales pesados en el suelo y en el lixiviado.....	28
CUADRO 2. Resultados del análisis de las características físicas y químicas del suelo (profundidad 15-30 cm).....	28
CUADRO 3. Concentraciones de los elementos presentes en el agua de riego.....	29
CUADRO 4. Resultados del análisis de las partes de la planta en los cuatro muestreos del tratamiento (profundidad 15-30 cm).	31
CUADRO 5. Resultados del análisis de las diferentes partes de la planta en los cuatro muestreos (testigo).....	33

RESUMEN

Actualmente existen estudios tendientes a resolver la contaminación originada por metales pesados en suelos, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen la propiedad de acumular metales pesados; proceso denominado Fitoremediación.

El objetivo del presente trabajo de investigación fue el evaluar la capacidad de retención de Pb y Zn de la especie vegetal *Nicotiana glauca* G. en raíz, tallo y hoja.

Los trabajos se realizaron en dos sitios importantes; en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna donde se hizo la siembra, crecimiento y desarrollo de la planta en el suelo contaminado durante un periodo de evaluación de 120 días y en la empresa Met-Mex Peñoles ubicada en Torreón, Coahuila; donde se llevaron a cabo los análisis de cuantificación de concentraciones de los metales pesados en el suelo contaminado y en la planta.

Las concentraciones iniciales de Pb y Zn en el suelo contaminado fueron de 32260 ppm y 31231 ppm respectivamente. Por otra parte la *Nicotiana glauca* G. absorbió Pb en cantidades considerables siendo 283.3 ppm entre raíz, tallo y hoja, mientras que de Zinc absorbió 605.1 ppm entre raíz, tallo y hoja al término del periodo de evaluación. Las concentraciones finales del suelo contaminado fueron 26252 ppm de Pb y 24 252 ppm de Zinc al final de la investigación. Los resultados se vieron afectados por una serie de factores externos.

Palabras claves: Metales pesados, contaminación, especie vegetal, extracción, retención, absorción, concentración.

I. INTRODUCCIÓN

Desde tiempo atrás la industria Met-Mex Peñoles ubicada en la ciudad de Torreón, Coahuila, dentro de su producción y sus procesamientos mineros ha estado emitiendo metales pesados al aire, suelo y agua entre los que sobresale el plomo y el zinc. Los cuales han venido a repercutir en la salud de las poblaciones aledañas a esta empresa, provocando la molestia de la sociedad lagunera y convirtiéndose así en un grave problema ambiental.

Adiciones continuas de estos metales pueden acumularse en los suelos hasta alcanzar niveles tóxicos que dañan el desarrollo de la vegetación y la fauna así como en la salud.

Los metales pesados contribuyen fuertemente a la contaminación ambiental debido a que no son bio-degradables, no son termo-degradables, generalmente no percola a las capas inferiores de los suelos y pueden acumularse sutilmente a concentraciones tóxicas para las plantas y animales e incluso para el ser humano.

La contaminación por metales pesados dados naturalmente en los suelos puede ser por cientos o miles de años; dependiendo del tipo de suelo y de sus parámetros físico-químicos. Sin embargo debido a la actividad humana, la concentración de estos metales es elevada, en un tiempo muy rápido, lo que está afectando no solamente al ecosistema si no que también al ser humano.

El entorno de las especies hiperacumuladoras (fitorremediadoras) revela la necesidad de impulsar mayores conocimientos multidisciplinarios que aumenten la rentabilidad y eficacia de dichas plantas. Sus aplicaciones son interesantes en muchas áreas y particularmente importantes en la protección del medio ambiente.

Existen especies vegetales que son capaces de retener metales pesados, ya que éstos tienden a acumularse en la superficie del suelo, quedando accesibles a las raíces de las plantas en ese suelo, quienes los absorben concentrándolos en su estructura, reduciendo la magnitud del problema de contaminación en el suelo y, por ende, la minimización del grave impacto de éstos en los humanos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Evaluar la capacidad de la especie vegetal conocida como virginio (*Nicotiana glauca* G.) para extraer metales pesados (Pb, Zn) en los suelos contaminados de Met-Mex Peñoles ubicada en la ciudad de Torreón Coahuila, México.

1.1.2 Objetivo Específico

Determinar la concentración de plomo y zinc en hojas, tallos y raíces de la planta evaluada.

Determinar la concentración inicial y final de plomo y zinc en el suelo a una profundidad de 15-30 cm.

1.2 HIPÓTESIS:

Esta especie vegetal extrae significativas cantidades de metales pesados tales como Plomo y Zinc.

Esta especie vegetal reduce las concentraciones de metales pesados tales como el Plomo y Zinc a 15-30 cm de profundidad del suelo.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de la empresa Peñoles

Peñoles, fundado en 1887, es un grupo minero con operaciones integradas en la fundición y afinación de metales no ferrosos y en la elaboración de productos químicos. Peñoles es el mayor productor mundial de plata afinada, bismuto metálico y sulfato de sodio, líder latinoamericano en la producción de oro, plomo y zinc afinado (Club Planeta, 2008).

La misión de Peñoles es agregar valor a los recursos naturales no renovables en forma sustentable, además de buscar ser una empresa socialmente responsable, respetuosa de la naturaleza y promotora del autodesarrollo en las comunidades donde opera (Peñoles, 2008).

2.2 Panorama de la problemática

El problema en la ciudad de Torreón es provocado principalmente por el plomo, el cadmio y el arsénico, tres elementos altamente dañinos para los humanos, sin embargo, los estudios, las denuncias y ahora las acciones que se han realizado en torno a este problema tienen como actor principal al plomo. En marzo de 1999 las autoridades federales aceptaron que Peñoles era la fuente de las emisiones tóxicas de plomo y dióxido de azufre en la zona (López 1999).

Desde mediados de los años setenta, las autoridades de salud de los Estados Unidos reconocieron el envenenamiento por plomo en niños como un problema grave al que llamaron una epidemia silenciosa. Una vez reconocido el problema, el creciente cuerpo de información sobre el daño del plomo a la salud llevó a las autoridades de salud a emitir normas cada vez más estrictas sobre los niveles de este metal en la sangre, mientras que las autoridades del medio ambiente prohibieron el uso de las pinturas basadas en plomo en 1978 y

se empezó a sustituir paulatinamente el plomo en las gasolinas a partir de la década de los setenta. Al mismo tiempo, la Ley del Aire Limpio (Clean Air Act) señalaba límites máximos para la concentración del plomo en el aire (América 2004).

En 1976, determinaron plomo en cabello de niños de Torreón. El valor promedio en las muestras procedentes de esta ciudad fue de 0.55 ppm de plomo de cabello; dos terceras partes de los niños tuvieron más de 0.3 ppm de plomo, con un máximo de 2.2 ppm de plomo, en comparación con un valor normal promedio de 0.13 ppm de plomo, lo que indica que estos niños estaban expuestos al plomo de manera crónica. En un estudio posterior, el mismo grupo confirmó la existencia de estos elevados valores (Albert *et al.*, 1986).

En 1961 los trabajadores de Peñoles pusieron una queja ante las autoridades federales de salud, en respuesta a ella, dichas autoridades realizaron dos estudios en 1962, los cuales estuvieron enfocados a evaluar si en la planta y sus alrededores existía contaminación que pudiera ser atribuida a esta empresa. En ellos se encontró que la contaminación atmosférica debida a las emisiones de arsénico, bióxido de azufre y plomo generadas por Peñoles era grave; se demostró que estos contaminantes, en especial los dos últimos, eran dispersados por los vientos dominantes hacia el oeste y el sur de la ciudad y se documentaron numerosas deficiencias en las operaciones e instalaciones de la planta, así como una exposición severa de los trabajadores al arsénico. Poco después, y posiblemente como consecuencia de estos resultados, la producción de arsénico de esta planta fue descontinuada (Escobar *et al.*, 1964).

La primera queja documentada oficialmente contra Peñoles data de 1937, desde entonces han sido recurrentes las quejas de la comunidad sobre las molestias que se atribuyen a las actividades de esta empresa, en especial, irritación de ojos y garganta y olores desagradables; sin embargo, hasta el momento las acciones correctivas por parte de la empresa han sido lentas, renuentes y definitivamente insuficientes (Viniegra *et al.*, 1964).

2.3 Metales pesados

Se considera metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 g/cm^3 cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01% (García y Dorronsoro, 2005).

Lo que hace tóxicos a los metales pesados no son en general sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse, y casi más importante aún, el tipo de especie que forman en un determinado medio (Higuera y Oyarzun, 2008)

Los metales pesados son principalmente una preocupación porque no pueden ser destruidos por la degradación.

Con frecuencia, la remediación de suelos contaminados, aguas subterráneas, y el agua superficial requiere el retiro de metales tóxicos de áreas contaminadas.

Los metales pesados más comunes en sitios contaminados son el cadmio (Cd), el cromo (Cr), el cobre (Cu), el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el níquel (Ni) y el zinc (Zn) (Henry, 2000).

El problema de la contaminación por metales tóxicos surge como resultado de actividades humanas, principalmente de la industria, agricultura y de la eliminación de residuos mineros. Estos contaminantes son descargados al medio ambiente alcanzando concentraciones por encima de los valores permisibles por legislaciones internacionales (WHO, 1992).

Debido al gran avance de la actividad industrial a lo largo del último siglo, la contaminación por metales pesados en el ambiente es un serio problema, muchos de estos metales tóxicos entran al ambiente por la combustión de combustible fósil, la minería y en los procesos de fundición (Fernández, 1991).

La mayoría de los metales son también incluidos en el metabolismo de plantas y animales. Todos los organismos, incluido el hombre, se encuentran involucrados en este sentido por el ciclo geoquímico. Cuando los minerales de las rocas son expuestos a la erosión, los metales se liberan y, por varias razones, comienzan a circular en el ambiente (Díaz y Ramírez, 2004).

2.4 Disponibilidad de los metales pesados en el suelo

La cantidad de metales disponibles en el suelo está en función del pH, el contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y otras propiedades que las hacen únicas en términos de manejo de la contaminación (Kimberly y William 1999).

A excepción del molibdeno, selenio y arsénico, la movilidad de los metales pesados disminuye con el incremento del pH debido a la precipitación de éstos en forma de hidróxidos, carbonatos o en la formación de complejos orgánicos disponibles (Smith 1996).

Los suelos arenosos contienen menores concentraciones de metales pesados que los suelos arcillosos (Ross, 1994).

El pH es un factor esencial, para que la mayoría de los metales tiendan a estar más disponibles en un pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino es una variable importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios con pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos. La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo y por tanto, también su biodisponibilidad de sus compuestos (Alloway, 1995).

La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en forma no disponible por las plantas, motivo por el cual, algunas plantas crecidas en suelos ricos en materia

orgánica, presentan carencia de elementos como el Cu, Pb y Zn, eso no significa que los suelos no estén contaminados, ya que las poblaciones microbianas se reducen notablemente. La textura favorece la entrada e infiltración de la contaminación de metales pesados en el suelo, por ejemplo, la arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio, por el contrario los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos (Pineda, 2004).

La contaminación del suelo por metales pesados está fundamentalmente relacionada con diferentes tipos de actividades humanas. Una vez en el suelo, éstos pueden quedar retenidos en el mismo pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli *et al.*, 2004).

Los metales pesados adicionados a los suelos se redistribuyen y reparten lentamente entre los componentes de la fase sólida. Dicha redistribución se caracteriza por una rápida retención inicial y posteriores reacciones lentas, dependiendo de las especies del metal, propiedades del suelo, nivel de introducción y tiempo (Han *et al.*, 2003).

2.5 Comportamiento de los metales pesados en el suelo

La cantidad y calidad de los sitios de adsorción, la concentración y tipo de complejos orgánicos e inorgánicos, la composición catiónica y aniónica del suelo, conductividad hidráulica y la actividad microbiana, son factores que afectan el comportamiento de los metales. Los metales que se asimilan en el suelo se van eliminando lentamente por diferentes procesos como el lavado, absorción por las plantas, erosión, etc. la vida media de los metales en condiciones de lixiviados varían según el elemento. Pb de 740--5900 años y Zn de 70--510 años.

Aunque los aportes a la biosfera no sean muy elevados, en los suelos se va aumentando su concentración debido a su larga vida media (Ramos *et al.*, 2001).

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son: características del suelo: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura; naturaleza de la contaminación: origen de los metales y forma de deposición y condiciones medioambientales: acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad (Sauquillo *et al.*, 2003).

2.6 Problemática ambiental

Las actividades mineras en México tienen más de 450 años y han causado un impacto muy fuerte en el suelo, tanto en las zonas de explotación como en donde se depositan los residuos; el más notable es el enterramiento de grandes áreas de suelo y vegetación. La contaminación del suelo es un problema que ha atraído importantemente la atención de los diferentes grupos de investigación en el mundo, debido al incremento de la contaminación en grandes extensiones de suelos y que ahora resultan peligrosos para el humano y la vida silvestre. Cada vez se considera que el problema de la contaminación del suelo debe de atenderse de manera inmediata, desafortunadamente los costos para remover los contaminantes por métodos fisicoquímicos, han hecho que los industriales ignoren dicho problema (Universidad Autónoma de Zacatecas, 2005).

2.7 Límites de toxicidad

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos ha determinado una serie de límites para las concentraciones de metales pesados. Por encima de éstos los metales pueden causar graves trastornos en los seres

vivos, y finalmente ocasionar la muerte. A continuación se muestran dichos límites en distintos medios y las dosis máximas para la ingesta en los humanos
Pb 50.0 µg/l y Zn 5.0 µg/l (Higuera y Oyarzun, 2008)

2.8 Plomo

Elemento químico de símbolo Pb, su número atómico es 82 y su peso atómico 207.19. El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11.4 a 16°C (61°F)), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad a 327.4°C (621.3°F) y hierve a 1725°C (3164°F). Las valencias químicas normales son 2 y 4.

Industrialmente, sus compuestos más importantes son los óxidos de plomo y el tetraetilo de plomo. El plomo forma aleaciones con muchos metales y, en general, se emplea en esta forma en la mayor parte de sus aplicaciones. Todas las aleaciones formadas con estaño, cobre, arsénico, antimonio, bismuto, cadmio y sodio tienen importancia industrial.

Los compuestos del plomo son tóxicos y han producido envenenamiento de trabajadores por su uso inadecuado y por una exposición excesiva a los mismos (Lenntech, 2008)

El particulado fino de plomo (10-100 µm) puede ser extremadamente peligroso por las siguientes razones: se adhiere más fuertemente a la piel, es más soluble que el particulado grueso en el tracto gastrointestinal, es fácilmente absorbible a través del sistema respiratorio (Higuera y Oyarzun, 2008).

2.8.1 Efectos del plomo sobre la salud

El plomo es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%).

El Plomo puede causar varios efectos no deseados, como son: Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, incremento de la presión sanguínea, daño a los riñones, abortos y abortos sutiles, perturbación del sistema nervioso, disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma, daño al cerebro, disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños, perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad (Lenntech, 2008).

El plomo es muy tóxico para los seres vivos. Afecta a los sistemas endocrino, cardiovascular, respiratorio, inmunológico, neurológico y gastrointestinal, además de afectar la piel y los riñones. No es biodegradable y persiste en el suelo, en el aire, en el agua, en los hogares y en los expuestos a él. La exposición al plomo, aun a niveles bajos, afecta a niños y a adultos. En cantidades muy pequeñas, interfiere con el desarrollo del sistema neurológico, causa crecimiento retardado y problemas digestivos. En casos extremos, causa convulsiones, colapso e incluso la muerte. La exposición a cantidades muy pequeñas puede causar a largo plazo daños medibles e irreversibles en niños aun cuando éstos no muestren síntomas particulares. En los adultos, un nivel bajo de plomo causa incrementos pequeños, pero significativos, en la presión arterial y no existe evidencia de que haya un umbral para este efecto. La hipertensión causada por la exposición al plomo contribuye a la muerte de miles de personas cada año. También afecta la fertilidad (Valdez, 2001).

El límite máximo permisible de plomo en la sangre según la Norma Oficial Mexicana promulgada en Junio de 1999, es de 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (0.1 ppm). Sin embargo es importante resaltar que este nivel no es seguro ni es normal (Valdés y Cabrera, 1999).

2.8.2 Efectos del plomo en el medio ambiente

El Plomo es un elemento químico particularmente peligroso, y se puede acumular en organismos individuales, pero también entrar en las cadenas alimenticias (Lenntech, 2008).

Dado que el plomo es acumulativo, éste tiene un movimiento lento dentro de las plantas, pero en altas concentraciones puede ser tóxico para los cultivos, éstos pueden presentar un crecimiento lento o no se llegan a desarrollarse normalmente (Vázquez, 2001).

Las partículas grandes de plomo se precipitan en el suelo o la superficie de aguas, las pequeñas partículas viajarán largas distancias a través del aire y permanecerán en la atmósfera. Parte de este plomo caerá de nuevo sobre la tierra cuando llueva. (Higuera y Oyarzun, 2008)

2.8.3 Normatividad del plomo en el suelo

Las concentraciones de referencias totales por tipo de usos de suelos para el plomo según la norma oficial mexicana 147- Semarnat/SSA1-2004; establece que para uso agrícola/residencial las concentraciones límites permisibles es de 400 ppm, mientras que para uso industrial las concentraciones límites permisibles es de 700 ppm (Orden jurídico, 2008).

El nivel máximo en los Estados Unidos es de 500 ppm (Al Benin *et al*, 1999).

El valor límite del plomo en suelo, según la normatividad española es de 50-300 ppm. El valor de 50 se emplea en suelos con pH menor a 7, por lo tanto el de 300 se emplea para suelos con pH mayor a 7 (La Caxia, 1995).

2.9 Zinc

Elemento químico de símbolo Zn, número atómico 30 y peso atómico 65.37. Es un metal maleable, dúctil y de color gris. Se conocen 15 isótopos, cinco de los cuales son estables y tienen masas atómicas de 64, 66, 67, 68 y 70. Cerca de la mitad del zinc común se encuentra como isótopo de masa atómica 64.

El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la blenda, marmatita o esfalerita de zinc, (ZnS).

Los usos más importantes del zinc los constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. El hierro o el acero recubiertos con zinc se denominan galvanizados (Lenntech, 2008).

2.9.1 Efectos del zinc en la salud

El zinc es un nutrimento indispensable para el organismo de los humanos y juega un papel importante en una serie de procesos metabólicos: participa en el sitio catalítico de varios sistemas enzimáticos; participa como ion estructural en membranas biológicas, y guarda una estrecha relación con la síntesis de proteínas, entre otras cosas. (Rosado, 2008)

El zinc es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Cuando la gente absorbe demasiado poco zinc, éstos pueden experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor. Pequeñas llagas, y erupciones cutáneas. La acumulación del zinc puede incluso producir defectos de nacimiento.

Demasiada cantidad de zinc puede también causar problemas de salud evidentes, como es úlcera de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y

anemia. Niveles alto de zinc pueden dañar el páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, y causar arterioesclerosis. Exposiciones al clorato de zinc intensivas pueden causar desórdenes respiratorios (Lenntech, 2008).

2.9.2 Efectos del zinc en el medio ambiente

La mayoría del Zinc es adicionado durante actividades industriales, como es la minería, la combustión de carbón y residuos y el procesado del acero. La producción mundial de Zinc está todavía creciendo. Esto significa básicamente que más y más Zinc termina en el ambiente.

El Zinc puede interrumpir la actividad en los suelos, con influencias negativas en la actividad de microorganismos y lombrices. La descomposición de la materia orgánica posiblemente sea más lenta debido a ésto.

Las plantas a menudo tienen una toma de zinc que sus sistemas no pueden manejar, debido a la acumulación de zinc en el suelo. En suelos ricos en zinc sólo un número limitado de plantas tiene la capacidad de sobrevivir. Esta es la razón por la cuál no hay mucha diversidad de plantas cerca de factorías de Zinc.

El agua es contaminada con zinc, debido a la presencia de grandes cantidades en las aguas residuales de plantas industriales.

El zinc puede también incrementar la acidez de las aguas; cuando el zinc entra en los cuerpos de estos peces, éste es capaz de biomagnificarse en la cadena alimentaria (Lenntech, 2008).

2.9.3 Normatividad del zinc en el suelo

La EPA considera a los sitios excesivamente fitotóxicos a los que contienen entre 200 y 400 ppm de zinc.

El anteproyecto de Norma del 2003 para la limpieza y remediación de los suelos contaminados dedicados a la agricultura en México señala que el valor máximo de zinc en el suelo es de 300 ppm (Puga *et al.*, 2008)

2.10 Remediación

El término remediación se ha venido utilizando para referirse a todas aquellas actividades de limpieza de sitios contaminados (Saval, 1997).

El término remediación, no está definido en México en algún documento oficial, actualmente es utilizado para referirse a todas aquellas acciones aplicadas a suelos y acuíferos que conduzcan a la reducción de niveles de contaminación. La reducción en los niveles de contaminación orgánica debe de llegar hasta la mineralización de los compuestos orgánicos, mientras que la remediación de metales o compuestos inorgánicos implica el secuestro, retención y absorción en sitios confinados y en lugares en los cuales no haga daño al ecosistema (Bohn *et al.*, 1985).

2.10.1 Clasificación de las técnicas de remediación

Las técnicas de tratamiento *in situ* son las que se aplican sin necesidad de trasladar el suelo o el agua subterránea afectados por el problema.

De carácter biológico son dos: biorremediación y fitorremediación.

Físico-químicos incluyen las siguientes: Solidificación, estabilización, extracción con vapor y aireación del suelo, tratamientos térmicos y oxidación química.

Los tratamientos térmicos son un grupo de técnicas que se basan en la extracción de contaminantes a través de su movilización a altas temperaturas (Mam, 2006).

2.10.2 Fitorremediación

La fitorremediación es un término general que hace referencia a varios usos de las plantas y árboles para descontaminar suelos contaminados mediante la extracción de los contaminantes del suelo y del agua. Las plantas actúan como filtros biológicos que pueden descomponer o estabilizar metales pesados o bien degradar componentes orgánicos (Miliarium, 2008).

La fitorremediación se refiere al uso de las plantas con capacidad para remover los contaminantes y con resistencia para crecer en suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos y metales pesados (Pérez et al., 2002).

La fitorremediación es el uso de plantas verdes en los sitios contaminados y que representa una limpieza de los desechos peligrosos. La idea de usar las plantas para quitar los metales pesados y otros compuestos fue introducida en 1983 (Henry, 2008).

A continuación se pueden apreciar los tipos de fitorremediación posibles:

Fitoextracción: Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (principalmente, la parte aérea)

Rizofiltración: Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos

Fitoestabilización: Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.

Fitoestimulación: Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)

Fitovolatilización: Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.

Fitodegradación: Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos (Lumelli, 2008).

2.11 Procesos de entrada de metales pesados en la planta

El proceso de acumulación de metales involucra en general los siguientes mecanismos:

a). Los iones alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión a través de la solución salina del suelo, son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece. Los iones metálicos son movilizados por la secreción de quelantes o por la acidificación de la rizosfera.

b). Las raíces capturan a los metales hidratados o a los complejos metal-quelantes por medio de sistemas de transporte como bombas primarias, canales iónicos y transportadores. Dentro de las células los metales son quelados principalmente por fitoquelatinas, el exceso de metales es transportado a la vacuola.

c). Los metales se transportan de las raíces a la parte aérea vía el xilema, dentro de él los metales se presentan como iones hidratados o como complejo metal-quelante.

d). Después de penetrar el apoplasto de las hojas, los metales se distribuyen dentro de la célula, manteniendo en cada organelo las concentraciones dentro de rangos fisiológicos específicos, el exceso de metales esenciales y no esenciales como el plomo y cadmio se almacenan en las vacuolas (Maqueda, 2003).

2.12 Virginio (*Nicotiana glauca* G.)

Nombre científico o latino: *Nicotiana glauca*. Su nombre común o vulgar es: tabaco ornamental, gandul, árbol del tabaco, tabaco negro, tabaco moruno. Pertenece a la familia: Solanaceae. Es una especie originaria de Sudamérica, que se ha naturalizado de manera extensiva en la región Mediterránea.

Es un arbusto o arbolillo perennifolio, Puede alcanzar los 7 m. Sus hojas glaucas casi lanceoladas poseen un largo pecíolo y al romperlas desprenden un olor desagradable, casi todo el año presenta flores amarillas en forma de tubo largo y estrecho, flores en inflorescencias paniculiformes terminales, hermafroditas, actinomorfas, pentámeras.

El fruto es una cápsula ovoide rodeada por el cáliz que es persistente. Crece espontáneamente en casas abandonadas, solares y bordes de caminos, aunque casi siempre en lugares no muy alejados del mar; Realmente rara vez es cultivada, pero aparece de manera silvestre por doquier, principalmente en terrenos incultos, escombreras y márgenes de carreteras. La planta es toxica para consumo humano, no debe ser utilizada (Devesa, 2008).

2.13 Criterios de calidad para el agua de riego

- Ninguno: agua de buena calidad para cualquier suelo y planta. Riego continuo en todo tipo de suelos.

- Moderado: agua mediocre para plantas tolerantes y suelo de textura fina. Riego discontinuo debido al contenido en tóxicos.

- Severo: agua de mala calidad, sólo para plantas muy tolerantes y suelos de textura fina muy bien drenados. Riego discontinuo con muchas precauciones (Universidad de Sevilla, 2008).

2.13.1 Características físicas

Los sólidos en suspensión y las sustancias orgánicas disueltas pueden taponar los poros del suelo, cubrir la superficie y reducir la aireación y penetración del agua, así como obstruir el sistema de riego. Por tanto uno de los objetivos fundamentales de las depuradoras es la eliminación de los sólidos contenidos en el agua residual (Universidad de Sevilla, 2008).

2.13.2 Características químicas

- Salinidad: el contenido de sales suele ser peligroso cuando pasa por encima de 100 mg/l, teniéndose en cuenta todos los iones que existen en el agua. La salinidad del agua se determina midiendo su conductividad eléctrica, concentración de boro, cloruro, bicarbonatos, Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Para evitar una acumulación de sales a largo plazo se recurre al drenaje, lixiviación y cambio de un cultivo por otro más tolerante a la salinidad. También se puede recurrir al lavado de sales aplicando a la zona radicular más agua de la que se necesita para desplazar una parte de las sales acumuladas.

- Sodicidad: las partículas del suelo adsorben y retienen cationes a consecuencia de las cargas eléctricas que existen en su superficie. Las partículas del suelo pueden ser reemplazadas por otros cationes que se encuentran en el suelo como el Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . La sodicidad es un fenómeno del agua de riego que tiende a elevar el porcentaje de sodio intercambiable.

El sodio es uno de los iones que más favorece la degradación del suelo, y es el que sustituye al calcio en los suelos áridos. La infiltración aumenta con la salinidad y disminuye con la reducción de salinidad o aumento del contenido en sodio con relación al calcio y magnesio.

- Toxicidad: la toxicidad se produce dentro de la planta como resultado de la absorción y acumulación de microelementos (hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, molibdeno, cloro, silicio, cobalto, sodio, cadmio, mercurio, plomo...). Los microelementos son indispensables para la vida de las plantas pero en pequeñas proporciones.

- Nitrógeno total: los rendimientos de los cultivos sensibles al nitrógeno (remolacha azucarera, vid, albaricoque, cítricos...) pueden verse afectados por concentraciones de nitrógeno que exceden de 5 mg/l procedentes de nitrato y amonio. Cuando la concentración excede los 20 mg/l se pueden producir graves problemas en los cultivos sensibles. Para cultivos no sensibles puede ser adecuada la concentración de más de 30 mg/l, sin necesidad de añadir abonos nitrogenados. Una concentración de menos de 5 mg/l no tiene ningún efecto ni en cultivos sensibles.

- Índice de acidez: el intervalo normal del agua de riego oscila entre pH 6,5 y 8, el agua residual bruta o tratada sin vertidos industriales en condiciones normales esta dentro del intervalo. Si el pH esta fuera del intervalo es necesario realizar un riguroso análisis del agua. (Universidad de Sevilla, 2008).

2.13.3 Características biológicas.

Estas características se relacionan con bacterias, virus y otros causantes de enfermedades. Se deberá realizar un tratamiento de desinfección que dependerá de la utilización que se le de al agua residual y requisitos sanitarios (Universidad de Sevilla, 2008).

2.14 Norma Oficial Mexicana NOM-127-ssa1-1994

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE mg/l
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Ph (potencial de hidrógeno) en unidades de Ph	6.5-8.5
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO4=)	400.00
Zinc	5.00

(Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, 2008)

2.15 Investigaciones sobre la Fitorremediación

Los pastos son el género más adecuado para la fitorremediación de formas orgánicas e inorgánicas de metales, por su hábitat de crecimiento y adaptabilidad a una variedad de condiciones edáficas y climáticas (Singh *et al.* 2003). En las *Asteraceae* se ha reportado por ejemplo tolerancia al plomo en *Sonchus oleraceus* y se le ha propuesto como especie fitoremediadora de ambientes contaminados con este metal (Xiong, 1997).

La especie *Thlaspi caurulencens* en suelos contaminados con zinc y cadmio. Logra eliminar más de 8 mg/Kg de cadmio y 200 mg/Kg de zinc,

representado estos valores el 43 y 7 % de estos metales en un suelo agrícola, respectivamente (Lombi *et al.*, 2001).

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es la especie que absorbe los metales pesados en mayor cantidad acumulándose más en sus raíces que en sus brotes si se cosecha la biomasa entera de la planta, por lo que se considera una planta hiperacumuladora favorable en la fitoextracción de Cd, Zn, Pb y elementos radiactivos (Christie *et al.*, 2004).

La fitoextracción mediante mostaza india, una planta agrícola de alta biomasa capaz de acumular los metales en su parte aérea, junto con la mejora de los suelos mediante enmiendas orgánicas y calizas; y la fitoinmovilización mediante el altramuz, que es una leguminosa tolerante a los metales por exclusión en sus raíces y a ciertas condiciones de acidez del suelo (Walker *et al.*, 2007).

Algunos estudios muestran que la *Discaria americana* hiperacumula Zn por sobre 6.000 ppm (Cusato *et al.*, 2002).

Se evaluó la capacidad de las gramíneas *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar un suelo contaminado levemente (3%) con un hidrocarburo de petróleo (HCP) liviano, Sin embargo, a los 240 días, estas gramíneas lograron una reducción de la contaminación, en un 63% en *maximum* y *B. brizantha* en un 55 % (Hernández y Mages, 2003).

Se observó que en las raíces del geranio (*Pelargonium* spp) es donde mayor concentración de plomo existió que fue de 287 ppm en las hojas de 254 ppm mientras que en los tallos fue menor de 56 ppm, siendo un total de 597 ppm. (Rodríguez, 2007)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó durante el período septiembre 2007-agosto 2008, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- UL y la empresa Met-Mex Peñoles, en Torreón, Coahuila, México.

3.1 Localización geográfica

La región Lagunera se localiza en la parte suroeste del estado de Coahuila, se ubica entre las coordenadas geográficas 103° 26'33'' de longitud oeste con relación al meridiano de Greenwich y 25° 32'40'' de latitud norte, con una altura de 1120 msnm (INEGI, 2006).

3.2 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

3.2.1 Selección de la especie vegetal

Se seleccionó la especie vegetal conocida comúnmente como virginio o tabacón (*Nicotiana glauca* G.) por ser resistente a los cambios de clima además de encontrarse en buen funcionamiento en lugares de pésimas condiciones tales como: secos, contaminados, escombros y presentar hábitos perennes, así como por sus características ornamentales.

3.2.2 Siembra

La siembra se realizó en una charola de unicel de 200 cavidades, primeramente se humedeció el sustrato (peat most) depositándolo en las cavidades o celdas, posteriormente se realizaron pequeños orificios para depositar una semilla por cavidad, seguido de la colocación de una capa ligera de material orgánico para dicha semilla, finalmente se cubrió la charola con plástico negro y se colocó en el área de sombreadero del Departamento de Horticultura en la UAAAN-UL.

3.2.3 Primer trasplante

El primer trasplante se realizó cuando la planta alcanzó una altura de 6 cm. La plántula se sacó de la charola de unicel con cuidado y se depositó en bolsas de polietileno de una medida de 10x8x20, para mayor espacio de desarrollo de raíz.

3.2.4 Segundo trasplante

El trasplante se realizó cuando la planta alcanzó una altura de 12 cm presentando 5 a 6 hojas verdaderas depositándola en bolsas de polietileno de 10 Kg., con una cantidad de: 40 plantas para el (T1) y 40 plantas para el (T2). Se consideraron las plantas más homogéneas en altura y número de hojas.

3.2.5 Mezcla de sustratos

Primeramente se realizó el cribado de la arena de río cuya procedencia es del municipio de La Concha Durango; después se continuó con el cribado del suelo contaminado por metales pesados del estrato 15-30 proporcionado por la empresa Met-Mex Peñoles, realizando también el llenado de las bolsas de 10 kg.

3.3 Agua de riego

La aplicación del agua de riego se realizó cada tercer día con una cantidad de 250 ml a cada una de las macetas el primer mes después del trasplante (DDT), posteriormente se les agregó 500 ml cada 4 días hasta el fin de la evaluación.

3.4 Análisis de agua de riego

La muestra para el análisis de agua de riego se tomó directamente de una de las tomas del sombreadero y se trasladó hasta el laboratorio central certificado de la empresa Met-Mex Peñoles para el análisis correspondiente.

3.5 Primer análisis de suelo

Se recolectó una muestra de 1Kg de arena de río, 1Kg del estrato 15-30 del suelo contaminado por metales pesados, los cuales se trasladaron al laboratorio central certificado de la empresa Met-Mex Peñoles para determinar las características físicas y químicas y las concentraciones de metales pesados antes del transplante.

3.6 Análisis vegetal

Se realizaron 4 muestreos vegetales a los 30, 60, 90 y 120 días después del transplante con el objetivo de determinar las concentraciones de metales pesados absorbidos por la planta en raíz, tallo y hoja.

3.6.1 Primer análisis vegetal

Este se realizó a los 30 días después del transplante. Se tomaron 4 plantas en total al azar, dos plantas del T1, dos plantas del T2. Se les practicó un lavado completo, se dejaron deshidratar en el horno de secado a una temperatura de 70°C por 24 horas, posteriormente se les realizó un macerado de raíz, tallo y hoja, y se tomó la muestra correspondiente para hacerla pasar por el espectrofotómetro de plasma y determinar las concentraciones de metales pesados (Pb y Zn). Esto se llevó a cabo en el laboratorio central de la empresa Met-Mex Peñoles.

3.6.2 Segundo análisis vegetal

Este se realizó a los 60 días después del transplante. Se tomaron 4 plantas en total al azar, dos plantas del T1, dos plantas del T2. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento del primer análisis.

3.6.3 Tercer análisis vegetal

Este se realizó a los 90 días después del transplante. Se tomaron 4 plantas en total al azar, dos plantas del T1, dos plantas del T2. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento del primer análisis.

3.6.4 Cuarto análisis vegetal

Este se realizó a los 120 días después del trasplante. Se tomaron 4 plantas en total al azar, una planta del T1, dos plantas del T2. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento del 1° análisis.

3.7 Segundo análisis de suelo

Se recolecto una muestra de 1Kg de arena de rio, 1Kg del estrato 15-30 del suelo contaminado por metales pesados, los cuales se trasladaron al laboratorio central certificado de la empresa Met-Mex Peñoles para determinar las características físicas y químicas y las concentraciones de metales pesados después de los análisis vegetales.

3.8 Tratamientos

Los tratamientos de estudio fueron: el testigo con el 100% arena de rio (T1), y el siguiente con un 40% de arena de rio y un 60% de suelo contaminado a una profundidad de a 15-30 cm (T2).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Concentraciones iniciales y finales de los metales pesados en el suelo.

En el cuadro 1 se pueden apreciar las concentraciones iniciales de los metales pesados en el suelo a una profundidad de 15-30 cm; cuya concentración mayor de plomo fue de 32 660 ppm mientras que la concentración máxima de zinc fue de 31 230 ppm, además de las concentraciones finales al término de la evaluación de la especie vegetal. Cabe mencionar que las concentraciones tanto máximas como mínimas se consideran elevadas de acuerdo a los límites máximos permisibles de los Estados Unidos de 500 ppm en plomo y 200-400 ppm de zinc (Valdez y Cabrera., 1999) y España quien marca como permisible 50-300 ppm. El valor de 50 se emplea en suelos con pH menor a 7, por lo tanto el de 300 se emplea para suelos con pH mayor a 7 (La Caxia, 1995) además de la norma oficial mexicana 147- Semarnat/SSA1-2004 quien marca 400 ppm (Orden jurídico, 2008) y el anteproyecto de norma para la limpieza y remediación de los suelos contaminados en México quien señala que el valor máximo de zinc en el suelo es de 300 ppm. (Puga *et al.*, 2008)

Se puede apreciar la existencia de metales pesados lixiviados en cantidades considerables en el predio donde se llevó a cabo el experimento. Esto debido a que los riegos que se realizaron, el agua escapó por los orificios de las bolsas de polietileno que contenían las plantas; Esto coincide con lo mencionado por McFarland (2008) el cual cita que el Pb y Zn pueden lixiviar (disolverse) en agua, además la (EPA, 2008) enuncia que estos metales pueden lixiviar en grandes cantidades cuando el agua entra en contacto con ellos.

El contenido de plomo en el suelo disminuyó debido a la absorción y lixiviación, sin embargo las concentraciones finales no están dentro de los límites máximos permisibles.

CUADRO 1. Concentraciones iniciales y finales de metales pesados en el suelo y en el lixiviado.

Elemento	Conc. iniciales (ppm)	Conc. finales (ppm)	Diferencia de conc. (ppm)	Lixiviado (ppm)
Plomo (Pb)	32 660	26 252	6 408	4 044
Zinc (Zn)	31 230	24 252	6 978	6 675

4.2 Resultados de los análisis físicos y químicos del suelo.

En el cuadro 2 se pueden observar los resultados de las características Físicos y Químicas del suelo a una profundidad de 15-30 cm.

CUADRO 2. Resultado del análisis de las características físicas y químicas del suelo (profundidad 15-30 cm).

Parámetro	Método	Suelo tratamiento	Testigo
% Arena	Bouyucos	64.96	85.56
% Arcilla	Bouyucos	3.04	7.76
% Limo	Bouyucos	32	6.68
Textura	Bouyucos	Migajón arenoso	Arena
C.E (MS/cm)	Extracto de saturación	3.5	3.24
Ph	Extracto de saturación	6.74	7.79
% M.O	Walkley y Black	1.54	.66
D.A (g/cm³)	De probeta	1.61	1.56

4.3 Resultados del análisis del agua de riego

A continuación se presentan las concentraciones de cada elemento presentes en el agua utilizada en los riegos de la planta.

CUADRO 3. Concentraciones de los elementos presentes en el agua de riego.

ELEMENTO	CONCENTRACION (Mg/L)	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE SEGÚN LA NOM-127-SSA1-1994 (Mg/L)
Ag	0.001	x
Pb	0.046	0.025
Cu	0.006	2.000
Fe	0.687	0.300
Zn	0.181	5.000
As	0.011	0.050
Cd	0.044	0.005
Na	62.20	200.0
Hg	0.002	0.001
Al	0.001	0.200
Ba	0.060	0.700
Ni	0.008	x
Mn	0.020	0.150
Cr	0.004	0.005
Cl	74.20	250.0
F	25.30	1.500
SO₄	239.0	400.0
STD	628.0	1000

X: el valor de la concentración de este elemento no se encuentra dentro de la norma.

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 todos los elementos presentes en la tabla, excepto el fierro, cadmio, mercurio, y flour, se encuentran dentro de la norma; Dichos elementos rebasan las concentraciones que la norma marca como máxima, es decir en el caso del fierro la norma marca como permisible .30 mg/L, mientras que la concentración de éste en el agua de riego es de 0.68 mg/L.

En el caso del Cadmio, Mercurio y Flour ocurre algo semejante pues las concentraciones en el análisis son de 0.044 mg/L , 0.002 mg/L y 25.3 mg/L respectivamente; los cuales son altos para la norma que marca 0.005 mg/L para Cadmio, 0.001 mg/L para el Mercurio, 1.50 mg/L para el Fluor.

La concentración de algunos elementos se encuentran en niveles que pueden provocar daños al ser humano a mediano y/o largo plazo en la medida que se esté en contacto en forma cotidiana con estos elementos (Holguín *et al.*, 2006)

El agua presentó un pH de 7.87, que según la Universidad de Sevilla (2008) nos dice que el intervalo normal del agua de riego oscila entre pH 6'5 y 8, además Morisigue y Karlanian (2008) cita que los rangos aptos de pH para una agua de riego deben tener valores de 6 y 7.5

La C.E del agua fue de 1.18 ms/cm que según Petersen (1996) dice que los valores deseados para CE de menos de 0.7 mS/cm presentan poca probabilidad de problemas de salinidad y de riesgo moderado con valores entre 0.7 y 2.

4.4 Concentraciones de plomo y zinc en la *Nicotiana glauca* G. a nivel raíz, tallo y hoja.

En el cuadro 4 se pueden observar las concentraciones máximas de Plomo y Zinc derivados de los cuatro análisis correspondientes en la *Nicotiana glauca* G.

CUADRO 4. Resultados del análisis de las partes de la planta en los cuatro muestreos del tratamiento (profundidad 15-30 cm).

Parte de la planta	Concentración de los	
	Metales pesados (ppm)	
Raíz	Pb	Zn
1° Análisis	277.4	219.4
2° Análisis	98.7	455.0
3° Análisis	94.1	21.0
4° Análisis	176.6	201.1
Tallo	Pb	Zn
1° Análisis	14.3	50.9
2° Análisis	17.6	64.7
3° Análisis	11.1	4.6
4° Análisis	66.3	183.5
Hoja	Pb	Zn
1° Análisis	16.9	87.9
2° Análisis	13.0	78.5
3° Análisis	29.7	16.2
4° ANALISIS	40.4	220.5

En este cuadro se puede apreciar que la concentración máxima de plomo en la raíz de la planta fue de 176.6 ppm de acuerdo al cuarto y último análisis. Rafael (2006) menciona que en los suelos contaminados por metales pesados las plantas los acumulan principalmente en el sistema radicular, así también en el caso del Zinc quien presentó una concentración de 201.1 ppm.

En el caso del tallo la concentración máxima de Plomo fue de 66.3 ppm, mientras que en el caso del Zinc la concentración máxima fue de 183.5 ppm. Maqueda (2003) menciona que los metales se transportan de las raíces a la parte aérea vía xilema, dentro de él los metales se van presentando como iones hidratados o como complejo metal-quelante además de ser una región de conducción y transporte.

En la parte de las hojas se aprecia que la concentración máxima de Plomo es de 40.4 ppm. En el caso del zinc la concentración máxima fue de 220.5 ppm, Según Maqueda (2003), después de penetrar el apoplasto de las hojas, los metales se distribuyen dentro de las células, manteniendo en cada organelo las concentraciones dentro de rangos fisiológicos específicos, el exceso de metales esenciales y no esenciales como el plomo y cadmio se almacenan en las vacuolas.

Esto deriva la concentración total de plomo en la planta la cual alcanza las 283.3 ppm tomando en cuenta la suma de todos los valores del cuarto y último análisis (raíz, tallo y hoja), mientras que la concentración total de zinc en la planta es de 605.1 ppm.

Salisbury y Ross (1994) mencionan que los metales pierden su toxicidad al ser quelados con fitoquelatinas, pequeños péptidos ricos en el aminoácido azufrado cisteína. . Es casi seguro que los átomos de azufre de la cisteína son esenciales para unir metales, aunque es probable que también participen otros átomos como nitrógeno y oxígeno.

En el cuadro 5 se presentan las concentraciones tanto de plomo como de zinc presentes en las plantas testigo, que en comparación con los valores del cuadro 4, los resultados son mínimos, esto debido a que el sustrato que se utilizó para plantar la especie vegetal fue arena, la cual es inerte.

CUADRO 5. Resultados del análisis de las diferentes partes de la planta en los cuatro muestreos (testigo).

Parte de la planta	Concentración de los	
	Metales pesados (ppm)	
Raíz	Pb	Zn
1° Análisis	5.9	26.2
2° Análisis	3.6	31.6
3° Análisis	8.0	5.6
4° Análisis	-1	69.4
Tallo	Pb	Zn
1° Análisis	2.5	53.8
2° Análisis	1.8	28.4
3° Análisis	8.5	3.1
4° Análisis	-1	155.0
Hoja	Pb	Zn
1° Análisis	4.2	56.6
2° Análisis	1.5	39.4
3° Análisis	17.1	8.7
4° Análisis	-1	121.3

Cabe hacer mención que los resultados obtenidos en los diversos análisis vegetales se vieron severamente afectados por una serie de factores que a continuación de describen:

- Las crudas heladas del invierno que provocaron en la planta quemaduras retrasando su crecimiento.
- El impedimento del buen crecimiento de la raíces, esto debido a que las bolsas de polietileno en la que se encontraban eran sometidas a grandes temperaturas por la acción del sol quemando las raíces de la planta y a su vez éstas no encontraban espacio suficiente para desarrollarse aún más.
- La acción de los vientos (tolvaneras) que golpeaban duramente a las plantas despojándolas de sus hojas y dañando los tallos.
- El 27 de abril del 2008 se suscitó una tormenta de agua y granizo en la ciudad de Torreón, Coahuila; con una precipitación de 44 mm de agua, una velocidad de vientos de 106 km/hr y un diámetro de granizo que oscilaba entre 1- 3 cm. Esto provocó un daño severo en las plantas destruyéndoles casi en su totalidad las hojas, fracturándoles tallos, y rompiendo las bolsas de polietileno en las que se encontraban.
- Los metales pesados que se lixiviaron y que no estaban disponibles a la planta, esto debido a la presencia de sulfatos en el agua de riego (SO_4) que al entrar en contacto con el plomo y zinc se hacen solubles en agua (González, 2008)

A pesar de estos hechos la planta presentó enorme resistencia y vida, reponiéndose gradualmente. *Nicotiana glauca* G. es capaz de adaptarse a condiciones extremas (Navarro y López, 2008). Es por ello las variaciones drásticas de los resultados en cada análisis (desde el primer análisis hasta el cuarto).

V. CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación podemos concluir lo siguiente:

- Los resultados en esta investigación demuestran la alta concentración inicial de plomo y zinc en el suelo los cuales rebasan los límites máximos permisibles establecida por la norma oficial mexicana 147-Semarnat/SSA1-2004, la norma Española y la norma de los Estados Unidos (EPA) y el anteproyecto de norma para la limpieza y remediación de los suelos contaminados dedicados a la agricultura en México.
- El contenido de plomo y zinc en el suelo disminuyó debido a la absorción y lixiviación, sin embargo las concentraciones finales no se encuentran dentro de los límites máximos permisibles.
- El Virgino (*Nicotiana glauca* G). absorbió Plomo en cantidades considerables siendo 283.3 ppm entre raíz, tallo y hoja en 120 días de evaluación tomando en cuenta los factores que influyeron de manera negativa en esta investigación.
- La *Nicotiana glauca* G. absorbió Zinc en cantidades considerables siendo 605.1 ppm entre raíz, tallo y hoja en el mismo lapso de evaluación.
- La *Nicotiana glauca* G. es una especie vegetal altamente resistente a condiciones adversas, además de poseer un alto grado de adaptación.

VI. RECOMENDACIONES

- Antes de llevar a cabo una fitorremediación de un suelo es necesario conocer las concentraciones de metales pesados que éste posee y las Características físicas y químicas del mismo.
- Realizar investigaciones mas profundas sobre la capacidad fitorremediadora de la *Nicotiana glauca G.* y continuar trabajando con la fitorremediación que es una de las técnicas que tiene como objetivos asimilar y desintoxicar metales pesados, compuestos orgánicos y compuestos radiactivos en el medio ambiente.
- Para investigaciones posteriores se recomienda tener controlada la salida del agua de riego en las macetas ya que a través de ellas, se presentan pérdidas por lixiviación.
- Se recomienda para el agua de riego que esta tenga un Ph con valores de 6 y 7, ademas de una C.E de menos de 2 mS/cm, seguido de verificar mediante análisis que los elementos presentes estén dentro del margen que las normas marquen.
- Se recomienda no hacer mezcla de sustratos; evaluando solo el suelo original para obtener mejores resultados.

BIBLIOGRAFIA

- Albert L, Martínez-Dewane MG y MR. García. 1986. Metales Pesados Plomo en el cabello de niños mexicanos. Rev. Soc. Quím. México.
- Alloway, B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic & Professional. Londres. pág. 370.
- América A.L. 2004. (en línea). Met-Mex Peñoles y los niños de Torreón. Consultora en Toxicología Ambiental y Evaluación de Riesgos; Xalapa, Veracruz, México. <http://www.sextox.com.ar/default.htm>
(Consultada el día 21 de Agosto del 2006).
- Al Benin, J.D Sargent, M. S. Roda. 1999. "High Concentrations of Heavy Metals in Neighborhoods Near Ore Smelters in Northern Mexico", Environmental Health Perspectives.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal, y A.G. Connor. 1985. Soil Chemistry. Wiley Inter Science Publications, NY, USA.
- Christie, P., Li, X., Chen, B. 2004. Arbuscular Mycohrriza can Depress Translocation of Zinc To Shoots of Host Plants in Soils Moderately Polluted with Zinc. Plant and Soil, 261 (1-2), 209-217.
- Club Planeta. 2008. (En línea). Peñoles. <http://www.economia.com.mx/penoles.htm>
(Consultada el día 10 de abril del 2008).
- Cusato, M. S., Valiente, L., Tortosa, R. D., Bartoloni, N., Puelles, M. M., D´Ambrogio, A. 2002. (En línea). Uso de discaria americana en Fitoremediación. Recursos Naturales y Ambiente. <http://www4.inti.gov.ar/GD/4jornadas2002/pdf/cequipe-141.pdf>. (Consultada el día 8 de septiembre del 2008).

- Devesa J. A. 2008. Vegetación y Flora de Extremadura. Editorial Universitat, Badajoz.
- Díaz S. y Ramírez E. 2004. Contaminación, Ambiente y Salud N° 6. p.p 49-54.
- Escobar R., M. Borja., G. Viniegra., L. Castellano., L. Antopia y F. Silva. 1964. Estudio epidemiológico de la metalúrgica Peñoles. Salud Pública México.
- Fernández J. C. 1991. Biochemical, physiological, and structural affects of excess copper in plants. Vol. 57. pág. 246-273.
- García I. y C. Dorronsoro C. 2005. Contaminación por metales pesados. En: Tecnologías de suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Pág. 74-78.
- González Ramos F. 2008. Laboratorio de zinc. Met-Mex Peñoles. Torreón, Coahuila. México.
- Han, F.X., Banin, A., Kingery, W.L., Triplett, G.B., Zhou, L.X., Zheng, S. J., Ding,W.X. 2003. New Approach to Studies of Heavy Metal Redistribution in Soil. *Advances in Environmental Research*, 8, pág. 113-120.
- Henry P. J. 2008. An Overview of the Phytoremediation of Lead and Mercury. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation office. Washington, D.C.
- Henry R. J. 2000. (En línea). National Network of Environmental Management Studies (NNEMS) Fellow. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation office. Washington, D.C. <http://clu-in.org> (Consultada el día 15 de Abril del 2008).

Hernández V. I. y Mager D. 2003. (En línea). Uso de Panicum maximum Y Brachiaria brizantha para Fitorremediar Suelos Contaminados con un Crudo de Petróleo Liviano. Bioagro v.15 # 3. <http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1316-33612003000300001> (Consultada el día 8 de septiembre del 2008).

Holguín, C., H. Rubio., M. E. Olave., R. Saucedo., M. Gutiérrez y R. Bautista. 2006. Calidad del agua del Rio Conchos en la Región de Ojinaga, Chihuahua: Parámetros Fisicoquímicos, metales y metaloides. Universidad Autónoma de Chihuahua, México. Vol. 22. pág. 51-63.

Higuera P. y R. Oyarzun. 2008. (En línea). Metales Pesados. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Universidad Politécnica de Almeda. España. http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/Tema08/Minerales_salud_2.htm (Consultada el día 29 de Marzo del 2008).

INEGI 2006. (en línea). Ubicación geográfica de Torreón Coahuila. <http://mapserver.inegi.gob.mx>. (Consultada el día 04 de Octubre del 2006).

Kimberly, M.F., y H. William 1999. Trace Metals in Montreal Urban Soils and The Leaves of Teraxacum Officinale. Can. J. Soil Sci. Pág. 385–387.

“La Caxia” fundación 1995. Reutilización de residuos urbanos en agricultura Editorial Aedos.

Lombi E, Zhao FJ, Dunham SJ and McGrath SP 2001. Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Natural Hyperaccumulation Versus Chemically-Enhanced Phytoextraction. Journal of Environmental Quality 30.pág. 1919-1926.

Lenntech. 2008. (En línea). Plomo. <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Pb.htm>. (Consultada el día 22 de marzo del 2008).

Lenntech. 2008. (En línea). Zinc. <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Zn.htm> (Consultada el día 22 de Marzo del 2008).

López P.F. 1999. Ordenan a Met-Mex Peñoles reducir sus operaciones a la mitad. La Jornada 22 de mayo de 1999. México.

Lumelli M. 2008. (En línea). Fitorremediación. Medio Ambiente. <http://www.estrucplan.com.mx/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=1187> (Consultada el día el 27 de Marzo del 2008).

McFarland, Mark L. 2008. (En línea) Problemas del agua potable :El plomo. El sistema universitario Texas http://texaswater.tamu.edu/Resources/drinkg_water_factsheets/L5452SLead.pdf (Consultada el día 10 de julio del 2008).

Mam. 2006. (En línea). Restauración y Remediación III: Suelos y Aguas subterráneas. <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MAM10.htm>. (Consultada el día 12 de Septiembre de 2006).

Maqueda A. 2003. (En línea). Fitorremediacion de Suelos Contaminados con Metales Pesados. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mbt/maqueda_g_ap/capitulo4.pdf. (Consultada el día 6 de Agosto del 2003).

Miliarium. 2008. (En línea). Fitorremediación. <http://www.miliarium.com/Proyectos/SuelosContaminados/DescontaminacionSuelos/TecnicasInSitu/TecnicasBiologicas/Fitorremediacion.asp> (Consultada el día 31 de Marzo del 2008).

Morisigue, D. y Karlanian, M. 2008. (En línea). Análisis del agua de riego utilizado en el Área Metropolitana de Buenos Aires para el cultivo de flores y plantas ornamentales. Instituto de Floricultura – CNIA INTA. [http://www.maa.gba.gov.ar/agricultura_ganaderia/floricultura/SUSTRATO/21%20An lisis del agua de riego utilizado FINAL.doc](http://www.maa.gba.gov.ar/agricultura_ganaderia/floricultura/SUSTRATO/21%20An%20lisis%20del%20agua%20de%20riego%20utilizado%20FINAL.doc). (Consultada el día 28 de agosto del 2008)

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 2008. (En línea). Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Limites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilizacion. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html> (Consultada el día 29 de agosto del 2008).

Navarro J.P y López R. 2008. (En línea) Nicotiana glauca metales pesados en suelos. Abba Chlorobia. www.cierval.es/oku-oct-4.htm (Consultada el día 29 de agosto del 2008).

Orden Jurídico 2008. (En línea). PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. [http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Proyectos/111112005\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Proyectos/111112005(1).pdf) (Consultada el día 28 de Abril del 2008).

Puga S., M. Sosa, T. Lebgue, C. Quintana, A. Campos 2008. Contaminación de Metales Pesados en Suelos Provocados por la Industria Minera. Ecología Aplicada. Vol. 5. Num. 002. Universidad Agraria de Perú. Pág. 149-155.

Peñoles 2008. (En línea). Peñoles. http://www.penoles.com.mx/penoles/sobre_penoles/perfil/mision.php (Consultado el día 29 de Marzo del 2008).

Pérez J. García G y Esparza F. 2002 (En línea). Papel Ecológico de la Flora Risosferica en la Fitorremediación. www.cinvestav.mx/publicaciones/avayper/sepoct02/PAPELECOLOGICO.PDF (Consultada el día 13 de Septiembre de 2006).

Petersen, F. 1996. Water testing and interpretation. En *Water, media and nutrition for greenhouse crops*. Editado por D. Reed. Pág. 31-45.

Pineda, H. R. 2004. Presencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Contribución de *Glomus Intraradices* en la Absorción y Translocación de Cinc y Cobre en Girasol (*Helianthus Annuus L.*) Crecido en un Suelo Contaminado con Residuos de Mina. Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Tecomán, Colima.

Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., Toro, L. 2004. Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area: Pollution Detection and Affinity Series. *Environmental Pollution*, 132, pág. 189-201.

Rafael, I. J. 2006. (En línea). Plomo. <http://webdelprofesor.ula.ve/farmacia/lunajr/escuela/plomo.ppt#257,1,Plomo> (Consultada el día 26 de septiembre de 2006).

Ramos, B. R., L.J. Cajuste, R. D. Flores, N. E. García C. 2001. Metales Pesados, Sales y Sodio en Suelos en Chinampa en México. Artículo en *Agrociencia*. Pág. 385-395.

Ross, S.M. 1994. Sources and Forms of Potentially Toxic Metals in Soil-Plant Systems., p. 3–26, In S. M. E. Ross, ed. *Toxic Metals in Soil-Plant Systems*. John Wiley and Sons, England, UK.

Rosado Jorge L. 2008. Deficiencia de Zinc y sus Implicaciones Funcionales. Vol. 6 No. 4 2005, México, DF.

Rodríguez G. 2007. Determinación de la capacidad de retención del plomo en la planta de geranio (*Pelargonium* spp) en diferentes puntos aledaños y lejanos de la industria Met-Mex Peñoles. Trabajo de tesis. Torreón, Coahuila, México. Julio 2007.

Saval S. 1997. (En línea). La Reparación del Daño Aspectos Técnicos: Remediación y Restauración. www.bibliojuridica.org/libros/1/141/9.pdf. (Consultada el día 12 de Septiembre de 2006).

Smith, S.R 1996. Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment, Wallingford, UK.

Singh, O.V., S. Labana, G. Pandey, R. Budhiraja y R.K. Jain. 2003. Phytoremediation: An Overview of Metallic Ion Decontamination From Soil. Applied Microbiology and Biotechnology. 61: 405-412.

Salisbury, B. F. y C. W. Ross. 1994. Fisiología vegetal. Editorial Iberoamericana S.A. de C. V. México D.F. 759 p.

Sauquillo, A., Rigol, A. y Rauret, G. 2003. Overview of the use of Leaching/Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. Trends in Analytical Chemistry, 22, pp. 152-159.

Universidad Autónoma de Zacatecas 2005. (En línea), Evaluación de Riesgos Ambientales por Plomo en la Población de Beta Grande Zacatecas. http://www.ine.gob.mx/dgicurg/download/Inf-Vetagrande%20final-1004-e_ine%20final.pdf. (Consultada el día 6 de Septiembre de 2006).

- Universidad de Sevilla 2008. (En línea). Reutilización de Aguas Residuales. Riego Agrícola. <http://tar5.eup.us.es/tar/ebliblioteca/documentacion/rieg-agr.htm> (Consultada el día 29 de agosto del 2008)
- Valdez. 2001. (En línea). Contaminación por Metales Pesados en Torreón, Coahuila. <http://www.jornada.unam.mx/2001/04/30/eco-valdez.html>. (Consultada el día 7 de Septiembre de 2006).
- Vázquez M. D 2001. (En línea). Uso de especies vegetales para controlar superficies contaminadas. Ecotropia. www.ecotropia.com. (Consultada el día 29 de Octubre del 2006).
- Valdés P., F. y V.M. Cabrera 1999. La Contaminación por Metales Pesados en Torreón, Coahuila, México 1ª Ed. Texas Center for policy studies, CILADHAC, Torreón, Coahuila, México.
- Viniegra G, R. Escobar., E. Borja., y P.J. Caballero 1964. La polucion atmosférica e hídrica de Torreón, Coahuila, Salud Pública México.
- WHO 1992. Cadmium. Environmental Aspects. WHO Finlandia.
- Walker D.J., Vázquez S., Clemente R., Bernal M.P. 2007. (En línea). Aplicación de la Fitorremediación a los Suelos Contaminados por Metales Pesados en Aznalcóllar. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente N°. 2. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2389375> (Consultada el día 6 de septiembre del 2008)
- Xiong, Z. T. 1997. Bioaccumulation and Physiological Effects of Excess Lead in a Roadside Pioneer Species *Sonchus Oleraceus* L. Environmental Pollution 97 (3): 275 279.