

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISION DE CARRERAS AGRONOMICAS



**FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CON PASTO RYE GRASS CONTAMINADOS
POR PLOMO.**

POR:

MARCELINA SÁNCHEZ DÍAZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE 2014.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

FITORREMEDIACION DE SUELOS CON PASTO RYE GRASS
CONTAMINADOS POR PLOMO.

TESIS:

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ DE ASESORIA COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES.

APROBADA POR EL COMITÉ ASESOR:

Asesor Principal:


M.C. MIGUEL ANGEL URBINA MARTINEZ

Asesor:

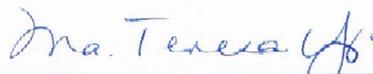

DR. LUIS JAVIER HERMOSILLO SALAZAR.

Asesor:


DR. ANSELMO GONZÁLEZ TORRES

Asesor:


DR. JOSE LUIS REYES CARRILLO



DRA. MA TERESA VALDES PEREZGASGA
COORDINADOR INTERINO DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE 2014.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

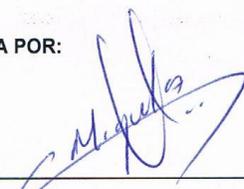
FITORREMEDIACION DE SUELOS CON PASTO RYE GRASS
CONTAMINADOS POR PLOMO.

TESIS:
QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

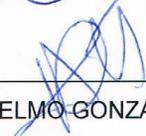
Presidente:


M.C. MIGUEL ANGEL URBINA MARTINEZ

Vocal:

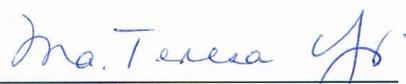

DR. LUIS JAVIER HERMOSILLO SALAZAR.

Vocal:


DR. ANSELMO GONZÁLEZ TORRES

Vocal Suplente:


DR. JOSÉ LUÍS REYES CARRILLO


DRA. MA. TERESA VALDES PEREZGASGA
COORDINADOR INTERINO DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE 2014.

AGRADECIMIENTOS

ADIOS

Agradezco a Dios por el regalo de la vida, por la familia y por brindarme muchas oportunidades en mi vida, por poner a personas y bendiciones en mi camino, que formaron parte de este gran logro. Gracias padre Dios.

AMIALMATERRAMATER

Gracias por permitirme realizar mi más grande meta terminar una carrera así como también, mi desarrollo personal durante estos 4 años y medio.

AMISASESORES

Al M.C. Miguel Ángel Urbina Martínez, Dr. Anselmo González Torres, Dr. Javier Hermosillo Salazar, Dr. José Luis Reyes Carrillo por el esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, sus experiencias, su paciencia y su motivación ha logrado que terminara con éxito este trabajo.

AMISMAESTROS

A todos mis maestros de la carrera por sus conocimientos, consejos, confianza y formación. Un agradecimiento especial al P.H.D. Vicente de Paúl Álvarez Reyna por su invaluable apoyo y confianza.

DEDICATORIAS

AMIS PADRES

Con todo mi amor, admiración y gran respeto. Mil gracias por sus consejos, comprensión, sacrificios y apoyo que siempre me han dado, no tengo palabras para agradecerles. Que Dios siempre esté con ustedes colmándolos de amor y bendiciones todos los días de su vida.

AMIS HERMANOS

A todos mis hermanos por el cariño, el apoyo que me han brindado; especialmente a mi hermano Migue que ha sido la principal persona que me ha impulsado a culminar mi carrera, ayudándome siempre en las buenas y en las malas. Los amo.

AL DR. ANSELMO GONZÁLEZ TORRES

A ti por tu apoyo, comprensión, amistad y por haberme dado un espacio en tu vida, por haber estado conmigo por levantarme y animarme de todos los obstáculos que se presentaron durante mi estancia universitaria a ti de todo corazón. Gracias.

AMIS AMIGOS

Bella Raquel, Lourdes, Angy, Saúl Eduardo, Rigoberto, Pbro. Juan José, Pbro. José Luis, por estar siempre conmigo compartiendo momentos tristes y felices, por regalarme su amistad incondicional.

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”
Filipenses 4, 13

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| I.- INTRODUCCION | 1 |
| 1.1.- OBJETIVO | 3 |
| 1.2.- HIPÓTESIS | 3 |
| II.- REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 2.1.- METALES PESADOS EN EL AMBIENTE..... | 5 |
| 2.2.- EFECTO DE LOS METALES PESADOS EN EL SUELO..... | 6 |
| 2.3.- MOVILIZACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO | 7 |
| 2.4.- PLOMO (PB)..... | 8 |
| 2.5.- FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE PB EN MÉXICO | 9 |
| 2.6.- PROBLEMAS DEL PB EN NUEVO LEON. | 10 |
| Figura 1. Fuentes de contaminación por plomo..... | 10 |
| 2.7.- EFECTO DEL PLOMO EN LA SALUD..... | 11 |
| 2.8.- PLOMO EN EL MEDIO AMBIENTE..... | 11 |
| Cuadro 1. Límites máximos permisibles de diferentes contaminantes en el suelo..... | 13 |
| 2.9.- FITORREMEDIACIÓN..... | 14 |
| Figura 2. Esquema general de la descontaminación de iones metálicos en un proceso natural de fitorremediación | 15 |
| 2.10.- FITOEXTRACCIÓN..... | 16 |
| 2.11.- PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE METALES PESADOS | 16 |
| Cuadro 2. Número de plantas hiperacumuladoras de metales en el mundo | 17 |
| 2.12.- INVESTIGACIONES SOBRE LA FITORREMEDIACIÓN | 18 |
| 2.13.- SUELOS SALINOS | 19 |
| 2.14.- FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LA FORMACIÓN DEL SUELO SALINO..... | 20 |
| 2.15.- FUENTES DE SALES SOLUBLES | 20 |
| 2.16.- EFECTO DE LAS SALES SOBRE LOS SUELOS | 21 |
| 2.17.- EFECTO DE LAS SALES SOBRE LAS PLANTAS | 22 |
| 2.18.- SUELOS SÓDICOS | 24 |
| 2.19.- SUELOS SALINO-SÓDICOS..... | 26 |
| 2.20.- ACUMULACIÓN DE SODIO INTERCAMBIABLE EN LOS SUELOS | 27 |
| III.- MATERIALES Y MÉTODOS | 28 |
| 3.1.- CARACTERÍSTICAS GENERALES | 28 |
| 3.2.- CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS DEL SITIO | 28 |
| 3.3.- CLIMA | 28 |
| Figura 3. Mapa de localización del sitio experimental | 29 |
| Figura 4. Refinería "Ing. Héctor R. Lara Sosa" | 29 |
| 3.4.- MATERIALES | 30 |
| 3.4.1.- Suelo | 30 |
| 3.4.2.- Acondicionadores | 30 |
| 3.4.3.- Planta..... | 30 |
| 3.5.- METODOLOGÍA..... | 31 |
| Cuadro 3. Características físicas y químicas del suelo utilizado. | 31 |
| 3.5.1.- Procedimiento del experimento | 32 |
| 3.5.2.- Riegos..... | 32 |
| 3.5.3.- Fertilización | 32 |
| 3.5.4.- Control de Enfermedades..... | 32 |
| 3.5.5.- Descripción de los Tratamientos..... | 33 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 4. Distribución de los tratamientos | 33 |
| 3.5.6.- VARIABLES EVALUADAS..... | 33 |
| 3.5.7.- Salinidad | 33 |
| 3.5.8.- Acumulación de Pb en Tejido..... | 34 |
| 3.5.9.- Por ciento de Sodio Intercambiable | 34 |
| 3.5.10.- Pb en Suelo | 34 |
| IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 35 |
| 4.1.- Salinidad del Suelo | 35 |
| Cuadro 5. Características químicas medidas a un suelo contaminado con plomo, de origen industrial. | 36 |
| 4.2.- FITOEXTRACCIÓN DE PB POR EL TEJIDO VEGETAL DE RYE GRASS | 37 |
| Cuadro 6. Fitoextracción total de plomo por el pasto Rye grass en un suelo contaminado de origen industrial. | 38 |
| 4.3.- CONTENIDO DE PB (MG/KG) EN SUELO ANTES Y DESPUÉS DE LA FITOEXTRACCIÓN | 39 |
| Cuadro 7. Contenido total de Pb (mg/kg) en el suelo contaminado de origen industrial antes y después de la fitoextracción..... | 39 |
| V.- CONCLUSIONES | 40 |
| 5.1.- RECOMENDACIONES..... | 41 |
| VI.- LITERATURA CITADA..... | 42 |

RESUMEN

El pasto Rye Grass perenne se adapta en zonas entre los 1800 y 3600 msnm, arriba de los 3000 msnm su crecimiento se reduce y los períodos de recuperación se deben prolongar entre 2 y 4 semanas. Los suelos donde crece deben ser de media a alta fertilidad, con un drenaje adecuado y pH superior a 5,5; es exigente a la nutrición de nitrógeno, fósforo y potasio (University, 1999(En línea)). Esta gramínea es poco afectada por plagas y enfermedades; de éstas últimas la más común es la pudrición de la corona causada por *Puccinia coronata*, sin embargo dichos ataques pueden ser controlados con pesticidas (Vélez *et al.*, 2002).

Los suelos forman parte importante de todo cuerpo de agua, en ellos se acumulan contaminantes tales como los metales pesados, los cuales provienen principalmente de fuentes antropogénicas como son los desechos provenientes de la agricultura. El presente estudio se realizó con el objetivo de determinar la concentración de metales pesados especialmente el Pb en los suelos presentes de la refinería **“Ing. Héctor R. Lara Sosa”**, y realizar una comparación de las concentraciones con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad internacional ya que en México no existe normatividad referente a sedimentos. Se realizaron los muestreos en varias etapas, se colectaron muestras de suelo de la planta ya mencionada. Para determinar la concentración de metales pesados se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica modelo Perkin Elmer 2380, el cual es un aparato muy utilizado para el estudio cuantitativo de casi todos los metales de la tabla periódica. Con base en los resultados obtenidos, se observó la presencia de plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), cadmio (Cd), nitratos (NO₃) y materia orgánica. Se determinó que el metal encontrado en mayor concentración es el zinc. Pero nos pudimos dar cuenta que el metal en estudio se encuentra presente en todos los experimentos entonces, la presencia de metales encontrados especialmente es Plomo y es posible que se deba a las condiciones de trabajo de las minas y desechos de la refinería **“Ing. Héctor R. Lara Sosa”**, en Cadereyta Jiménez Nuevo León.

Palabras Clave: Plomo, Suelo, Contaminación, Minas, Desechos, Antropogénicas.

I.- INTRODUCCION

El desarrollo económico que trajo consigo la revolución industrial iniciada hace más de 200 años llevo a considerar a las industrias como signo de prosperidad. No fue hasta los descubrimientos de los daños ocasionados a los ecosistemas y a la alteración de la calidad del aire, el suelo y el agua, que se tomó conciencia de que el crecimiento económico puede, también, traer consigo efectos indeseables (Maqueda-Gálvez, 2013(En línea)).

El estrés abiótico es uno de los factores ambientales más dañino que enfrenta una planta y de entre ellos destacan los metales pesados en el suelo, los cuales son tóxicos para la misma. Este es un problema ambiental, así como un riesgo para la salud humana (Milner y Kochian, 2008).

La presencia de los metales pesados también reduce la cosecha ya que interfiere con el crecimiento de las plantas (Satoh-Nagasawa *et al.*, 2013). Los metales pesados no son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos (Rizzo *et al.*, 2010).

Concentración de metal total en el suelo no se corresponde necesariamente con la biodisponibilidad de metal. La biodisponibilidad de los metales pesados depende de un número de factores físicos y químicos en el suelo. Estos incluyen las propiedades del suelo por ejemplo pH, contenido de materia orgánica, sulfato, carbonato, hidróxido, la textura del suelo y el contenido de arcilla.

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en unas concentraciones que superan el poder de amortiguación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades. Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas exógenas, aunque también se puede producir de forma natural o endógena cuando los procesos de edificación liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos (Ortíz-Bernad *et al.*, 2007).

Esto no significa que el plomo sea el más tóxico de estos elementos de hecho ocurre lo contrario sino a que han sido utilizados por la humanidad más ampliamente y por ende

es el que causa más problemas y más preocupación en todo el mundo.

Valdría la pena estar conscientes de este hecho y no tener la impresión que es el plomo el único contaminante que nos preocupa (Valdés-Perezgasga y Cabrera-Morelos, 1999(En línea)).

La importancia de la hiperacumulación se da por que los metales pesados están presentes de forma natural en los suelos, pero en los últimos años las actividades industriales y la deposición de residuos tóxicos de todo tipo han contribuido a la acumulación de estos elementos en los suelos. A menudo la contaminación por metales pesados está directamente causada por la actividad industrial y minera, pero los casos más graves se han dado de forma accidental Metales como el Pb, Hg, Cd, As, Se y Cr son muy dañinos para la salud humana y para la de la mayoría de organismos vivos (Llugany *et al.*, 2007).

1.1.- OBJETIVO

Determinar la concentración de Plomo en cultivos de Rye Grass en la fitorremediación de un suelo contaminado con plomo, por actividad industrial.

1.2.- HIPÓTESIS

Las concentraciones de plomo y metales pesados presentes en los suelos rebasan el límite máximo permisible según la norma establecida.

II.- REVISIÓN DE LITERATURA

Los metales pesados constituyen un grupo cercano a los 40 elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm³. El rasgo distintivo de la fisiología de los metales pesados, es que aun cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento como el Na, K, Mg, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, y Mo, se ha reportado que también tienen efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas (Cañizares-Villanueva, 2000). Los metales pesados son parte fundamental de las fuentes antropogénicas provenientes de desechos domésticos, agrícolas e industriales, los cuales son peligrosos para la biota marina, el hombre y el deterioro ambiental en general (Castro y Valdés, 2012).

Los metales pueden ser oxidados, reducidos o complejados, dependiendo del dinamismo del entorno químico en el que se localicen (García-Céspedes *et al.*, 2004).

Los metales pesados son especialmente interesantes desde el punto de vista ambiental y toxicológico por su alta toxicidad y su bioacumulación (Villalobos-Jáuregui *et al.*, 2006). La toxicidad del plomo fue conocida por los antiguos egipcios quienes lo usaron como veneno con propósitos homicidas. No solamente los romanos y egipcios usaron el plomo sino que también lo hicieron los antiguos griegos. Geólogos franceses han descubierto que la nieve que cayó durante el tiempo de la dominación griega, contenía una inesperada alta concentración de plomo. El monto de plomo precipitado de la atmósfera entre el año 500 A.C. y el 300 D.C. representó un 15% de la contaminación causada en este siglo por la gasolina. Hay evidencias de su uso en China y en México pre-colombino (Emsley, 1994).

En Tiempos más Recientes, el desarrollo de procesos industriales usando plomo ha sido extraordinario y, a pesar de las evidencias de envenenamientos, todavía está siendo usado en el ámbito mundial. El uso del plomo se ha incrementado considerablemente en este siglo y continúa haciéndolo. En consecuencia, ahí la necesidad de reducir significativamente el contaminante del ambiente y controlar la exposición de los seres humanos a su toxicidad. La contaminación del ambiente es perversa en las sociedades industrializadas (Aranguren, 1999).

2.1.- METALES PESADOS EN EL AMBIENTE

Los metales pesados contribuyen fuertemente a la contaminación ambiental, 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 (Sauve *et al.*, 2000). Además son definidos como elementos con propiedades metálicas (conductibilidad, ductilidad, etc.), número atómico mayor de 20, y cuya densidad es mayor a los 5 g cm³. Se consideran metales pesados el plomo cadmio, cromo, mercurio, zinc, cobre, plata y arsénico, constituyen un grupo de gran importancia, ya que algunos son esenciales para las células, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos, tales como humanos, organismos del suelo, plantas y animales (Spain y Alm, 2003).

Estos contaminantes pueden alcanzar niveles de concentración que provocan efectos negativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas como: reducción del contenido de materia orgánica, disminución de nutrimentos, variación del pH generando suelos ácidos, amplias fluctuaciones en la temperatura, efectos adversos en el número, diversidad y actividad en los microorganismos de la rizósfera, dificultan el crecimiento de una cubierta vegetal protectora favoreciendo la aridez, erosión del suelo, y la dispersión de los contaminantes hacia zonas y acuíferos adyacentes y como consecuencia aumenta la vulnerabilidad de la planta al ataque por insectos, plagas y enfermedades, afectando su desarrollo (Zhang *et al.*, 2000).

Las principales fuentes de metales pesados son actividades naturales, como desgastes de cerros, volcanes, que constituyen una fuente relevante de los metales pesados en el suelo, así como también actividades antropogénicas como la industria minera que está catalogada como una de las actividades industriales más generadora de metales pesados. En el suelo, los metales pesados, están presentes como iones libres, compuestos metálicos solubles, compuestos insolubles como óxidos, carbonatos e hidróxidos (Pineda-Hernández, 2004(En línea)).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos; oligoelementos o micronutrientes: son los requeridos en pequeñas cantidades o cantidades traza por plantas y animales y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos.

Como el As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn y metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva apareja disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos, el Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Tl (García y Dorronsoro, 2005(En línea)).

2.2.- EFECTO DE LOS METALES PESADOS EN EL SUELO

Cuando el contenido de metales pesados en el suelo alcanzan niveles que rebasan los límites máximos permitidos causan efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas, y un disturbio funcional en otros componentes del ambiente así como la disminución de las poblaciones microbianas del suelo, el término que se usa o se emplea es “polución de suelos” (Martín, 2003).

En el suelo, los metales pesados están presentes como iones libres, compuestos metálicos solubles, compuestos insolubles como óxidos, carbonatos e hidróxidos. Su acción directa sobre los seres vivos ocurre a través del bloqueo de las actividades biológicas, es decir, la inactivación enzimática por la formación de enlaces entre el metal y los grupos SH (sulfhidrilos) de las proteínas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos. La contaminación en suelos por metales pesados ocurre cuando estos son irrigados con aguas procedentes de desechos de minas, aguas residuales contaminadas de parques industriales y municipales y filtraciones de presas de jales (Wang y Chao, 1992).

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-Hernández, 2004(En línea)).

2.3.- MOVILIZACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO

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).

La movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea y difiere de si su origen es natural o antrópico y, dentro de este último, al tipo de fuente antrópica (Burt *et al.*, 2003).

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).

En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías: quedan retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del suelo y/o precipitados como sólidos puros o mixtos; pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas; pasan a la atmósfera por volatilización y se movilizan a las aguas superficiales o subterráneas (García y Dorronsoro, 2005(En línea)).

Para elucidar el comportamiento de los metales pesados en los suelos y prevenir riesgos tóxicos potenciales se requiere la evaluación de la disponibilidad y movilidad de los mismos (Banat *et al.*, 2005). La toxicidad de los metales depende no sólo de su concentración, sino también de su movilidad y reactividad con otros componentes del ecosistema (Abollino *et al.*, 2002).

2.4.- PLOMO (PB)

Se ubica en el grupo IV A (metales) en la tabla periódica. El Pb es un metal gris azulino que se presenta en forma natural y en pequeñas cantidades (0.002%) en la corteza terrestre. Este elemento, es generalmente obtenido de la galena (PbS), la anglesita (PbSO₄) y la curocita (PbCO₃). El Pb es tóxico para el sistema nervioso y se asocia con la depresión de muchas funciones endócrinas, aunque no hay evidencia de efectos teratogénicos o carcinogénicos. El uso más amplio del Pb elemental es para la fabricación de acumuladores; también es usado para la fabricación de tetra-etilo de plomo, pinturas, cerámicas, forros para cables, elementos de construcción, vidrios especiales, pigmentos, soldadura suave y municiones (ATSDR, 1999(En línea)).

El Pb, en el suelo, se encuentra principalmente en forma de Pb²⁺, también es conocido su estado de oxidación +4. Algunos de los compuestos insolubles son Pb(OH)₂, PbCO₃,

PbS, PbSO₄. La velocidad de oxidación depende de factores como la humedad, la temperatura, el pH, el potencial redox, la cantidad de materia orgánica o la roturación de los suelos (Guitart y Vernon, 2005).

2.5.- FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE PB EN MÉXICO

Hace 15 años, varios médicos especialistas en salud pública formaron un grupo de estudio para medir el efecto de la contaminación por plomo en la población del área metropolitana de la ciudad de México. La exposición al metal provenía de fuentes tan variadas como la soldadura, la gasolina, las pinturas y la cerámica. El afamado Centro de Control de Enfermedades de Atlanta, en Estados Unidos, había fijado los niveles máximos tolerables de plomo en sangre para así definir, de manera más precisa, los peligros que enfrentaba la población y la necesidad de que las autoridades controlaran las fuentes emisoras y protegieran así la salud de las personas. El plomo podía llegar al organismo humano a través del aire inhalado, el polvo, el agua y la comida. Las principales vías de absorción eran el sistema respiratorio y el aparato digestivo (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005)

México figura entre los 15 países de mayor producción de plomo, utilizado en diversos procesos industriales: desde tetratelo de plomo hasta baterías, pigmentos, pinturas y soldaduras. Más de la mitad de la producción nacional se exporta.

Mejorar la calidad de la gasolina fue precisamente uno de los programas oficiales que recibieron atención prioritaria a partir de los años 80 del pasado siglo, en especial para eliminar el tetratelo de plomo. También controlar las emisiones de las industrias que, como las de fundición, las fábricas de acumuladores y los cientos de talleres de reparación de éstos, emitían al aire variadas cantidades de ese metal, que luego se depositaban en el polvo, el agua y el suelo y terminaban finalmente en el cuerpo humano (Seoáñez-Calvo, 1999).

Hace 20 años también la pintura que se usaba, por ejemplo, para señalamientos de vialidad y ciertos útiles escolares, como los lápices de colores, tenían alta concentración de plomo que finalmente afectaba a la población expuesta.

2.6.- PROBLEMAS DEL PB EN NUEVO LEON.

El plomo (Pb) es un contaminante ambiental mayor y altamente tóxico para el hombre. Su presencia en el ambiente se debe principalmente a actividades antropogénicas como la industria, minería, fundición y al uso que se dio de gasolinas con plomo. El plomo generado de esas actividades puede permanecer como residuo por 1000 a 3000 años en el suelo. Por lo anterior los altos contenidos de plomo en el suelo pueden provocar problemas de toxicidad en plantas, animales y humanos. En México se han sido reportados algunos casos de contaminación; en Monterrey, Nuevo León se encontró que los contenidos de plomo en suelos de un parque público y de un lote urbano fueron de 492 y 764 mg de plomo kg^{-1} de suelo, respectivamente. En México, cuando un suelo se encuentra contaminado por un residuo peligroso, como puede ser el plomo, la legislación ambiental establece que se deben llevar a cabo acciones para recuperar sus condiciones originales de tal manera que pueda ser utilizado en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo humano. (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2006).

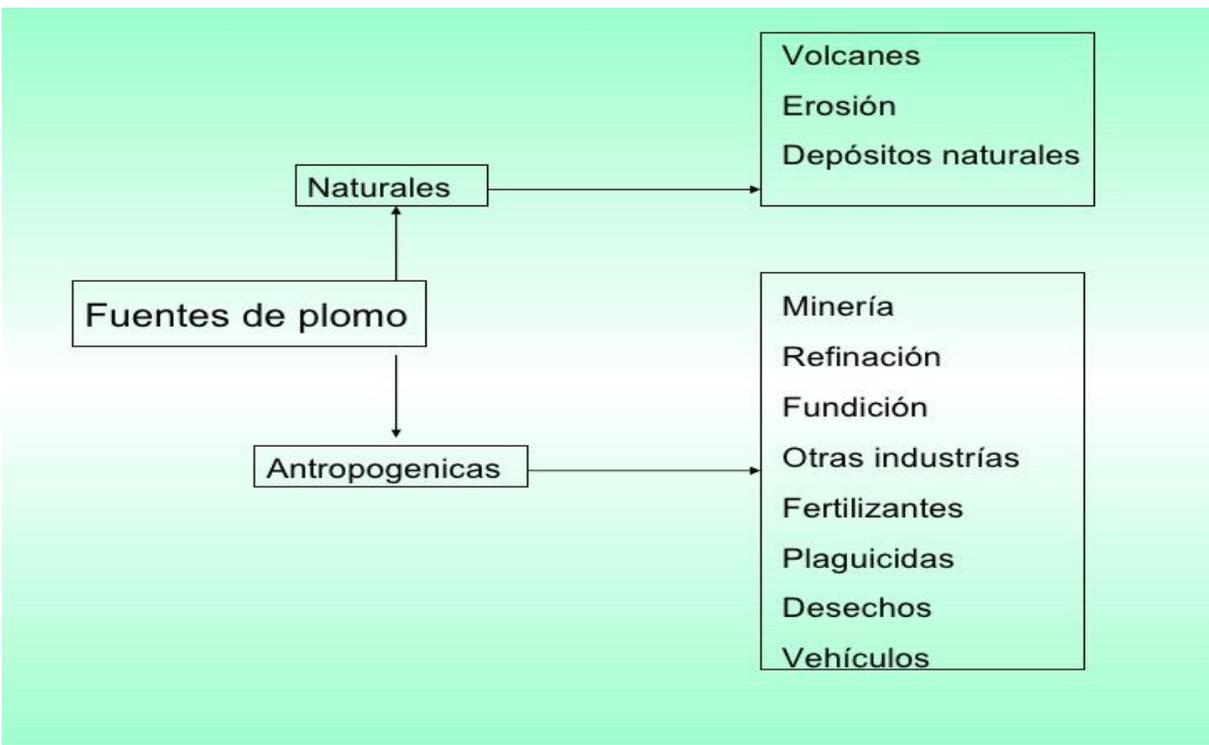


Figura 1. Fuentes de contaminación por plomo.

2.7.- EFECTO DEL PLOMO EN LA SALUD

El plomo es un elemento que no cumple ninguna función vital en el organismo humano y que resulta tóxico incluso en pequeñas dosis. Puede afectar a casi todos los órganos y sistemas en el cuerpo. El más sensible es el sistema nervioso, tanto en niños como en adultos. Los efectos del plomo en la salud de los niños pueden incluir problemas de comportamiento y de aprendizaje (hiperactividad), crecimiento atrasado, problemas auditivos, dolores de cabeza y daño al cerebro y al sistema nervioso central. Los adultos expuestos al plomo pueden sufrir de problemas reproductivos, presión sanguínea alta, trastornos digestivos, dolor en los músculos y en las coyunturas, problemas de memoria y de concentración y trastornos nerviosos (Matte, 2003).

El plomo se fija a las enzimas y altera la estructura y función de muchas proteínas, interfiriendo así con la acción y la finalidad de muchos tipos diferentes de células del cuerpo. Estos cambios pueden ocasionar daños permanentes a los órganos en crecimiento y en desarrollo, en especial al sistema neurológico de los niños, y es muy difícil revertir los efectos. Penetra en el cuerpo no sólo por vía oral, sino también por las vías respiratorias. Los niños que viven cerca de una fundición de plomo o una planta manufacturera de baterías para vehículos corren el gran riesgo de quedar expuestos a la toxicidad de ese elemento (Buka, 2001).

2.8.- PLOMO EN EL MEDIO AMBIENTE

La contaminación está acabando con la vida de muchas especies. Cada día aumenta su proporción en nuestro planeta siendo el ser humano el mayor causante de esta avería, sabiendo que el humano, el ser más inteligente sería tan incapaz de cuidar su propio planeta... Ahora estamos en el siglo XXI, ha empeorado las cosas ya que han inventado tantos materiales químicos que están dañando demasiado a nuestro planeta. La polución, la basura, la destrucción de la capa de ozono son factores que destruyen al medio ambiente. Puntos principales en contaminación, fábricas que despiden mucho humo que contamina el aire que espiramos.

La superpoblación está acabando con las áreas verdes, el uso desmesurado de los terrenos de cultivo y los bosques no permite la oxigenación del medio ambiente. Los

vehículos que también despiden anhídrido carbónico contaminando el aire que respiramos.

Quema de basura ilógicamente, los desechos tóxicos de fábricas que son arrojados inescrupulosamente a los ríos y mares contaminándolos, llegando hasta en ciertas oportunidades a matar a los animales y peces que viven en ese hábitat. La consecuencia de toda esta contaminación está haciendo que haya un calentamiento global, se derriten los glaciales y eso provoca cambios bruscos del clima, ocasionando tormentas que jamás han tenido tal intensidad y en lugares que hacía mucho tiempo no se presentaban, tornados, maremotos, terremotos, tifones.... Creando el hueco de la capa de ozono, dejando entrar rayos ultravioletas que van directamente a la piel del humano provocando enfermedades de la piel exactamente cáncer (Alloway, 1995).

Lo que el ser humano podría hacer para terminar con la contaminación del medio ambiente es evitar la tala indiscriminada de árboles en los bosques, pues es la única fuente de oxígeno para el planeta. Evitar contaminar los mares y ríos, que nos proporcionan el agua para poder vivir. Crear alguna forma de reciclaje para los desechos tóxicos para no contaminar el planeta. Evitar que la atmósfera de nuestro planeta se siga contaminando con el anhídrido carbónico de los vehículos. Y el no uso de los aerosoles que siguen dañando la capa de ozono.

Si el ser humano pusiera más de su parte para preservar todas las maravillas que el planeta tiene como son la fauna, flora, clima, atmósfera, ríos, mares, bosques y nosotros mismos, podríamos vivir en un planeta hermoso (Huang, 1999).

En virtud de que los elementos contaminantes pueden estar presentes en el suelo de manera natural y en ocasiones en concentraciones tales que pueden representar un riesgo para la salud de la población humana o de los ecosistemas, es importante establecer criterios para determinar la contaminación antropogénica en suelos y en su caso las concentraciones de remediación. Existen límites máximos permisibles para suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Cuando al menos una de las concentraciones de estos elementos se encuentre por arriba de los límites máximos permitidos es necesario implementar acciones de remediación (Cuadro 1).

Cuadro 1. Límites máximos permisibles de diferentes contaminantes en el suelo.

| Contaminante | Uso agrícola/residencial (mg/kg) | Uso industrial (mg/kg) |
|---------------------|---|-------------------------------|
| Arsénico | 22 | 260 |
| Berilio | 150 | 1900 |
| Cadmio | 37 | 450 |
| Cromo Hexavalente | 280 | 510 |
| Mercurio | 23 | 310 |
| Níquel | 1600 | 20000 |
| Plomo | 400 | 750 |
| Selenio | 390 | 5100 |
| | | 67 |
| | | 7200 |

PROY-NOM-147 SEM ARNAT/S SA1-2004.

2.9.- FITORREMEDIACIÓN

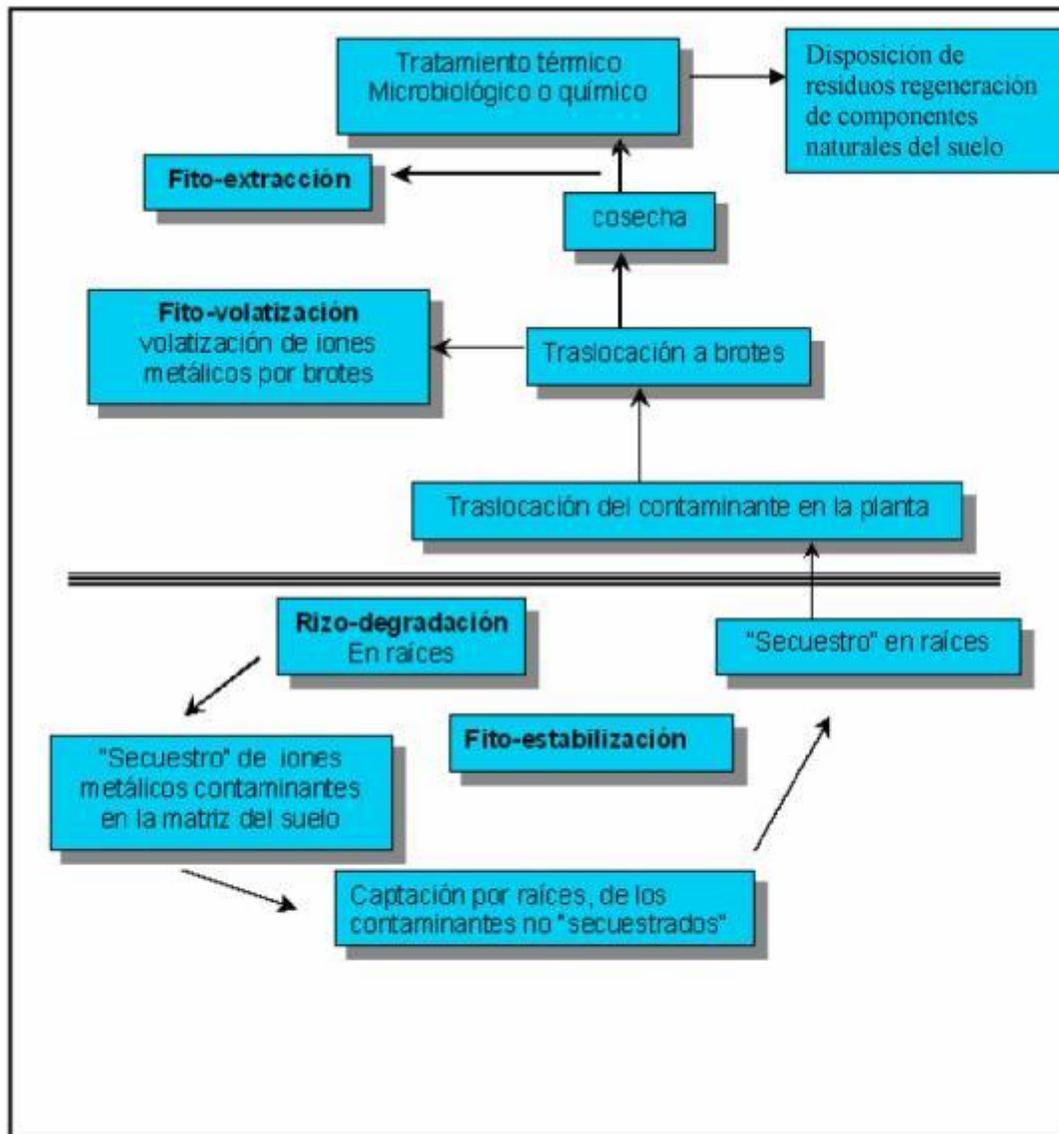
La fitorremediación es la descontaminación de los suelos, la depuración de las aguas residuales o la limpieza del aire interior, usando plantas vasculares, algas (ficorremediación) u hongos (micorremediación), y por extensión ecosistemas que contienen estas plantas. Así pues, se trata de eliminar o controlar las diversas contaminaciones. La degradación de compuestos dañinos se acelera mediante la actividad de algunos microorganismos (Ernst, 2000).

La fitorremediación es el uso de plantas para recuperar suelos contaminados, es una tecnología *in situ* no destructiva y de bajo costo y está basada en la estimulación de microorganismos degradadores (Merkl *et al.*, 2004). Consiste en el uso de plantas, sus microorganismos o enzimas asociadas, así como de la aplicación de técnicas agronómicas para degradar, retener o reducir a niveles inofensivos los contaminantes ambientales a través de procesos que logran recuperar la matriz o estabilizar al contaminante. Dentro de las técnicas de restauración de suelos afectados por la contaminación, la fitorremediación ha adquirido auge por ser un procedimiento pasivo, estéticamente agradable, útil para remediar simultáneamente una gran variedad de contaminantes (Frick *et al.*, 1999).

En estudios recientes se ha demostrado que la fitorremediación es una solución prometedora para la limpieza de sitios contaminados por una variedad de metales, aunque también tiene una serie de limitaciones (Singh *et al.*, 2003b), además, es un proceso de descontaminación que involucra el empleo de plantas que pueden remover, transferir, estabilizar, descomponer y/o degradar contaminantes de suelo, sedimentos y agua, como solventes, plaguicidas, hidrocarburos poliaromáticos, metales pesados, explosivos, elementos radiactivos, fertilizantes, para hacerlos más biodisponibles para la planta (McGrath *et al.*, 2001).

La fitorremediación aplicada a suelos contaminados con elementos o compuestos inorgánicos, incluye, básicamente, tres mecanismos: la fitoextracción o fitoacumulación, la fitoestabilización y la fitovolatilización (Figura 1) (Prasad y Freitas, 2003; Singh *et al.*, 2003a).

Figura 2. Esquema general de la descontaminación de iones metálicos en un proceso natural de fitorremediación



Fuente: (Singh *et al.*, 2003a)

2.10.- FITOEXTRACCIÓN

La fitoextracción debe considerarse como una tecnología de largo plazo, que puede requerir de varios ciclos de cultivo para reducir la concentración de los contaminantes a niveles aceptables. El tiempo requerido depende de la concentración y tipo de contaminante(s), de la duración del periodo de crecimiento y de la eficiencia de remoción de la especie utilizada y puede tomar entre uno y 20 años (Prasad y Freitas, 2003). Esta técnica se encuentra todavía en su etapa inicial de investigación y de desarrollo, El número de pruebas de campo realizadas hasta la fecha es no obstante pequeña (Brown *et al.*, 2003), y está surgiendo como un método de rehabilitación atractivo debido a su simplicidad además su costo es relativamente bajo.

Entre las metodologías de limpieza para suelos contaminados por metales pesados, la técnica de fitoextracción a través de los tejidos de las plantas, presenta ventajas ecológicas y económicas. Esta opción de limpieza depende principalmente, de las condiciones del suelo y de la planta acumuladora (Pulford y Watson, 2003). Para mejorar el proceso de fito-extracción, la biodisponibilidad del contaminante hacia las raíces puede facilitarse a través de la adición de agentes acidificantes, de fertilizantes o quelantes (Prasad y Freitas, 2003).

2.11.- PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE METALES PESADOS

Todas las plantas poseen un potencial para absorber una amplia variedad de metales del suelo pero la mayor parte de las plantas tienden solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo. Existe una notable excepción de esta regla de un pequeño grupo de plantas que pueden tolerar, absorber y translocar altos niveles de ciertos metales, estas plantas reciben el nombre de hiperacumuladoras (Chen *et al.*, 2001).

Una definición propone que si una planta contiene más de 0.1% de Ni, Co, Cu, Cr y Pb o 1% del Zn en sus hojas sobre una base del peso seco, ésta puede ser llamada una “hiperacumuladora”, independientemente de la concentración del metal en el suelo (Robinson *et al.*, 2003).

Las primeras plantas hiperacumuladoras caracterizadas son miembros de las familias Brassicaceae y Fabaceae. El gran interés despertado por las plantas hiperacumuladoras, especialmente para destoxificar un ambiente contaminado, obliga también a resolver otros problemas relativos a otras disciplinas, hace hincapié en ello y destaca que, cuando se intensifique la investigación conjunta de diversos campos como botánica, fisiología vegetal, agronomía, química y genética, probablemente se inicie un brillante futuro para la fitorremediación. El entorno de las plantas hiperacumuladoras 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 ambiente (Cuadro 2) (Lasat, 2002).

Cuadro 2. Número de plantas hiperacumuladoras de metales en el mundo

| Metal | Número de taxones | Número de familias |
|-----------|-------------------|--------------------|
| Arsénico | 2 | 1 |
| Cadmio | 2 | 1 |
| Cobalto | 26 | 11 |
| Cobre | 35 | 15 |
| Plomo | 14 | 7 |
| Manganeso | 9 | 5 |
| Níquel | 317 | 37 |
| Selenio | 20 | 7 |
| Zinc | 13 | 5 |

(Basado en registros de Reeves & Baker 2000).

2.12.- INVESTIGACIONES SOBRE LA FITORREMEDIACIÓN

La etimología proviene del griego «phyton» = planta y del latín «remedium» = restablecer el equilibrio, la remediación. La fitorremediación no es un concepto nuevo, pues desde hace 3000 años los hombres han utilizado la capacidad natural de purificación de las plantas para el tratamiento del agua. Desde la década de 1970 esta práctica ha encontrado un renovado interés, en particular para el tratamiento de los plaguicidas y de los metales. La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que utiliza las plantas para reducir, degradar o inmovilizar compuestos orgánicos contaminantes (naturales o sintéticos), de la tierra, del agua o del aire y que provienen de las actividades humanas. Esta técnica también puede tratar la contaminación por compuestos inorgánicos (metales pesados o radioisótopos) (Xiong, 1997).

- Suelos: Esta técnica se utiliza para descontaminar biológicamente las tierras contaminada por metales y metaloides, plaguicidas, disolventes, explosivos, petróleo y sus derivados, radioisótopos y contaminantes diversos.
- Las aguas residuales: La fitorremediación también se utiliza para la descontaminación de las aguas cargadas de materia orgánica o contaminantes diversos (metales, hidrocarburos y plaguicidas).
- El aire: También se puede limpiar el aire de zonas cerradas a través de plantas que lo descontaminan (basado en la investigación Proyecto de Ley Wolverton para la NASA en los años 1980-90). Esta investigación se ha desarrollado significativamente en los últimos años.

La Fitorremediación es un término utilizado para describir el tratamiento de problemas ambientales a través de la utilización de plantas (Singh *et al.*, 2003a).

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. 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 (Christie *et al.*, 2004).

2.13.- SUELOS SALINOS

El término “salino” se aplica a todos aquellos suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor que 4 mmhos/cm. A 25° C, con un porcentaje de sodio intercambiable menor a 15%. Generalmente el pH es menor de 8.5. Casi siempre se reconocen los suelos salinos por la presencia de sales blancas de sal en su superficie. La salinidad de un suelo puede ocurrir cuando éste tiene un perfil característico y plenamente desarrollado, o cuando posee material edáfico no diferenciado como en el caso de un aluvión. Las características químicas de los suelos salinos quedan determinadas principalmente por el tipo y cantidad de sales presentes. El sodio rara vez representa más de la mitad del total de los cationes totales solubles y por lo tanto, no es absorbido en forma importante. Los aniones principales son el cloruro, el sulfato y a veces el nitrato. Pueden presentarse también pequeñas cantidades de bicarbonato, pero invariablemente los carbonatos solubles casi no se encuentran. Los suelos salinos casi siempre se encuentran floculados debido a la presencia de un exceso de sales y a la ausencia de cantidades significantes de sodio intercambiable. En consecuencia, la permeabilidad es igual o mayor a la de suelos similares no salinos (E.U.A., 1982).

Se considera que un suelo es salino cuando la concentración de sales solubles - principalmente cloruros y sulfatos y, en casos extremos, nitratos de sodio, calcio y magnesio- en la zona de raíces alcanza niveles demasiado altos para el crecimiento y producción óptimos de las plantas. Los suelos salinos se desarrollan preferencialmente en aquellas regiones donde las lluvias son insuficientes para recuperar las pérdidas de agua causadas por la evapotranspiración, condición en la cual se favorecen los procesos de concentración y precipitación de minerales en ausencia de un régimen de lavado también se pueden desarrollar en condiciones húmedas, bajo condiciones de alta demanda evaporativa, nivel freático superficial y actividad humana (García, 2003(En línea)).

Otra característica de un suelo salino es que en época de “secas” presentan dureza y costras blancas en la superficie del mismo lo que trae como consecuencia un efecto negativo sobre la vegetación y por ende sobre las poblaciones microbianas en los suelos (Churchman *et al.*, 1993).

La salinidad de los suelos en algunas de sus manifestaciones ha sido la causante, en mayor o menor grado, de la reducción en la capacidad productiva de los suelos de muchas regiones del mundo. La salinidad es común en las regiones áridas y semiáridas en donde la evapotranspiración excede a la precipitación y es necesario recurrir a la irrigación para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. Cuando las sales solubles se concentran en el perfil del suelo y exceden ciertos límites, se producen condiciones que afectan el crecimiento normal de las plantas; sus efectos son diversos y la intensidad de los mismos depende de la cantidad y tipos de sales predominantes, de factores del suelo, del clima, del régimen de lavado y del drenaje (García, 2003(En línea)).

2.14.- FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LA FORMACIÓN DEL SUELO SALINO

Los factores que tienen mayor influencia en la formación de los suelos salinos son: topografía, actividad biológica, condiciones climáticas, procesos geomorfológicos de sedimentación, erosión, redistribución de materiales, así como cambios en la hidrología superficial y subterránea, además, los disturbios humanos tales como: la labranza, el riego con agua de mala calidad y la fertilización química (Matson *et al.*, 1997).

2.15.- FUENTES DE SALES SOLUBLES

Las sales solubles del suelo consisten principalmente en varias proporciones de los cationes de sodio, calcio y magnesio y de los aniones cloruro y sulfato; y nitrato, se encuentra generalmente en cantidades menores. La fuente original y en cierto modo la más directa de la cual provienen las sales antes mencionadas, son los minerales primarios que se encuentran en los suelos y en las rocas expuestas de la corteza terrestre. Los suelos salinos generalmente se encuentran en áreas que reciben sales de otras localidades, siendo el agua el principal factor de acarreo. Las aguas actúan como fuente de sales cuando se usan para riego y pueden también agregar sales al suelo bajo condiciones naturales, cuando inundan las tierras bajas o cuando el agua

subterránea sube hasta muy cerca de la superficie (E.U.A., 1982).

Todas las formas de salinidad reducen la productividad de los suelos y afectan la producción de la gran mayoría de las especies agrícolas de importancia económica para la producción de alimentos, combustibles o fibras. Esto hace que sea de mayor importancia un manejo que considere el uso de prácticas económicas que hagan posible un manejo sostenible; para ello es necesario tener en cuenta aspectos tales como la respuesta o la capacidad de adaptación de los cultivos a la salinidad y el uso de materiales de enmiendas de bajo costo y fácil consecución tales como residuos o subproductos industriales o agrarios. Antes de iniciar los procesos de recuperación es indispensable y prioritario realizar una caracterización adecuada del problema de sales, y es de fundamental importancia, la evaluación de la calidad de agua para riego con una predicción acertada del efecto posible que su uso pueda causar en el cultivo y en el suelo (García, 2003(En línea)).

2.16.- EFECTO DE LAS SALES SOBRE LOS SUELOS

La salinidad en los suelos es un problema para la agricultura del mundo, siendo el factor que más limita la productividad de los cultivos (Gouia *et al.*, 1994). Las sales tienen efectos adversos sobre las propiedades físicas y químicas, y sobre los procesos microbiológicos del suelo. Los suelos afectados por sales representan cerca del 15% de las tierras áridas y semiáridas del mundo, y además representan 40% de las tierras irrigadas (Serrano y Gaxiola, 1994).

El efecto de las sales sobre un suelo depende de muchos factores. Entre los principales se tiene el tipo y cantidad de arcilla, la fuerza iónica de la solución del suelo y del tipo de cationes intercambiables presentes en ella. Los procesos de evapotranspiración mayores que la precipitación privilegian la concentración creciente de la solución del suelo y el ascenso de las sales a la superficie por capilaridad, lo que da lugar a los parches o calvas salinas en las cuales solo plantas muy especializadas pueden sobrevivir debido al efecto osmótico de las sales acumuladas. Entre mayor sea la concentración de sales más negativo será el potencial osmótico y menor el potencial del agua del suelo; como el agua se mueve de aquellas regiones en donde la energía libre

es mayor a las de menor energía libre, en un suelo salino con poca humedad el movimiento de agua será del interior de los tejidos vegetales o microbianos hacia el exterior, lo que implica plasmólisis celular, marchitez y muerte (García, 2003(En línea)).

Un exceso de sales solubles en el suelo, sobre todo de Na, reduce el poder de infiltración, puesto que estas sales actúan mediante presión osmótica, frenando la absorción tanto del agua como de otros iones presentes en el suelo. Como consecuencia de esta reducción de infiltración, la estructura del suelo se degrada, disminuyendo considerablemente la capacidad del mismo para mantener la cubierta vegetal (Seoáñez *et al.*, 1999).

2.17.- EFECTO DE LAS SALES SOBRE LAS PLANTAS

El efecto más importante que limita la producción y el crecimiento de las plantas, además de tener un efecto negativo en la germinación de las semillas es el estrés salino del ambiente y la sequía. Estos son los factores más serios, ya que los efectos de la salinidad afectan a más del 40 % de las áreas de riego, especialmente en las zonas de mayor producción en el mundo (Serrano y Gaxiola, 1994)

Los efectos de la salinidad sobre la relación del agua en la planta, el desbalance nutricional, y la toxicidad de los iones, son responsables de la inhibición de su crecimiento y como consecuencia de la disminución de la productividad (McKenzie y Leshen, 1994).

La planta extrae agua del suelo ejerciendo una fuerza de absorción mayor que aquella que retiene el agua en el suelo. Si no puede hacer suficientes ajustes internos y ejercer suficiente fuerza no puede extraer agua en cantidades apropiadas para sus necesidades y sufrirá estrés de agua; esto pasa cuando el suelo se seca demasiado, o cuando se acumulan sales que reducen su disponibilidad para el cultivo. Si el agua contiene sales, la planta requiere más energía para absorber la misma cantidad que cuando está libre de ellas. El efecto acumulativo trae como consecuencia una reducción importante en el agua aprovechable para el cultivo a medida que aumenta la salinidad la reducción del crecimiento, daño en los tejidos y necrosis son síntomas típicos del

efecto de sales (García, 2003(En línea)).

La salinidad del medio puede inhibir el crecimiento vegetal, tanto mediante perturbaciones en el balance de agua, como mediante la reducción de la turgencia, así como el agotamiento de la energía requerida para el metabolismo. Estas perturbaciones pueden estar generadas tanto por dificultad en la captación o transporte de agua dentro de la planta, como por efectos tóxicos ocasionados por un exceso de iones minerales en los tejidos (Ramos-Ruíz, 2000(En línea)).

Los efectos nocivos de las sales sobre las células de las plantas tienen dos componentes principales plantas: el estrés osmótico y la toxicidad de los iones. El componente osmótico no es específico del NaCl, es el resultado de la deshidratación y la pérdida de turgencia por los solutos externos. El estrés osmótico también resulta de la desecación y además es un componente común de sequía y estrés salino (Tarafdar y Rao, 1997).

2.18.- SUELOS SÓDICOS

Poseen más de un 15% de sus sitios de intercambio ocupados por iones de Na^+ , pero son pobres en sales solubles. Esta combinación da lugar a una dispersión de los coloides y a un pH por encima de 8.5, la elevación de pH resulta de la presencia de iones de Na^+ en la solución del suelo, el ion representa más del 15% del total de los cationes (Bratos *et al.*, 1986).

Los suelos sódicos son los más difíciles de restaurar y los que menor probabilidad ofrecen de compensar el tiempo, el dinero y el esfuerzo empleados. El problema consiste en que el alto porcentaje de sodio degrada las condiciones físicas y esta última dificulta la distribución de la enmienda en el perfil del suelo. El proceso de lavado es extraordinariamente lento debido a la baja permeabilidad, sin embargo, el esfuerzo de restauración puede hallarse justificado si existe bastante diferencia entre el precio de compra de los suelos sódicos y los que ya son aptos para el cultivo. El drenaje y las enmiendas son esenciales para la restauración de los suelos sódicos (Cepeda, 1991).

El mantenimiento de la estabilidad del suelo es un factor importante en la agricultura poca estabilidad en los agregados, dispersión de las arcillas y baja conductividad hidráulica son problemas que en suelos de regiones áridas están agravados por condiciones químicas tales como la acumulación de sales sódicas. El efecto negativo del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) sobre las propiedades físicas del suelo depende de varios factores entre los cuales la presencia de sales en la solución del suelo, la textura, el tipo de arcilla y la conductividad eléctrica del agua de riego (Sumner, 1995).

En estos suelos el sodio, puede provocar consecuencias indeseables tanto para el suelo como para la planta, desde la disminución de la conductividad hidráulica del suelo, hasta el aumento de la presión osmótica de la solución del suelo, con los consecuentes problemas asociados a cada cultivo. La respuesta de las plantas al Na intercambiable varía dependiendo de la especie y de las condiciones de salinidad y sodicidad la concentración de Na en la solución del suelo puede alcanzar niveles desproporcionalmente altos en relación con el K y la raíz debe enfrentarse a las altas concentraciones de Na y altos potenciales osmóticos (García, 2003(En línea)).

El subsuelo de los suelos sódicos es muy compacto, húmedo y pegajoso; además forma columnas de suelo con capas redondeadas. La sodicidad o alcalinización se desarrolla cuando en la solución del suelo existe una concentración elevada de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina, de tipo carbonato y bicarbonato de sodio. Los suelos sódicos generalmente mantienen una pobre relación suelo-agua-aire la cual afecta el crecimiento de las plantas y hace dificultoso el laboreo del suelo tanto en condiciones de alta humedad como de sequía. Bajo condiciones de alto pH, exceso de sodio intercambiable y baja concentración de electrolitos, las arcillas tienden a dispersarse produciendo costras superficiales que reducen la infiltración del agua y restringen el establecimiento y crecimiento de las plantas (Costa y Godz, 1999).

La composición salina del agua de riego y las características del suelo son factores determinantes en la sodicidad de los suelos, ya que aguas con altos contenidos de carbonatos de sodio, carbonatos de calcio y magnesio presentan elevado riesgo de

generar sodicidad (Chhabra, 1996). Excesivo sodio intercambiable en el suelo asociado con pHs mayores de 8,4 afectan las condiciones físicas de los suelos, perjudicando el movimiento del agua y del aire y consecuentemente el crecimiento de las plantas (Gupta y Abrol, 1990).

2.19.- SUELOS SALINO-SÓDICOS

Los suelos salinos sódicos son aquellos suelos cuyo extracto de saturación tiene una conductividad mayor de 4 dS/m a 25°C y un contenido de sodio intercambiable mayor de 15%. El pH puede ser o no mayor de 8.5. Este tipo de suelos se forma como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio. Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a las de suelos salinos (Bratos *et al.*, 1986).

Este tipo de suelos se forma como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio. Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a los suelos salinos. Cuando hay exceso de sales el pH raramente es mayor de 8.5 y las partículas permanecen floculadas. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a los de los suelos sódicos.

A medida que la concentración de sales disminuye en la solución, parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxido de sodio que a su vez puede cambiar a carbonato de sodio. En cualquier caso el lavado de un suelo puede hacerlo mucho más alcalino pH mayor de 8.5, las partículas se dispersan y el suelo se vuelve desfavorable para la entrada de agua y para las labores de labranza.

El manejo de los suelos salino sódicos sigue siendo un problema hasta que se elimina el exceso de sales y de sodio intercambiable de la zona del cultivo y se restablece las condiciones físicas del suelo (E.U.A., 1982).

2.20.- ACUMULACIÓN DE SODIO INTERCAMBIABLE EN LOS SUELOS

Las partículas del suelo absorben y retienen cationes a consecuencia de las cargas eléctricas que existen en la superficie. Una vez que los cationes adsorbidos se han combinado químicamente con las partículas del suelo, pueden ser reemplazados por otros cationes. Los cationes de sodio, calcio y magnesio son rápidamente intercambiables. Otros cationes como el potasio y el amonio pueden quedar retenidos en determinada posición sobre las partículas del suelo, de manera que se intercambian con gran dificultad, diciéndose entonces que se han fijado.

El calcio y el magnesio son los principales cationes que se encuentran en la solución del suelo. Cuando en estos suelos se acumula un exceso de sales solubles, generalmente es el catión sodio el que predomina en la solución del suelo y, en esta forma, el sodio puede ser el catión predominante al cual está sujeto el suelo, debido a la precipitación de los compuestos de calcio y magnesio.

A medida que la solución del suelo se concentra más a consecuencia de la evapotranspiración del agua y su absorción por las plantas, los límites de solubilidad del sulfato y carbonato de magnesio casi siempre se exceden, por lo cual se precipitan, causando el correspondiente aumento en las proporciones relativas de sodio. En general, más de la mitad de los cationes solubles debe ser sodio, antes de que sean adsorbidas cantidades de importancia por el complejo de intercambio, sin embargo, en algunas soluciones de los suelos salinos, prácticamente todos los cationes son sodio, por lo que es el catión adsorbido predominantemente (E.U.A., 1982).

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- CARACTERÍSTICAS GENERALES

El experimento se llevó a cabo en el área experimental del Departamento de suelos de la refinería **"Ing. Héctor R. Lara Sosa"**, así nombrada en memoria al destacado técnico de la industria petrolera nacional, distinción que se le dio en vida a los 65 años de edad en el año de 1979. .

Carretera Monterrey - Reynosa Km. 36.5, Cadereyta Jiménez Nuevo León.

La Refinería se localiza en las coordenadas geográficas 25°35'54.41" y 25°34'40.11" Latitud Norte (LN), y a los 99°55'35.42" y 99°57'40.16" de Longitud Oeste (L.O).

La altura media S.N.M es de 360 m.

3.2.- CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS DEL SITIO

El municipio de Cadereyta Jiménez posee una extensión territorial de 1.004,5 kilómetros cuadrados. Su orografía consiste en un suelo irregular, sin embargo, está formado por planicies más o menos grandes, colinas, lomeríos y algunas pequeñas depresiones.

3.3.- CLIMA

Es seco estepario, muy cálido, con temperatura media anual de 23°C. En días de verano alcanza los 44°C y en invierno desciende hasta los 5°C (bajo cero). Las lluvias son más abundantes principalmente en el sur y sureste, registrándose con mayor sucesión de agosto a enero; por lo general de febrero a mayo son ligeras lloviznas y raras veces aguaceros torrenciales; la precipitación pluvial media anual es de 601 a 800 milímetros.

Los vientos que predominan son del este al noreste en marzo y abril, del sur y sureste en julio y agosto y del norte de septiembre a febrero.



Figura 3. Mapa de localización del sitio experimental



Figura 4. Refinería "Ing. Héctor R. Lara Sosa"

Carretera Monterrey - Reynosa Km. 36.5, Cadereyta Jiménez Nuevo León.

3.4.- MATERIALES

3.4.1.- Suelo

El suelo empleado fue colectado en terrenos de la Refinería "Ing. Héctor R. Lara Sosa", en Cadereyta Jiménez Nuevo León. Contiene menos de uno por ciento de materia orgánica (M.O) y los valores de conductividad eléctrica y está altamente contaminado con plomo (Cuadro 3).

3.4.2.- Acondicionadores

Se utilizaron los siguientes sustratos físicos para mejorar la estructura del suelo. Estos tienen diverso origen, son comúnmente utilizados para este propósito, por sus características físicas y químicas.

- > Estiércol de bovino
- > Lombricomposta
- > Perlita
- > Peat most

3.4.3.- Planta

Se utilizó Rye grass como planta hiperacumuladora por ser de cobertura amplia, la raíz es altamente ramificada, y pueden dársele varios cortes para de ese modo poder observar la evolución del elemento contaminante, además es una planta medianamente tolerante a las sales.

3.5.- METODOLOGÍA

Los parámetros, resultados y métodos utilizados para analizar física y químicamente el suelo (cuadro No. 3).

Cuadro 3. Características físicas y químicas del suelo utilizado.

| | Resultado | Método |
|-------------------------|---------------------------------------|--|
| Textura | Arena 56% Limo 24 % Arcilla 20% | Hidrómetro de Bouyoucos |
| Densidad aparente | 1.47 g/cm | Probeta |
| pH H ₂ O | 7.5 | Relación agua-suelo 2-1 |
| Conductividad eléctrica | 6.0 dS/m | Extracto de saturación |
| Materia orgánica | 1.44 % | Walkley- Black |
| Plomo total | 7425 mg/kg | PRO Y-NOM-147 SEMARNAT/S S A1-2004. |
| Sodio intercambiable | 2.606 meq/100g | Acetato de amonio |
| PSI | 20.56 % | Calculado |
| Plomo soluble | 0.27 mg/kg | Relación 1:5 suelo agua |
| Plomo extractable | 10 mg/kg | Acetato de amonio |
| Magnesio total | 4,000 mg/kg | Digestión con HNO ₃ |
| Calcio total | 38,666.6 mg/kg | Digestión con HNO ₃ |

3.5.1.- Procedimiento del experimento

Para el inicio del presente trabajo de tesis se utilizaron 15 macetas de poliuretano, con 900g de suelo cada una. A las macetas se les colocó en la base un plato de poliuretano, para evitar la lixiviación del Pb. Se aplicaron 100g de estiércol, lombricomposta, perlita, peat most, la siembra se realizó depositando 1.5g de semilla de pasto Rye Grass por maceta. Durante el desarrollo del mismo se llevaron a cabo las siguientes prácticas con la finalidad de que el Rye Grass no esté influenciado con otros factores.

3.5.2.- Riegos

Estos se realizaron de forma manual con una regadera, aplicando el agua adecuada para su desarrollo durante todo el ciclo del cultivo., evitando de tal manera el exceso de humedad y así evitar el ataque de patógenos que puedan causar algún daño.

3.5.3.- Fertilización

Se realizó en tres aplicaciones durante el ciclo del cultivo vía foliar aplicando 1g/lt de Lobi, con 44% de nitrógeno y 1.5 g/lt de Grofol con 30% fósforo.

3.5.4.- Control de Enfermedades

No se presentaron plagas, por lo que no fue necesario aplicar insecticidas, pero si se presentaron hongos durante el desarrollo de los cultivos, que para su control se aplicó fungicida Cercovin a una dosis de 3g/l y Prozycar 1.1g /l en una aplicación por semana después de haber germinado la semilla.

3.5.5.- Descripción de los Tratamientos

El trabajo se distribuyó de acuerdo a un Diseño Experimental Completamente al Azar, con cinco tratamientos y tres repeticiones. Se efectuó una comparación numérica de las medias. En el cuadro 3 se presenta la distribución de los tratamientos.

Cuadro 4. Distribución de los tratamientos

| Tratamientos | Aplicaciones |
|--------------|---|
| T1 | 900 g de suelo contaminado con Pb y 100 g de estiércol |
| T2 | 900 g de suelo contaminado con Pb y 100 g de lombricomposta |
| T3 | 900 g de suelo contaminado con Pb y 100 g de perlita |
| T4 | 900 g de suelo contaminado con Pb y 100 g de peat most |
| T5 | 1000 g de suelo contaminado con Pb |

3.5.6.- VARIABLES EVALUADAS

Para estudiar el comportamiento de los tratamientos aplicados se evaluaron las siguientes variables.

3.5.7.- Salinidad

Para analizar la evaluación de esta variable, se realizó antes y al final del ciclo, tomando dos muestras de cada tratamiento con 100g de suelo c/u al cual se le agregaron 100 ml de agua destilada, se dejó reposar y luego se tomó la lectura con la ayuda de un conductímetro calibrado.

3.5.8.- Acumulación de Pb en Tejido

En esta investigación se consideró como variable principal la acumulación de Pb en tejido vegetal, ya que integra tanto el grado de absorción del metal por las plantas, así como el efecto negativo que las concentraciones excesivas del metal puede tener sobre la producción de materia seca. Para el estudio de esta variable, se realizaron dos cortes uno a los 30 días y el otro a los 60 después de la germinación de la planta. Se procedió a colocarlos en bolsas de papel, para que se secaran, posteriormente se prepararon para el análisis de Pb.

3.5.9.- Porcentaje de Sodio Intercambiable

En esta variable, se tomó una muestra de cada tratamiento y de cada repetición y posteriormente se analizaron en el laboratorio.

3.5.10.- Pb en Suelo

Esta variable, se examinó mediante la metodología del PROY-NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004, antes y después de la prueba de fitoextracción. El cual consistió en tomar 1g de suelo de cada tratamiento y de cada repetición, se le aplicó 10 ml de HNO₃, después se calentó en una parrilla, se filtró y posteriormente se aforo para tomar la lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo de tesis fue evaluar dos agentes quelatantes en el cultivo del Rye Grass para ayudar a la extracción de Pb de un suelo contaminado por actividad industrial intensa y de esta manera llevar a cabo una fitorremediación con este tipo de planta. El experimento se estableció, sin embargo, en la superficie del suelo en la maceta, se presentó una “costra” oscura muy compacta lo cual provocó disminución en la germinación y también en el crecimiento del vegetal.

Por lo anterior, se instaló nuevamente el experimento pero empleando acondicionadores, principalmente de origen orgánico para mejorar las características físicas del suelo y lograr un mejor desarrollo del cultivo. Al mismo tiempo se inició una caracterización en cuanto a la salinidad del suelo, encontrando que, éste además del problema, del Pb presenta también problemas de salinidad y sodicidad. En este sentido de la doble problemática encontrada que se discutirán los resultados.

4.1.- Salinidad del Suelo

El suelo se caracterizó en lo referente a su contenido de sales, PSI y pH, en base a los problemas observados anteriormente.

De acuerdo a los valores determinados en el Cuadro 4, se clasificó como un suelo salino-sódico ya que tiene un porcentaje de sodio intercambiable > 15 , una conductividad eléctrica $>$ de 4 dS/m y un pH $<$ de 8.5 (Bratos *et al.*, 1986). Esto además de la elevada contaminación con Pb indica una alta complejidad del suelo y la adaptación de los cultivos en él.

Los valores de CE encontrados en todos los tratamientos son mayores que el testigo después del experimento lo cual muestra la influencia de los diferentes materiales en este parámetro y están de acuerdo al origen de los mismos comportándose estos de la siguiente manera: S + Estiércol $>$ S + Lombricomposta $>$ S + Perlita $>$ S + Peat Most $>$ Suelo. En el caso de los tratamientos que son estiércol y lombricomposta, es más claro ya que se originan de estiércol bovino el cual tiene un alto contenido de sales.

Con respecto al PSI, en general, se observa un comportamiento semejante al de las sales, es decir, hay un aumento en comparación al suelo inicial, en el caso de la perlita y el peat most, este comportamiento puede deberse a un lavado de sales durante el tiempo que duró el experimento. En relación al estiércol y lombricomposta el aumento de CE y PSI se debe lo más probable a la adición de estos materiales con características salinas. De acuerdo con los resultados obtenidos para pH del suelo no se presenta variaciones importantes en los diferentes tratamientos, sin embargo, el pH del testigo es mayor debido a la naturaleza del suelo, y la concentración de las sales. La sodicidad no produce necesariamente un incremento en el pH, debido a que existen otros elementos como el Ca y Mg que se encuentran en altas concentraciones y con otros componentes salinos del suelo, amortiguan la reacción del suelo, impidiendo que el pH se eleve por encima de 8.5. (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características químicas medidas a un suelo contaminado con plomo, de origen industrial.

| Tratamientos | PSI | CE dS/m | pH |
|--------------|-------|---------|-----|
| S + E | 34.28 | 10.03 | 7.4 |
| S + L | 24.0 | 7.59 | 7.3 |
| S + P | 30.85 | 6.56 | 7.2 |
| S + PM | 30.85 | 5.60 | 7.4 |
| S | 24.0 | 5.52 | 7.6 |

S: suelo con plomo; E: estiércol de bovino; L: lombricomposta; P: perlita; PM: peat most.

4.2.- FITOEXTRACCIÓN DE PB POR EL TEJIDO VEGETAL DE RYE GRASS

Al suelo que no se le agregó ningún acondicionador (testigo), presentó la mayor extracción de Pb (2438.89 $\mu\text{g/g}$), esto posiblemente se debe a que el tratamiento presenta los valores más bajos de PSI (24) y CE (5.52 dS m) encontrados después del experimento. Además en este tratamiento no hay influencia de los acondicionadores orgánicos que de alguna manera pudieran bloquear la disponibilidad del Pb o tener una influencia por efecto de mineralización.

Cuando se le adicionó la lombricomposta al suelo la extracción de Pb fue de 1544.54 $\mu\text{g/g}$, debido probablemente a que mostró valores de PSI (24) y la CE (7.59 dS m) similares al testigo, aunado al efecto de la lombricomposta que provocó una mayor disponibilidad de Pb. En el caso de los suelos donde se agregó perlita y peat most la extracción de Pb fue de 1104.90 y 558.16 $\mu\text{g/g}$. En donde se puede observar que presentan un PSI mayor que los ya mencionados. Lo más probable es que estos materiales sobre todo inertes, utilizados en estos tratamientos faciliten un mayor lavado de las sales, y el sodio se concentra aumentando por lo tanto el PSI.

En el suelo donde se adicionó estiércol fue uno de los valores más bajos junto con el que se le adicionó peat most en la extracción de Pb (754.31 $\mu\text{g/g}$). Con respecto a los demás tratamientos debido a que en este tratamiento se encuentran los valores más altos de PSI (34.28) y CE (10.03 dS m).

En general los tratamientos variaron entre 558.16 y 2438.89 $\mu\text{g/g}$ de Pb extraído lo que denota disponibilidad del Pb. Cuando se modificaron las características físicas del suelo por acción de los tratamientos, también se presentaron problemas en el desarrollo del cultivo, como lento crecimiento, estrés, quemaduras en las hojas y puntos de crecimiento. A pesar de esto el cultivo logro extraer el Pb. Como se observa en los resultados, en el segundo corte la fitoextracción fue menor en todos los tratamientos, con valores de 142.23 hasta 692.47 $\mu\text{g/g}$ de Pb comparados con el primer corte, esto es debido a la salinidad que se fue acentuando con el tiempo provocando estrés a la

planta, afectando su capacidad de absorción (Cuadro 6).

Cuadro 6. Fitoextracción total de plomo por el pasto Rye grass en un suelo contaminado de origen industrial.

| Tratamientos | Primer corte | Segundo | Total |
|--------------|--------------|---------|---------|
| S + E | 544.55 | 209.76 | 754.31 |
| S + L | 852.07 | 692.47 | 1544.54 |
| S + P | 561.30 | 543.60 | 1104.90 |
| S + PM | 415.93 | 142.23 | 558.16 |
| S | 2014.64 | 424.25 | 2438.89 |

S: suelo con plomo; E: estiércol de bovino; L: lombricomposta; P: perlita;

PM: peat most.

4.3.- CONTENIDO DE PB (MG/KG) EN SUELO ANTES Y DESPUÉS DE LA FITOEXTRACCIÓN

Todos los tratamientos en comparación con el suelo inicial, disminuyeron el contenido de Pb en el suelo, lo anterior se debe a la absorción, lixiviación, y dilución del metal pesado. Los valores finales de Pb, sobrepasan los límites máximos permisibles para suelos contaminados, según el uso del suelo, en este caso industrial, cuyo límite máximo es de 750 mg/kg. Por lo que se debe remediar hasta las concentraciones específicas totales, ya que existe población humana potencialmente expuesta a este contaminante (PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004., 2005). (Cuadro 7).

Cuadro 7. Contenido total de Pb (mg/kg) en el suelo contaminado de origen industrial antes y después de la fitoextracción.

| | Pb Total mg/kg |
|-------------------|-------------------|
| Contenido inicial | 7420 |
| | |
| Tratamientos | |
| S + E | 3300 |
| S + L | 4800 |
| S + P | 4400 |
| S + PM | 3200 |
| S | 3700 |

S: suelo con plomo; E: estiércol de bovino; L: lombricomposta; P: perlita; PM: peat most

V.- CONCLUSIONES

- De acuerdo a la concentración de plomo según la NOM, 147, se concluye que puede ser considerado como un suelo con severa polución; además de la alta concentración de Pb, presenta otros problemas como una CE y un PSI muy elevados.
- El pasto Rye Grass sirve para extraer plomo de un suelo salino-sódico contaminado a altas concentraciones por este metal.
- Se determinó que el Pb, la CE, y el PSI, bajo las condiciones experimentales descritas, afectaron considerablemente el desarrollo de la planta registrándose el efecto significativamente en el desarrollo de la planta, sin embargo a pesar de esto se obtuvo una absorción considerable de plomo.
- El contenido de plomo en el suelo disminuyó debido a la absorción, lixiviación y dilución, pero los resultados finales no entran en los límites máximos permisibles para suelos contaminados con plomo por actividad industrial de acuerdo a PROY-NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004.

5.1.- RECOMENDACIONES

- Antes de llevar a cabo una fitorremediación de un suelo es necesario conocer las características físicas y químicas del mismo, así como el origen del contaminante para poder seleccionar especies que se adapten a las condiciones del suelo a utilizar.
- Para este suelo se recomienda 1° reemplazar al sodio intercambiable por calcio (yeso agrícola), 2° dar un lavado y posteriormente aplicar enmiendas para mejorar la estructura y la permeabilidad del mismo.
- Llevar a cabo otra fitorremediación hasta que los valores de Pb entren en los límites máximos permisibles y tomar acciones preventivas sobre el suelo para evitar su dispersión eólica a otras áreas.
- Realizar análisis de varios elementos como arsénico, berilio, cadmio, mercurio, níquel, talio, selenio y vanadio ya que es un suelo de origen industrial y posiblemente contenga más de uno de estos contaminantes.
- Realizar investigaciones sobre las interacciones complejas en donde participan la planta, el suelo y los contaminantes, ya que son múltiples y no son claras.

VI.- LITERATURA CITADA

- Abollino, O., M. Aceto, M. Malandrino, E. Mentaste, C. Sarzanini y R. Barberis 2002. "Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles." *Environmental Pollution* 119: 117.
- Alloway, B. J. 1995. "Heavy Metals in Soils." Blackie Academic & Professional: 370.
- Aranguren, F. 1999. "El plomo en el medio Geográfico: Una amenaza silente." *Geoenseñanza* 4: 121-155.
- ATSDR 1999(En línea). "Toxicological Profile Information Sheet. ." http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.html. 08 de diciembre de 2014.
- Banat, K. M., F. Howari y A. A. Al-Hamad 2005. "Heavy Metals in Urban Soils of Central Jordan: Should we Worry about Their Environmental Risks." *Environmental Research* 97: 258-273.
- Bratos, J., G. Sicilia y A. Remasal 1986. "Análisis De Suelos Curso Para el S.P.Y D.A de Burgos. ." 1986. Unión Explosivos Río Tinto S.A.
- Brown, S. L., R. L. Chaney, J. G. Hallfrisch y Qi-Xue. 2003. "Effect of Biosolids Processing On Lead Bioavailability in an Urban Soil." *Environ Qual* 32: 100-108.
- Buka, I. 2001. "Plomo y Salud Infantil." Comisión para la Cooperación Ambiental.
- Burt, R., M. A. Wilson, T. J. Keck, B. D. Dougherty, D. E. Strom y J. A. Lindahl 2003. "Trace Element Speciation in Selected Smelter-Contaminated Soils in Anaconda and Deer Lodge Valley, Montana, USA." *Advances in Environmental Research* 8: 51-67.
- Cañizares-Villanueva, R. O. 2000. "Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana." *Asociación Latinoamericana de Microbiología*. 42: 131-143.
- Castro, G. y J. Valdés 2012. "Concentración de metales pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) en la biota y sedimentos de una playa artificial, en la bahía San Jorge 23°S, norte de Chile." *Latin American Journal of Aquatic* 42: 267-281.
- Cepeda, D. J. M. 1991. "Química de Suelos." Editorial Trillas, S.A. de C.V. México DF. Segunda Edición 142-149.
- Costa, J. L. y P. Godz 1999. "Aplicación de yeso a un natracuol del sudeste de la pampa deprimida." *Ciencia del Suelo*. 17.
- Chen, B., P. Christie y L. Li 2001. "A Modified Glass Bead Compartment Cultivation System for Studies on Nutrient and Trace Metal Uptake by Arbuscular Mycorrhiza." *Chemosphere* 42: 185-192.

- Chhabra, R. 1996. "Soil salinity and water quality." Balkema Publishers.: 283.
- Christie, P., X. Li y B. Chen 2004. "Arbuscular Mycorrhiza can Depress Translocation of Zinc To Shoots of Host Plants in Soils Moderately Polluted with Zinc." *Plant and Soil* 261: 209-217.
- Churchman, G. J., J. O. Skjemstad y J.M. 1993. " Influence of Clay Minerals and Organic Matter on Effects of Sodicity on Soils." *Australian Journal of Soil Research* 31: 779-800.
- E.U.A., L. d. s. d. 1982. "Diagnostico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos." Ed. Limusa S.A. Mexico DF.
- Emsley, J. 1994. "Ancient World was Poisoned by Lead." *New Scientist* 143: 14.
- Ernst, W. H. O. 2000. "Evolution of Metal Hyperaccumulation and Phytoremediation." *New Phytol* 146: 357.
- Frick, C. M., R. E. Farrell y J. J. Germida 1999. " Assessment of Phytoremediation as an in situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites. Petroleum Technology Alliance of Canada. Vancouver, British Columbia."
- García-Céspedes, J., J. Acuña-González y J. A. Vargas-Zamora 2004. "Metales traza en sedimentos costeros de Costa Rica." *Revista de Biología Tropical* 52: 51-60.
- García, A. 2003(En línea). "Salinidad de suelos." <http://www.gratisweb.com/ocaclevante/calidadagua.pdf> 07 de diciembre 2014.
- García, I. y C. Dorronsoro 2005(En línea). "Contaminación por metales pesados. En tecnología de suelos." <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm> 07 de diciembre de 2014.
- Guitart, R. y G. T. Vernon 2005. "¿El plomo empleado en deportes (caza, tiro y pesca deportiva) un problema de salud pública infravalorado?" *Revista Española Salud Pública* 79: 621-632.
- Gupta, R. K. y I. P. Abrol 1990. "Salt Affected Soils: Their Reclamation and Management for crop Production. ." *Advances of Soil Science*. 11: 223-228.
- Han, F. X., A. Banin, W. L. Kingery, G. B. Triplett, L. X. Zhou, S. J. Zheng y W. X. Ding 2003. "New Approach to Studies of Heavy Metal Redistribution in Soil." *Advances in Environmental Research* 8: 113-120.
- Huang, C. P. 1999. "Environmental Soil Chemistry and Human Welfare. 14° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo." Sociedad Chilena de la Ciencia del

Suelo. Temuco. Chile.

Lasat, M. M. 2002. "Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms." *Journal of Environmental Quality* . 31: 109-120.

Llugany, M., C. Poschnrieder y J. Barceló 2007. "Hiperacumulación de metales: ¿Una ventaja para la planta y para el hombre?" *Ecosistemas* 16: 1-6.

Maqueda-Gálvez, A. P. 2013(En línea). "Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados." http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mbt/maqueda_g_ap/portada.html 4 de diciembre de 2014.

Martín, C. W. 2003. "Heavy Metals Trends in Floodplain Sediments and Valley Fill. ." *Catena* 39: 53-68.

Matson, A. P., W. J. Parton, A. G. Power y M. J. Swift 1997. "Agricultural Intensification and Ecosystem Properties." *Science* 257: 504-508.

Matte, T. D. 2003. "Efectos del plomo en la salud de la niñez." *Salud Pública de México* 45: 220-224.

McGrath, S. P., E. Lombi, F. J. Zhao, S. J. Dunham y 1919-1926. 2001. "Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Natural Hyperaccumulation Versus Chemically Enhanced Phytoextraction." *Journal of Environmental Quality* . 30: 1919-1926.

McKenzie, B. D. y Y. A. Leshen 1994. "Stress And Stress Coping In Cultivated Plants." *Kluwer Academic Publisher*: 256.

Merkl, N. R., Schultze-Kraft. y C. Infante 2004. "Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils in the Tropics - Pre-Selection of Plant Species from Eastern Venezuela." *Journal of Applied Botany and Food Quality* 78: 185-192.

Milner, J. M. y L. V. Kochian 2008. "Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system." *Annals of Botany* 102: 3-13.

Ortiz-Bernad, I., J. Sanz-García, M. Dorado-Valiño y S. Villar-Fernández 2007. "Técnicas de recuperación de suelos contaminados " *Informe de Vigilancia Tecnológica*: 10.

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

Pineda-Hernández, R. 2004(En línea). "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 con residuos de mina."

http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/Rosario%20Pineda%20Hernandez%20doctorado.pdf 07 de diciembre de 2014.

Prasad, M. N. V. y H. M. Freitas 2003. "Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology." *Electro. J. Biotech.* 6: 285-321.

PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. 2005. "Que Establece Criterios para Determinar las Concentraciones de Remediación de Suelos Contaminados por Arsénico, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio, Talio y Vanadio." Publicada en el Diario Oficial de la Federación.

Pulford, I. y C. Watson 2003. "Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees a review." *Environmental International* 29: 529-540.

Ramos-Ruíz, R. 2000(En línea). "Aplicación de sustancias húmicas comerciales como productos de acción bioestimulantes. Efectos frente al estrés salino." <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10018/1/Ramos%20Ruiz,%20Roberto.pdf> f 08 de diciembre de 2014.

Rizzo, A., R. Daga, M. Arcagni, S. Pérez-Catán, D. Bubach, R. Sánchez, S. Ribeiro-Guevara y M. A. Arribére 2010. "Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte." *Ecología Austral* 20: 155-171.

Robinson, B. H., E. Lombi, F. J. Zhao y S. P. McGrath 2003. "Uptake and Distribution of Nickel and other Metals in the Hyperaccumulator *Berkheya Coddii*." *New Phytologist* 158: 279-285.

Rodríguez-Ortiz, J. C., H. Rodríguez-Fuentes, G. De Lira-Reyes, J. Martínez-De la Cerda y J. L. Lara-Mireles 2006. "CAPACIDAD DE SEIS ESPECIES VEGETALES PARA ACUMULAR PLOMO EN SUELOS CONTAMINADOS." *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 239-245.

Satoh-Nagasawa, N., M. Mikako, S. Kenji, T. Hidekazu, W. Akio y A. Hiromori 2013. "Functional relationship heavy metal P-type ATPases (OsHMA 2 and OsHMA3) of rice (*Oryza sativa*) using RNAi." *Plant Biotechnology* 30: 511-515.

Sauquillo, A., A. Rigol y G. Rauret 2003. "Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments." *Trends in Analytical Chemistry* 22: 152-159.

Sauve, S., W. Henderson y H. E. Allen 2000. "Solid-Solution Partitioning of Metals in Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter." *Environmental Science Technology* 34: 1125-1131.

- Seoáñez-Calvo, M. 1999. "Ingeniería del Medio Ambiente Aplicada al Medio Natural." Continental Mundi-Prensa: 60,181 y 290.
- Seoáñez, C., A. J. Chacón, A. Gutiérrez y I. Angulo 1999. "Contaminación de suelos: Estudios, tratamiento y gestión." Mundi-Prensa.
- Serrano, R. y R. Gaxiola 1994. "Microbial Model and salt Stress Tolerance in plants." Crit. Rev. PlantSci. 13.
- Singh, O., G. Labana, R. Budhiraja y R. Jain 2003a. "Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil." Appl. Microbiol. Biotechnol. 61: 405-412.
- Singh, O. V., S. Labana, G. Pandey, R. Budhiraja y R. K. Jain 2003b. "Phytoremediation: An Overview of Metallic Ion Decontamination From Soil." Applied Microbiology and Biotechnology. 61: 405-412.
- Spain, A. y E. Alm 2003. "Implications of Microbial Heavy Metal Tolerance in the Environment." Reviews in Undergraduate Research 2: 1-6.
- Sumner, M. E. 1995. "Sodic Soils; New Perspectives. In: Naidu, R; Sumner, M.E.; Rengasamy, P. (eds). Australian Sodic Soils. Distribution, Properties and Management." First National Conference and Workshop on Sodic Soils.: 1-34.
- Tarafdar, C. J. y V. A. Rao 1997. "Response of Arid Legumes to VAN Fungal Inoculation. Symbiosis." 22: 264-274.
- University, O. S. 1999(En línea). "Brochure: Perennial Ryegrass. Oregon Ryegrass Growers Seed Commission." www.ryegrass.com. 08 de diciembre de 2014.
- Valdés-Perezgasga, F. y V. M. Cabrera-Morelos 1999(En línea). "La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México." <http://www.texascenter.org/publications/torreon.pdf> 07 de diciembre de 2014.
- Vélez, M., J. J. Hincapie, I. Matamoros y R. Santillan 2002. "Producción de Ganado Lechero en el Trópico." Zamorano Academic Press, Zamorano, Honduras. Cuarta edición.: 326.
- Villalobos-Jáuregui, A., F. Valdés-Perezgasga, G. G. García-Vargas y A. Chamarro 2006. "Predicción del riesgo a la salud infantil en una zona contaminada por plomo." Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica. 27: 8-15.
- Volke-Sepúlveda, T., J. A. Velasco-Trejo y D. De la Rosa-Pérez 2005. "Suelos Contaminados por Metales y Metaloides: muestreo y alternativas para su remediación." INE-SEMARNAT: 144.
- Wang, Y. P. y C. C. Chao 1992. "Effects of Vesicular- Arbuscular Mycorrhizae and Heavy Metals on the Growth of Soybean and Phosphate and Heavy Metal Uptake

by Soybean in Major Soil Groups of Taiwan." J. Agric. Assoc. China New. Ser 157: 6-20.

Xiong, Z. T. 1997. "Bioaccumulation and Physiological Effects of Excess Lead in a Roadside Pioneer Species *Sonchus Oleraceus* L." Environmental Pollution 97: 275-279.

Zhang, Q., L. C. Davis y L. E. Erick 2000. "Heavy metal. In: Hazardous Substance Res." 2: 1.

