

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA



“Fitorremediación de un suelo contaminado por metales pesados (As, Pb, Cd, Fe y Zn), con *Nicotiana glauca* en Torreón, Coahuila”

Por

CLAUDIA LEONOR MACIAS ORTEGA

TÉSIS

Presentada como requisito parcial para
Obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón, Coahuila, México
Noviembre del 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

“Fitorremediación de un suelo contaminado por metales pesados (As, Pb, Cd, Fe y Zn), con *Nicotiana glauca* en Torreón, Coahuila”.

Por:

CLAUDIA LEONOR MACIAS ORTEGA

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:



DR. LUCIO LEOS ESCOBEDO
PRESIDENTE



DR. MARIO GARCÍA CARRILLO
VOCAL



DR. ESTEBAN FAVELA CHÁVEZ
VOCAL



DR. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS
VOCAL SUPLENTE



M.E. JAVIER LÓPEZ HERNÁNDEZ
Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Noviembre del 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

“Fitorremediación de un suelo contaminado por metales pesados (As, Pb, Cd, Fe y Zn), con *Nicotiana glauca* en Torreón, Coahuila”

Por:

CLAUDIA LEONOR MACIAS ORTEGA

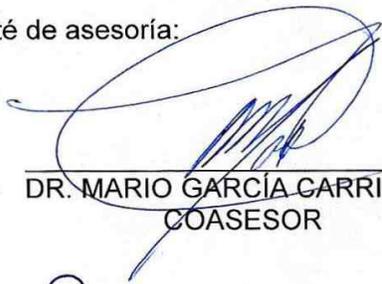
TESIS

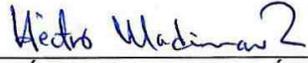
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobada por el comité de asesoría:


DR. LUCIO LEOS ESCOBEDO
ASESOR PRINCIPAL


DR. MARIO GARCÍA CARRILLO
COASESOR


DR. HÉCTOR MADINAVEÍTA RÍOS
COASESOR


M.E. JAVIER LÓPEZ HERNÁNDEZ
Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Noviembre del 2018

AGRADECIMIENTOS

A mí “ Alma Mater”, por darme la facilidad de realizar mis sueños de ser una profesionista y con ello obtener un lugar respetable ante la sociedad.

A mi “Familia”, por estar siempre al pendiente de mis necesidades y darme ánimos y buenos consejos para luchar y terminar mi carrera.

AL Dr. Lucio Leos Escobedo, por todo su tiempo, apoyo y enseñanza que me dio y además por su gran amistad, consejos y la paciencia que me brindo cuando lo necesite.

AL Dr. Mario García Carrillo, por darme su confianza y apoyo para realizar este proyecto y por el tiempo que dedico al proyecto y guiarme para concluirlo.

A la Empresa Met-Mex Peñoles, por formar parte de este proyecto de investigación, gracias al **Ing. Camilo Valdez**, por la ayuda brindada para realizar las determinaciones de los metales pesados en el laboratorio de la empresa.

DEDICATORIAS

A Dios, por brindarme la oportunidad de vivir, porque siempre me acompaña y nunca me abandona a pesar de los obstáculos que he tenido.

A mis padres: Tomasa Ortega De Domínguez y Fernando Macías Martínez, por la gran familia que me dieron. En particular a mi **padre** por él apoyó que me ha brindado para terminar mis estudios.

A mis hermanos: Juan Ignacio, Julio Cesar, Guadalupe, Rosa María, por su gran amor, cariño y apoyo en todo momento para que continuara adelante.

A mi esposo: Humberto Herrera Rodríguez, por su apoyo, amor y consejos que me brindo para concluir mi Tesis. Además de toda su comprensión, paciencia y valiosa ayuda para seguir adelante y vencer los momentos difíciles.

A mis Hijos: Polet Herrera Macias y Ángel Adolfo Herrera Macias, por apoyarme y darme ánimos para terminar mi Tesis.

RESUMEN

La contaminación del suelo, hoy en día viene a ser uno de los temas ambientales más importantes para la Sociedad y la Administración Mundial. La caracterización, evaluación y remediación de un suelo contaminado es uno de los principales retos ambientales hoy en día. La peligrosidad de los contaminantes en los suelos viene dada no sólo por su concentración total, sino especialmente por su disponibilidad. La ciudad de Torreón se encuentra ubicada al sur-oeste del estado de Coahuila, se ha detectado una alta contaminación de metales pesados como el Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Arsénico (As), Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) en suelo y aire. Sin embargo la presencia de metales pesados particularmente el Plomo genera un grave problema y representa un gran riesgo de salud en la población. El trabajo de investigación se realizó de febrero del año 2012 a enero del año 2013, en el área de sombreadero del departamento de Horticultura en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Regional Laguna, en Torreón, Coahuila. Se seleccionó la especie vegetal de *Nicotiana glauca*, conocida como Virginio, por presentar hábitos perennes, por ser resistente a los cambios de clima y por ser considerada una planta fitorremediadora. Se utilizaron plantas que presentaban de dos a tres hojas verdaderas. El suelo empleado como sustrato para dicho experimento fue proporcionado por la empresa Met-Méx Peñoles, S.A de C.V., ubicada en la ciudad de Torreón Coahuila, obtenido de superficies en los alrededores de la misma (0 a 5 cm) y en terrenos aledaños. Los tratamientos de estudio fueron dos (T1= 100% de arena de río, T2= 50% arena de río y 50% de suelo contaminado con 16 repeticiones por tratamiento, obteniendo 32 unidades experimentales. Las variables de estudio evaluadas fueron las cantidades de elementos pesados encontradas en el suelo-problema de Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc, comparadas con las que establece la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Además de las cantidades de tales elementos, acumuladas en raíz, tallo y hojas de la planta de *Nicotiana glauca*, a los 101, 126 y 140 días después del trasplante. En los resultados para el análisis de los metales pesados en el suelo-problema, se encontró que Zn y Pb, presentaron cantidades muy elevadas (30.58 y

19.22 kg ha⁻¹). Para el agua de riego lixiviada a los 101, 140, se encontró que Sodio, presentó cantidades de 252.49 y 59.37 kg ha⁻¹. En los análisis químicos de suelo durante el desarrollo de la planta a los 101, 126 y 140 ddt, los elementos pesados encontrados fueron Fe, Zn y Pb con 8,832.4, 3,423.2, 2,844.0; 8,009.6, 2,970.0, 2,750.0 y 6,498.0, 2,262.8, 1,795.2 kg ha⁻¹. Finalmente en la absorción de los metales pesados en raíz, tallo y hojas a los 101, 126 y 140 ddt, en la planta-problema y la planta-testigo, Fe y Zn, con las cantidades más altas (113.45, 62.15/53.65, 3.00; 338.95, 62.15/160.35, 3.00; 101.50, 62.15/28.95, 3.00 kg ha⁻¹). Evaluar la capacidad de extracción de metales pesados (Arsénico, Plomo, Cadmio, Hierro y Zinc) del suelo y Determinar la cantidad de metales pesados en mención extraídos y acumulados en raíz, tallo y hojas de la especie vegetal *Nicotiana glauca*, fueron los objetivos de este trabajo de investigación.

Palabras clave: Metales, Virginio, Contaminación, Torreón, Coahuila

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
RESUMEN	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xi
I.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2. HIPÓTESIS	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. ORIGEN	3
2.2. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DE LA PLANTA NICOTINA GLAUCA	5
2.2.1. <i>Semilla</i>	6
2.2.2. <i>Tallo</i>	6
2.2.3. <i>Hojas</i>	6
2.2.4. <i>Inflorescencia</i>	6
2.2.5. <i>Fruto</i>	7
2.3. TIPO DE PROPAGACIÓN EN LA PLANTA DE NICOTIANA GLAUCA	7
2.3.1. <i>Propagación sexual</i>	7
2.3.2. <i>Propagación asexual</i>	7
2.4. REQUERIMIENTOS DE CLIMA Y SUELO	8
2.4.1. <i>Suelos</i>	8
2.4.2. <i>Luz</i>	9
2.4.3. <i>Clima</i>	9
2.5. REQUERIMIENTOS DE AGUA	9
2.6. COMPONENTES QUÍMICOS DE <i>NICOTIANA GLAUCA</i>	9
2.7. HÁBITAT PARA LA NICOTIANA GLAUCA	10
2.8. GERMINACIÓN	10
2.9 CARACTERÍSTICAS DE SU CRECIMIENTO	10
2.10. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LA NICOTINA GLAUCA	10
2.11. USOS COMO PLANTA FITORREMIADORA	11
2.12. METALES PESADOS Y ELEMENTOS TRAZA EN EL SUELO	11
2.13. ORIGEN DE LOS METALES PESADOS EN LOS SUELOS	12
2.13.1. <i>Presencia de metales pesados en los suelos</i>	13
2.13.2. <i>Efectos de los metales pesados en el suelo</i>	14

2.13.3. <i>Mobilización de metales pesados en el suelo</i>	15
2.14. EL PLOMO	16
2.14.1. <i>Efecto del Plomo en la salud</i>	17
2.14.2. <i>Plomo en el medio ambiente</i>	18
2.14.3. <i>Efecto del Plomo en plantas</i>	20
2.14.4. <i>Fuentes de contaminación de Plomo en México</i>	21
2.14.5. <i>Problema del Plomo en las ciudades</i>	22
2.15. EL ARSÉNICO	23
2.15.1. <i>Aplicaciones y producción del Arsénico</i>	24
2.15.2. <i>Efectos del Arsénico sobre la salud</i>	24
2.15.3. <i>Efectos ambientales del Arsénico</i>	25
2.16. EL CADMIO	25
2.16.1. <i>Efectos del Cadmio sobre la salud</i>	26
2.17. EL HIERRO	27
2.17.1. <i>Efectos del Hierro sobre la salud</i>	27
2.17.2. <i>Efectos ambientales del Hierro</i>	27
2.18. EL ZINC	28
2.18.1. <i>Efectos del Zinc sobre la salud</i>	28
2.18.2. <i>Efectos ambientales del Zinc</i>	29
2.19. BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS	29
2.20. FACTORES AMBIÉNTALES	30
2.21. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTAMINANTES	30
2.22. FACTORES BIOLÓGICOS	30
2.23. FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS	31
2.23.1. <i>Selección de plantas fitorremediadora</i>	31
2.23.2. <i>Mecanismo de las plantas para la desintoxicación de metales pesados</i>	33
2.23.3. <i>Mecanismos y fases de la fitorremediación</i>	34
2.23.4. <i>La fitoextracción o fitoacumulación</i>	34
2.23.5. <i>La fitoestabilización</i>	35
2.23.6. <i>La fitovolatilización</i>	35
2.23.7. <i>Limitaciones de la fitorremediación</i>	36
2.23.8. <i>Ventajas de la fitorremediación</i>	37
2.23.9. <i>Especies vegetales acumuladoras de metales pesados</i>	38
2.23.10. <i>La fitorremediación en México</i>	39
III. MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
3.2. LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	42
	42
3.3. LOCALIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL	42
3.4. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE LA COMARCA LAGUNERA	43
3.4.1. <i>Temperatura</i>	43
3.4.2. <i>Precipitación pluvial</i>	44
3.4.3. <i>Granizos</i>	44

3.4.4. Vientos	44
3.4.5. Heladas	44
3.4.6. Humedad relativa	44
3.4.7. Evaporación	45
3.5. SUELOS EN LA REGIÓN DE LA COMARCA LAGUNERA	45
3.6. SELECCIÓN DE LA ESPECIE VEGETAL PARA LA FITORREMEDIACIÓN	45
3.7. MATERIAL VEGETATIVO COLECTADO	45
3.8. SUSTRATOS UTILIZADOS	46
3.9. LLENADO DE MACETAS	46
3.10. TRATAMIENTOS DE ESTUDIO	46
3.11. DISEÑO EXPERIMENTAL	46
EL DISEÑO EXPERIMENTAL UTILIZADO FUE EN UN ARREGLO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR.	46
3.12. DISTRIBUCIÓN Y COLOCACIÓN DE MACETAS EN EL ÁREA DE SOMBREADERO	47
3.13. TRASPLANTE	47
3.14. RIEGOS	47
3.15.1. Análisis químico de la muestra obtenida del suelo-problema	48
3.15.2. Análisis físico-químico del suelo-problema	49
3.15.3. Análisis químico del agua corriente para el riego	49
3.15.4. Muestras de suelo obtenidas durante el desarrollo de la planta	50
3.16. MUESTRAS DE AGUA LIXIVIADA OBTENIDAS DURANTE EL DESARROLLO DE LA PLANTA	51
3.17. MUESTRAS VEGETALES DE RAÍZ, TALLO Y HOJAS OBTENIDAS DURANTE EL DESARROLLO DE LA PLANTA	52
3.18. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	55
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	56
4.1. DEL ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL SUELO-PROBLEMA	56
4.2. DEL AGUA DE RIEGO CORRIENTE	57
4.2.1. Análisis químico del agua de riego corriente	57
4.2.2. Primer análisis químico del agua de riego (lixiviada) obtenida durante el desarrollo de la planta (101 ddt)	58
4.2.3. Segundo análisis químico del agua de riego (lixiviada) obtenida durante el desarrollo de la planta (140 ddt)	59
4.3. DEL ANÁLISIS QUÍMICO DEL SUELO DURANTE EL DESARROLLO DE LA PLANTA	61
4.3.1. Del primer análisis químico del suelo a los 101 ddt	61
4.3.2. Del segundo análisis químico del suelo a los 126 ddt	62
4.3.3. Del tercer análisis químico del suelo a los 140 ddt	63
4.4. DEL ANÁLISIS VEGETAL EN LA PLANTA	65
4.4.1. Del primer análisis vegetal de la raíz a los 101 ddt	65
4.4.2. Del segundo análisis vegetal de la raíz a los 126 ddt	66
4.4.3. Del tercer análisis vegetal de la raíz a los 140 ddt	67
4.5. DEL ANÁLISIS VEGETAL DEL TALLO	68
4.5.1. Del primer análisis vegetal del tallo a los 101 ddt	68
4.5.2. Del segundo análisis vegetal del tallo a los 126 ddt	69
4.5.3. Del tercer análisis vegetal del tallo a ddt los 140	70
4.6. DEL ANÁLISIS VEGETAL DE LAS HOJAS	72

<i>4.6.1. Del primer análisis vegetal de las hojas a los 101 ddt</i>	72
<i>4.6.2. Del segundo análisis vegetal de las hojas a los 126 ddt</i>	73
<i>4.6.3. Del tercer análisis vegetal de las hojas a los 140 ddt</i>	73
V. CONCLUSIONES	75
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Partes vegetativas de una planta de <i>Nicotiana glauca</i>	8
Figura 3.1. Región de la Comarca Lagunera en el estado de Coahuila y Durango. UAAAN UL, 2018.	41
Figura 3.2. Localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna en el municipio de Torreón, Coahuila. UAAAN UL, 2018.	42
Figura 3.3. Localización del sitio experimental en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. UAAAN UL, 2018.	43
Figura 4.1. Valores de los metales pesados encontrados y expresados en kg ha^{-1} de la muestra de suelo-problema obtenida del suelo colectado en los alrededores de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V., y realizado en el laboratorio de dicha empresa. UAAA	57
Figura 4.2. Valores de los metales pesados encontrados y expresados en g ha^{-1} del primer muestreo de agua lixiviada obtenida a los 101 ddt en las macetas con las plantas de Virgino en desarrollo. UAAAN UL, 2018.	59
Figura 4.3. Valores de los metales pesados encontrados y expresados en g ha^{-1} en el segundo muestreo de agua lixiviada obtenida a los 140 ddt y a los 39 días después del primero en las macetas con las plantas de Virgino en desarrollo. UAAAN UL, 2018.	60
Figura 4.4. Valores de los metales pesados expresados en kg ha^{-1} en el primer muestreo de suelo-problema obtenido durante el desarrollo de la planta a los 101 ddt. UAAAN UL, 2018	62
Figura 4.5. Valores de los metales pesados expresados en kg ha^{-1} en el segundo muestreo de suelo-problema obtenido durante el desarrollo de la planta a los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.	63
Figura 4.6. Valores de los metales pesados expresados en kg ha^{-1} en el tercer muestreo de suelo-problema obtenido durante el desarrollo de la planta a los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.	64

Figura 4.7. Valores encontrados en el primer análisis vegetal de raíz en la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , los 101 ddt. UAAAN UL, 2018.	66
Figura 4.8. Valores encontrados en el segundo muestreo de la raíz de la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.	67
Figura 4.9. Valores encontrados en el tercer muestreo de la raíz de la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.	68
Figura 4.10. Valores encontrados en el primer muestreo del tallo de la planta de <i>Nicotiana glauca</i> los 101 ddt. UAAAN UL, 2018.	69
Figura 4.11. Valores encontrados en el segundo análisis vegetal del tallo en la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.	70
Figura 4.12. Valores encontrados en el tercer análisis vegetal del tallo en la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , a los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.	71
Figura 4.13. Valores encontrados en el primer análisis vegetal de hojas en la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , los 101 ddt. UAAAN UL, 2018.	72
Figura 4.14. Valores encontrados en el segundo análisis vegetal de hojas en la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.	73
Figura 4.15. Valores encontrados en el tercer análisis vegetal de hojas en la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , a los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.	74

ÍNDICE DE CUADROS

	pág.
Cuadro 2.1. Límites máximos permisibles respecto a diferentes contaminantes en el suelo (SEMARNAT/SSA1-2004).	19
Cuadro 2.2. Ventajas y desventajas de la fitorremediación (Carpena, 2007)	38
Cuadro 3.1. Distribución de los tratamientos de estudio y sus repeticiones correspondientes. UAAAN UL, 2018.	47
Cuadro 3.2. Valores correspondientes al análisis de suelo-problema, realizado en el laboratorio de empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. UAAAN UL, 2018.	48
Cuadro 3.3. Valores correspondientes al análisis físico-químico del suelo-problema, realizado en el laboratorio de Suelos. UAAAN UL, 2018.	49
Cuadro 3.4. Valores correspondientes a los resultados del muestreo del agua de riego corriente utilizada en el riego de macetas.	48
Cuadro 3.5. Valores encontrados en los tres muestreos de suelo realizados en las macetas durante el desarrollo de la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. UAAAN UL, 2018.	51
Cuadro 3.6. Valores correspondientes a los dos muestreos del agua de riego corriente utilizada en el desarrollo de la planta de <i>Nicotiana glauca</i> , realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V.	51
Cuadro 3.7. Características vegetativas de la planta de Virgino (<i>Nicotiana glauca</i>), obtenidas durante el desarrollo a los 101 ddt, 126 ddt y 140 ddt, utilizada para el análisis en laboratorio de la UAAAN UL 2018.	52
Cuadro 3.8. Valores correspondientes al primer análisis vegetal realizado en dos plantas de <i>Nicotiana glauca</i> , durante su desarrollo a los 101 ddt y realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V.	53

Cuadro 3.9. Valores correspondientes al segundo muestreos vegetales en plantas de *Nicotiana glauca*, durante su desarrollo y realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central. UAAAN UL 2018. 54

Cuadro 3.10. Valores correspondientes al tercer muestreo vegetal en plantas de *Nicotiana glauca*, durante su desarrollo y realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central. UAAAN UL 2018. 55

I.- INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, los recursos naturales han sufrido fuertes y continuos procesos de degradación debido al aprovechamiento intensivo y al manejo irracional al que han sido sometidos (Vilches y Gil Pérez, 2003).

La contaminación del suelo, hoy en día viene a ser uno de los temas ambientales más importantes para la Sociedad y la Administración Mundial. La caracterización, evaluación y remediación de un suelo contaminado es uno de los principales retos ambientales hoy en día. La peligrosidad de los contaminantes en los suelos viene dada no sólo por su concentración total, sino especialmente por su disponibilidad. (Bovet *et al.*, 2008).

En México, como en muchos otros lugares en el mundo, existen innumerables áreas con fuerte contaminación ambiental a causa de actividades mineras que se han llevado a cabo por siglos; Sin embargo el manejo inadecuado de los residuos ha tenido como consecuencia la aparición de problemas de contaminación, para los cuales el ambiente no está adaptado tampoco la sociedad preparada. Entre ellos se destacan los que se producen a causa de la extracción y el manejo de metales pesados (Carpena, 2007).

En la ciudad de Torreón, la que se encuentra dentro del estado de Coahuila, se ha detectado una alta contaminación de metales pesados como Plomo (Pb) en suelo y aire. Sin embargo la presencia de metales pesados particularmente el Plomo genera un grave problema y representa un gran riesgo de salud en la población. El problema de contaminación en las ciudades además es provocado por otros metales como el Cadmio (Cd), el Arsénico (As), el Hierro (Fe) y el Cobre (Cu) entre otros elementos altamente dañinos para los humanos. Esto se debe al funcionamiento de la cuarta fundidora más importante del mundo, que se refiere a

la compañía Met-Mex Peñoles, situada en la ciudad de Torreón, Coahuila. (Valdés, 1999).

Actualmente existen estudios encaminados a resolver la contaminación originada por los metales pesados emanados al aire y depositados en los suelos. Mediante estrategias basadas en el uso de plantas vegetales con propiedad de acumular metales pesados en sus diferentes órganos como la raíz, el tallo y las hojas denominado también proceso de “Fitorremediación” que consiste en la remoción, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos que resultan tóxicos en suelo, aire y agua (Harvey *et al.*, 2002).

Acorde a la problemática encontrada se planteó realizar este trabajo de investigación donde se utilizaran plantas vegetales hiperacumuladoras de metales pesados para evaluar la capacidad de absorción de metales pesados como la planta de Virginio (*Nicotiana glauca*).

1.1 Objetivos

1.1.1. Evaluar la capacidad de extracción de metales pesados (Arsénico, Plomo, Cadmio, Hierro y Zinc) del suelo por la especie vegetal *Nicotina Glauca*.

1.1.2. Determinar la cantidad de metales pesados extraídos (Arsénico, Plomo, Cadmio, Hierro y Zinc) y acumulados en raíz, tallo y hojas de la especie vegetal *Nicotiana glauca*.

1.2. Hipótesis

1.2.1. Hipótesis nula (H₀). Las plantas de *Nicotina Glauca*, extraen cantidades considerables de metales pesados del suelo.

1.2.2. Hipótesis alternativa (H_a). Las plantas de *Nicotina Glauca*, no extraen cantidades considerables de metales pesados del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen

La planta de *Nicotiana glauca*, es una especie arbustiva nativa de Sudamérica. Está aclimatada en los climas áridos y semiáridos y a las condiciones de déficit de agua y altas temperaturas, denominada popularmente palán palán en sus países de origen (Argentina y Bolivia) y de muchas otras maneras donde se ha introducido. Es una especie del género *Nicotiana*, el mismo género que el tabaco corriente de la familia de las Solanáceas. El palán o virginio se comporta como pionera en ecosistemas perturbados y se considera una especie modelo para llevar a cabo estudios de fitorremediación, por su capacidad de resistir elevadas concentraciones de Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cadmio (Ca) y Cobalto (Co) (Pérez, 2008).

Es una planta nativa del noroeste argentino y el sur de Bolivia, donde crece hasta en altitudes de 3700 msnm. También suele encontrarse en muchos pueblos, donde crece sobre muros de construcciones y en terrenos baldíos. Es una especie con un rápido crecimiento y alta producción de biomasa. (Usher 1974).

Toda la planta contiene *Nicotina*, la cual ha sido extraída y usada como insecticida Ocasionalmente (Uphof, 1959). Se ha naturalizado en todo América, convirtiéndose en una especie invasora. Desde 1690 se ha utilizado extractos acuosos de hojas de Palán o Virginio contra insectos masticadores y chupadores de las plantas comestible (Ware, 1980). Este alcaloide presenta una gran toxicidad para los insectos, ya que actúa como veneno cardíaco y neurotrópico a la vez (Dajoz, 1969). *Nicotiana glauca*, es una planta venenosa para el ganado, siendo las hojas y las ramas jóvenes las partes más tóxicas (Parker, 1972). La muerte se produce por parálisis de los músculos respiratorios, siendo la dosis mortal para el hombre por vía oral de 50 a 60 mg (Lauwerys, 1990).

En México se le ha encontrado en Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, entre otros (López, 2009).

La planta se encuentra ampliamente distribuida en nuestro país y ha llegado a ser reconocida en muchos lugares de nuestro territorio donde por ejemplo se le conoce como: Hierba del zopilote, tabaquillo, gigantón, tabaco silvestre, buena moza (en Querétaro), Cornetón, maraquiana, álamo loco (en Sonora), Gigante (en Aguascalientes, Sinaloa y San Luis Potosí), Mostaza montés (en Oaxaca), Hoja de cera en Campeche, Levántate Don Juan en Baja California, Tacote en Durango, Tabaco amarillo (en Jalisco), Tronadora de España en Guanajuato, Virgino (Chihuahua, Durango y Coahuila). Otros nombres son tabaco cimarrón, gretaño, hierba del gigante, tabaco, tabaquillo, palo virgen (Baldwin, 1993).

El nombre del género *Nicotiana*, fue otorgado por Carl Von Linnaeus en la obra *Species Plantarum Tomo I*, en el año de 1753. Linnaeus dio este nombre al género tomando como base a la planta americana *Nicotiana tabacum* (conocida como Tabaco) y en honor a la persona que difundió al tabaco en Europa, el diplomático francés Jean Nicot, quien lo introdujo en la corte francesa en forma de rapé (un preparado molido y aromatizado consumido vía nasal, donde era una costumbre del América precolombina). *Nicotiana* tuvo tanto éxito que la Reyna Catalina de Medica esposa de Enrique II de Francia se convirtió en una asidua consumidora del rapé, y de ahí se expandió rápidamente entre la personas ricas de Francia. (Panter *et al.*, 1992)

Actualmente el componente activo del tabaco, la *Nicotiana*, conserva el nombre de este diplomático y se le ha añadido el sufijo “ina” para indicar su

procedencia orgánica. El género *Nicotiana*, tiene aproximadamente 56 especies reconocidas por la ciencia. (Panter *et al.*, 1992)

En cambio el nombre específico, *glauca*, proviene del griego antiguo *glaukos* y se entiende como azul verdoso o azul grisáceo. El nombre fue otorgado en 1828 por el médico y botánico británico Robert Graham en la revista *Edinburgh New Philosophical Journal* Volumen 5. (Nattero, 2007).

2.2. Descripción botánica de la planta *Nicotina glauca*

La *Nicotina glauca*, es un arbusto poco ramificado o árbol de vida corta. Su tamaño va de 1,5 a 6 m de alto. Es una planta ornitofilia que presenta flores tubulares de 30 a 57 mm de longitud y de 6 a 11 mm de diámetro (Nattero *et al.*, 2011). La anthesis ocurre a lo largo del día, y las flores duran alrededor de 3 a 4 días (Schueller, 2004).

Las flores se disponen en panículas, no poseen olor y producen abundante cantidad de néctar (20µl aproximadamente) de moderada concentración de azúcar (25% de sacarosa aproximadamente). Schueller, (2004).

Dentro de su área de distribución natural, al igual que en áreas invadidas del Hemisferio Sur, la temporada de floración se extiende desde principios de septiembre hasta Abril, mientras que en áreas invadidas del Hemisferio Norte la floración se extiende desde Marzo hasta octubre. Las flores son típicamente amarillas y tubulares, aunque en algunas poblaciones nativas hay polimorfismo de color, que incluye plantas con flores de color rojo oscuro, amarillo rojizo y amarillo (Nattero, 2007).

El virginio tiene un largo período de floración (desde primavera hasta fines del verano) y por ende, un largo período de dispersión de semillas maduras, que se extiende hasta el otoño. Ello le asegura a la especie que algunas de sus numerosas

semillas encuentren las condiciones necesarias para la supervivencia inicial y arraigo, y poder así soportar las difíciles condiciones de estrés en las que se habrá de desarrollar posteriormente (Falasca, 2012).

2.2.1. Semilla

Germinan con 20°C en 10 a 20 días, siendo el rango de temperaturas óptimas para la fase de germinación: 18°C a 22°C y para la fase de floración-fructificación de 20°C a 30°C, precisando un período medio libre de heladas de 90 a 120 días (Falasca, 2012). Una planta adulta puede producir entre 10,000 y 1 millón de semillas (Florentine *et al.*, 2006).

2.2.2. Tallo

No muestra pelos, verdoso o azul-purpúreo con ramificados de hasta 6 m. Cuando se corta el tallo, la especie demuestra elevada capacidad de rebrote (Buchanan, 1987).

2.2.3. Hojas

Son alternas, ovadas con base cordado, elípticas o lanceoladas, lámina de 3 a 25 cm de largo, generalmente dos veces más larga que el pecíolo, por 1 a 8 cm de ancho, ápice agudo, base obtusa, sin pelos (Buchanan, 1987).

2.2.4. Inflorescencia

Con panículas cortas, pedicelos de 3 a 10 mm de largo. Las flores son con cáliz de 5 a 15 mm de largo, cilíndrico, sin pelos o escasamente pubescente, sus dientes triangulares, mucho más cortos que el tubo; corola en forma de trompeta, de 3 a 4 cm de largo por 4 a 7 mm de ancho, generalmente amarilla, sin pelos o escasamente pubescente, limbo casi circular, de 3 a 7 mm de diámetro, verde en el botón, más tarde verdoso o amarillo; estambres subyúgales, extendiéndose casi hasta el borde superior del tubo de la corola, filamentos sin pelos, doblados inmediatamente arriba de su inserción en el tubo de la corola. (Buchanan, 1987).

2.2.5. Fruto

El fruto es una cápsula de 7 a 15 mm de largo, ampliamente elipsoide; semillas más largas que anchas, más o menos angulares, lateralmente comprimidas, de aproximada mente 0,5 mm de largo, café, superficie reticulada (López, 2009).

2.3. Tipo de propagación en la planta de *Nicotiana glauca*

2.3.1. Propagación sexual

Se propaga por semillas y la diseminación de las mismas se realiza por medio del viento principalmente (Hurrell, 2003). En otras partes la diseminación ocurre a través del agua (Florentine *et al.*, 2006).

2.3.2. Propagación asexual

También puede reproducirse por vía asexual mediante estacas Partes vegetativas de *Nicotiana glauca*. a) Parte superior de un tallo con hojas y flores, b) Flor en anthesis, c) Corola diseccionada con cuatro de los cinco estambres y el pistilo, d) Antera, e) Parte superior de estilo y estigma, f) Cáliz en la fructificación, g) Fruto, h) Semilla (Hurrell 2003).

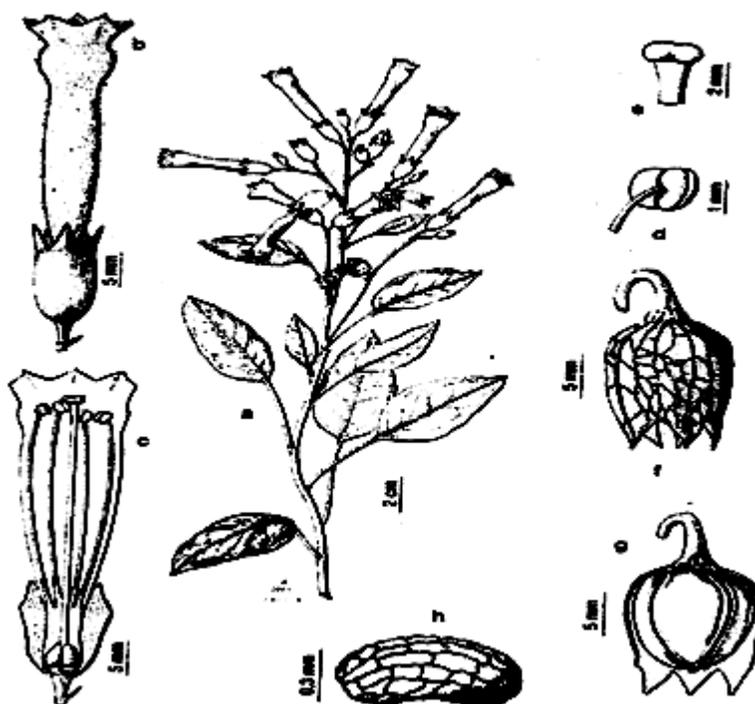


Figura 2.1. Partes vegetativas de una planta de *Nicotiana glauca*

2.4. Requerimientos de clima y suelo

2.4.1. Suelos

La especie de *Nicotiana glauca*, se desarrolla mejor en suelos con pH ácidos, neutros o alcalinos. Su parte subterránea crecerá con vigor en suelos con textura arenosa, franca o arcillosa, éstos se pueden mantener generalmente húmedos. Es de suma importancia regar teniendo en cuenta la información anterior, pero también factores tales como la exposición al sol, la temperatura, la textura del suelo, la época del año, entre otros. Todo ello para buscar un equilibrio más o menos constante en la humedad del suelo. No tolera los encharcamientos, por lo que la zona de plantación debe estar muy bien drenada. (Nattero 2007).

2.4.2. Luz

En cuanto a sus necesidades de luz, es una planta muy exigente, sólo puede situarse en un lugar con exposición directa al sol para no repercutir negativamente en su crecimiento de forma normal. La especie necesita más de 14 horas de luz por día para inducir floración (Buchanan, 1987).

2.4.3. Clima

Esta especie está aclimatada a áreas con climas cálidos áridos y semiáridos, y a las condiciones de déficit de agua y altas temperaturas. El límite de tolerancia a bajas temperaturas es de -5°C (Huxley, 1992).

2.5. Requerimientos de agua

Cuando las precipitaciones anuales son inferiores a 100 mm, se califica el área como no apta para el desarrollo de la planta. Sin embargo en el rango de 100 a 200 mm, la planta puede completar su ciclo. Bajo esta condición el área es clasificada como marginal. En el rango de los 200 a los 400 mm anuales el área es clasificada como apropiada y de los 400 a los 800 mm anuales como un área muy apropiada. Si las precipitaciones anuales superan los 800 mm anuales el área es clasificada como zona marginal porque la especie en cuestión no tolera encharcamientos o los excesos de agua. (Buchanan, 1987).

2.6. Componentes químicos de *Nicotiana glauca*

La planta de *Nicotiana glauca*, se caracteriza por la presencia de alcaloides, de los cuales se han identificado la Anabasina en todos los órganos de la planta. Anatabina, Nicotina, Nor-nicotina, N'-nor-anabasina, 2-3 Bupiridina, Cotinina, Miosmina, Nicotelina, Óxido de nicotina, Ácido nicotínico y 3-Acetil-piridina en la planta completa. Además en la hoja se encuentra la presencia del Flavonoide Rutín (Buchanan, 1987).

2.7. Hábitat para la *Nicotiana glauca*

Su hábitat es rústico, muy común a las orillas de caminos y carreteras, a lo largo de ríos y arroyos y cerca de cultivos y patios de casas. Por climas se distribuye en la selva baja caducifolia, bosque de pino-encino, matorral xerófilo, zonas áridas. Se dispersa por el viento o agua. Florece todo el año. (López, 2009).

2.8. Germinación

La semilla germina en los 15 días posteriores a su siembra. Cuando la planta es bastante grande se trasplanta a la intemperie después de las últimas heladas. Requiere del sol directo y crece bien en suelos ricos en nutrientes. En las regiones con inviernos fríos puede cultivarse como planta anual o ser guardada en interiores durante el invierno (Carrere, 2007).

2.9 Características de su crecimiento

Es una planta leñosa, la que crece como un árbol pequeño. Si se cultiva en lugares de interior, necesita más de 14 horas diarias de luz para poder florecer. Es una planta que rara vez es cultivada, sino que aparece de manera silvestre por doquier, principalmente en terrenos incultos, escombreras y márgenes de carreteras. Prefiere sitios que resultan extraños e incluso en el caso de terrenos baldíos, es más fácil encontrarlo creciendo sobre las paredes que en las pilas de escombros o en la tierra. También se ha visto creciendo entre las veredas, entre los adoquines y en calles empedradas (Carrere, 2007).

2.10. Clasificación taxonómica de la *Nicotina glauca*

Según Ibarra, (2003) la clasificación taxonómica de la planta de *Nicotiana glauca*, es la siguiente.

Nombre científico o latino: *Nicotina glauca*

Nombre común o vulgar: Tabaco ornamental, Palan, Gandul, Árbol del tabaco, Tabaco negro, Tabaco moruno.

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsidae

Orden: Solanales

Familia: Solanácea.

Subfamilia: Nicotineae

Género: Nicotiana

Especie: Nicotiana Glauca

2.11. Usos como planta fitorremediadora

El virginio se comporta como una planta pionera en ecosistemas perturbados y es considerada una especie modelo para llevar a cabo estudios de fitorremediación, por su capacidad de resistir elevadas concentraciones de Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cadmio (Cd) y Cobalto (Co). Tiene un uso medicinal empleada en cataplasmas para calmar dolores, además al inhalarse descongestiona las vías respiratorias, puede ser utilizada como una planta ornamental ocasional. Es altamente tóxica para animales domésticos (Pérez, 2008).

2.12. Metales pesados y elementos Traza en el suelo

En la tabla periódica se incluyen alrededor de 70 elementos metálicos y de ellos 59 pueden ser considerados “metales pesados”, que son aquellos con peso atómico mayor que el del Hierro (Fe) 55.85 g mol^{-1} . Con esta precisión se excluirían metales con pesos atómicos menores que el del Hierro (Fe) y que con frecuencia pueden ser metales contaminantes, como el Vanadio (V) 50.95 g mol^{-1} , Manganeso (Mn) 54.44 , Cromo (Cr) 52.01 g mol^{-1} y otros que no son metales como Arsénico (As), Flúor (F) y el Fósforo (P). Por ello, resulta mejor hablar de contaminación por

“elementos traza”, si bien hay que reconocer que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son “metales pesados”. A veces, la contaminación del suelo se puede producir también por altas concentraciones de elementos mayoritarios como el Sodio (Na), el Hierro (Fe) y el Aluminio (Al). Los elementos traza están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg kg^{-1}) en la corteza de la Tierra, suelos y plantas. Muchos de ellos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y seres humanos, aunque también pueden ser tóxicos si se superan ciertos umbrales. En general todos los elementos traza son tóxicos si se ingieren o se inhalan en cantidades suficientemente altas y durante largos períodos de tiempo (Wild, 1992).

2.13. Origen de los metales pesados en los suelos

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares; en este caso se encuentra asociada al desarrollo industrial de actividades como la fundición. Investigaciones científicas han demostrado las repercusiones negativas de los metales pesados en el ecosistema y la salud del ser humano. De los 106 elementos conocidos por el hombre, 84 son metales, por lo que no es de extrañar que las posibilidades de contaminación metálica en el ambiente sean numerosas. (Mahler, 2003).

Las principales fuentes de metales pesados son de 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 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, 2004).

2.13.1. Presencia de metales pesados en los suelos

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas. En los suelos se pueden encontrar diferentes metales, formando parte de los minerales propios; como son Silicio (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca), Sodio (Na), Potasio (K), Magnesio (Mg). También puede encontrarse Manganeseo (Mn), que generalmente se presenta en el suelo como Óxido y/o Hidróxido, formando concentraciones junto con otros elementos metálicos. Algunos de estos metales son esenciales en la nutrición de las plantas, así son requeridos algunos de ellos como el Manganeseo (Mn), imprescindible en el fotosistema y activación de algunas enzimas para el metabolismo vegetal (Mahler, 2003).

Se consideran entre los metales pesados elementos como Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Plata (Ag), entre otros, constituyen un grupo de gran importancia, ya que algunos de ellos son esenciales para las células, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos, organismos del suelo, plantas y animales incluido el hombre (Spain *et al.*, 2003).

En el suelo, los metales pesados, pueden estar presentes como iones libres o disponibles, compuestos de sales metálicas solubles o bien, compuestos insolubles o parcialmente solubilizables como Óxidos, Carbonatos e Hidróxidos, (Pineda, 2004).

2.13.2. Efectos 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, 2000).

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 (Martín, 2000).

El pH, es un factor esencial, para que la mayoría de los metales tiendan a estar más disponibles en un pH ácido, excepto Arsénico (As), Molibdeno (Mo), Selenio (Se) y Cromo (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 (M.O.) puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como es el Cobre (Cu), que pueden quedar en forma no disponible por las plantas, motivo por el cual, algunas plantas que se desarrollan en suelos ricos en materia orgánica, presentan carencia de elementos como el Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (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 (Pineda, 2004).

2.13.3. Movilización de metales pesados en el suelo

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 hacia las aguas subterráneas y difiere de si su origen es natural o entrópico y, dentro de este último, al tipo de fuente entrópica (Burt *et al.*, 2003).

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).

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, 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).

2.14. El Plomo

El Plomo (Pb), es uno de los metales pesados más conocido desde la antigüedad y está ganando considerable importancia como un potente contaminante ambiental, altamente tóxico para el hombre. Su presencia en el ambiente se debe principalmente a actividades antropogénicas como la industria, minería y al uso de las gasolinas con plomo y disposición de ciertos desechos industriales (Chaney, 1994).

El Plomo es un elemento químico de la tabla periódica, cuyo símbolo es Pb (del latín *Plumbum*) y su número atómico es 82 según la tabla actual. Este elemento químico tiene una gran elasticidad molecular. Cabe destacar que la elasticidad de este elemento depende de las temperaturas del ambiente, las cuales distienden sus átomos, o los extienden. Es un metal pesado con densidad relativa o gravedad específica 11,4 a 16 °C, de color plateado con tono azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico y se funde con facilidad. Su fusión se produce a 327,4 °C y hierve a 1725 °C. Las valencias químicas normales son 2 y 4 (Cooper, 1999).

El Plomo puede permanecer como residuo por 1000 a 3000 años en los suelos de clima templado (Bowen, 1979) se acumula en las capas superficiales del suelo y, por lo tanto, es difícil medir confiablemente su concentración. Su disponibilidad depende de las condiciones del suelo, como el tamaño de partícula, la capacidad de intercambio catiónico y de factores de las plantas, como la superficie y exudados de la raíz, micorrización y de la transpiración (Davies, 1995)

El Pb, no solo afecta el crecimiento de las plantas y su productividad, sino que entra en la cadena alimenticia, causando daños en la salud del hombre y animales, tiene efectos tóxicos en muchos órganos, sistemas y procesos fisiológicos. (Seaward, 1991).

Los compuestos de Plomo (Pb) más utilizados en la industria son los óxidos de Plomo (Pb), el tetra etilo de Plomo y los silicatos de Plomo. El plomo (Pb) forma aleaciones con muchos metales, y, en general, se emplea en esta forma en la mayor parte de sus aplicaciones. Es un metal pesado y tóxico, y la intoxicación por Plomo (Pb) se denomina saturnismo o plumbosis (Seaward, 1991).

2.14.1. Efecto del Plomo en la salud

El Plomo (Pb) 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 (Matte, 2003).

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).

2.14.2. Plomo en el medio ambiente

Desde hace algunas décadas la importancia del Plomo (Pb) como contaminante eco toxicológico ha sido bien conocida. Así, el impacto de los metales pesados de origen antropogénico en el medio ambiente, ha sido objeto de estudio en varias investigaciones. El Plomo (Pb) se considera un contaminante eco toxicológico ya que su uso provoca contaminación ambiental y exposición en humanos. La principal vía de biodisponibilidad son el suelo y el Polvo, donde se concentra y por medio del cual ingresa a los organismos. El manejo inadecuado de materiales con Plomo ha sido causante de numerosos problemas ambientales en todo el mundo; sin embargo, no todo el Plomo del suelo presenta el mismo grado de movilidad o biodisponibilidad. La distribución química del Plomo en el suelo depende del pH, de la mineralogía, textura, materia orgánica así como de la naturaleza de los compuestos de plomo contaminantes. El suelo es uno de los mayores reservorios en los cuales se acumula la contaminación ambiental (Alloway, 1995).

Más del 90% de la contaminación ambiental producida es retenida en las partículas de suelo y cerca del 9% es interceptada en los sedimentos acuáticos. Particularmente, la contaminación de un suelo contaminado con Plomo (Pb) es de preocupación ya que éste presentan un alto tiempo de residencia en el suelo,

estableciéndose un equilibrio dinámico con la hidrosfera, atmósfera y biosfera y de esta forma alterando el ecosistema, incluyendo al ser humano (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 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 (Seaward, 1991).

Cuadro 2.1. Límites máximos permisibles respecto a diferentes contaminantes en el suelo (SEMARNAT/SSA1-2004).

Contaminante	Uso agrícola y residencial (mg kg ⁻¹)	Uso industrial (mg kg ⁻¹)
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
Talio	5.2	67
Vanadio	550	7200

2.14.3. Efecto del Plomo en plantas

Las plantas en determinadas ocasiones se encuentran expuestas a la presencia de los metales pesados, presentes en el suelo y agua naturalmente, como contaminantes generados por actividades humanas (Wickland, 1990). En sitios contaminados con Plomo (Pb) y otros metales pesados, la estructura de la vegetación y biodiversidad se encuentra reducida, usualmente se observan parches en el suelo y los árboles están esparcidos o ausentes (Wickland, 1990).

Las altas concentraciones de metales pesados inhiben la germinación de semillas, el crecimiento y desarrollo de las plantas, además de alterar procesos bioquímicos y fisiológicos. Su presencia daña las membranas de las células, reduce la transpiración, impide la síntesis de proteínas, daña e inhibe la fotosíntesis y afecta la actividad de varias enzimas. Afectan también la radícula saliente y el crecimiento de la planta (Foy, 1979).

El efecto de los metales pesados en la germinación de semillas puede depender de su penetración a través de la cubierta de la semilla, lo cual puede alterar una serie de procesos fisiológicos involucrados en la germinación (Foy, 1979).

En algunas especies de plantas, el Pb penetra fácilmente la cubierta de la semilla, lo que impide su germinación (Wierzvicka, 1998). Sin embargo, existen especies vegetales endémicas de suelos metalíferos que pueden tolerar grandes e inusuales cantidades de metales u otros componentes tóxicos (Bañuelos, 1997).

Se ha demostrado que en este tipo de plantas tolerantes a la presencia de metales pesados, como el Plomo (Pb), las raíces tienen una habilidad para captar cantidades significativas de Plomo (Pb) mientras que, simultáneamente, se restringe su desplazamiento hacia las partes aéreas (Sharma, 2005).

La mayor parte del Plomo (Pb) captado por las plantas permanece en las raíces. En este sentido, la distribución de metales pesados en las células y tejidos de las plantas varía dependiendo en la concentración del metal en el medio, de la duración de la exposición y de las propiedades físicas y químicas del ion, lo que determina la factibilidad de que éste pase a través de las barreras fisiológicas (Sharma, 2005).

2.14.4. Fuentes de contaminación de Plomo en México

Este elemento es una de las bases de la civilización tecnológica, ya que infinidad de industrias lo utilizan como materia prima o como componente básico de sus productos. Su intenso uso se debe a una serie de propiedades que lo hacen poco menos que imprescindible en algún tipo de industrias. Entre estas propiedades las más importantes son: densidad elevada, punto de fusión bajo, inercia química entre los ácidos, ductilidad, muchas de sus sales son corrosivas y algunas de sus sales son fuertemente tóxicas. La contaminación natural por plomo es pequeña. La contaminación artificial, es decir aquella procedente de la actividad humana es grande (Kumar, 1995).

Dos son las principales fuentes: emisiones industriales (fundiciones de Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), y Plomo (Pb); fábricas de pinturas, cerámicas, cristalería, pólvoras y explosivos; combustión del Carbono (C), y emisiones producidas por los vehículos.

Actualmente se está restringiendo el contenido de plomo de las gasolinas, para reducir así las emisiones a la atmósfera (Seaward, 1993).

La industria minera, es otra fuente importante de contaminación, en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país. La excavación de minas, la remoción de minerales y el proceso y la extracción de metales puede causar daños ambientales y, en casos extremos, destruir el ecosistema; por ejemplo, se pueden dañar tierras de cultivo,

favorecer la erosión y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como Arsénico (As), Selenio Se, Plata (Pb), Cadmio (Cd) y Óxidos de Azufre (S), entre otros. Asimismo, el material subterráneo puede generar volúmenes de residuos hasta ocho veces superiores al original (Volke *et al.*, 2005).

2.14.5. Problema del Plomo en las ciudades

En la región de la Comarca Lagunera, en el estado de Coahuila y Durango, se ha detectado y reportado una alta contaminación de Plomo (Pb) en el suelo y aire. La presencia de metales pesados, particularmente Plomo (Pb) genera un grave problema y representa un gran riesgo dado que las condiciones ambientales de la región con suelos secos y fuertes vientos que generan tolváneras, ocasionando la dispersión de los contaminantes en toda la región, provocando con ello riesgos de salud en la población humana (Cervantes, 2000).

El problema en particular en la ciudad de Torreón Coahuila, es provocado principalmente por el Plomo (Pb), el Cadmio (Ca) y el Arsénico (As), tres elementos altamente dañinos para el ser humano. Sin embargo, los estudios y las acciones que se han estado realizado en torno a este problema tienen como actor principal al Plomo (Pb). Esto no significa que el Plomo sea el más tóxico de los tres elementos de hecho ocurre lo contrario sino a que de los tres es el que ha ocasionado mayores problemas en la población y en todo el mundo. El envenenamiento por metales pesados es ocasionado por el funcionamiento de la cuarta fundidora más importante del mundo. En otros lugares puede presentarse la contaminación por Plomo pero las fuentes emisoras pueden ser distintas (Cervantes, 2000).

Además de las emisiones, hay un problema muy grave con las escorias de los procesos de esta planta; desde el inicio de sus actividades éstas se han acumulado grandes cantidades de residuos, depositados en un macro montículo

denominado “el cerro negro”. Dicha empresa es la responsable de emitir altos índices de agentes contaminantes y que a la fecha sigue generando elevados niveles de Plomo y Cadmio entre otros contaminantes dañinos para el medio ambiente y para la salud de adultos y menores, como parte de los procesos industriales y metalúrgicos que en esa empresa se desarrollan (Cervantes, 2000).

La intoxicación que se hace patente en la ciudad provocando daños graves e irreversibles en el sistema nervioso central y periférico del ser humano. Se sabe que el Plomo es la principal causa de intoxicación en la ciudad, este se absorbe por ingestión o por inhalación, al contacto con la sangre y niveles altos de Plomo se puede provocar encefalopatía e incluso la muerte (Cervantes, 2000).

Los valores aceptables de Plomo en la sangre, aire y suelo son elevados y sobrepasan los valores permisibles en normas internacionales. Estas son tan solo algunas de las graves consecuencias que se generan por las altas emisiones de contaminantes en el municipio de Torreón, por lo que nuestra preocupación es eminente frente a los irreversibles daños ambientales (Cervantes, 2000).

2.15. El Arsénico

El Arsénico (As) se presenta en forma libre en pequeñas cantidades; en la corteza terrestre. Es un constituyente natural de los minerales de Plomo (Pb), Zinc (Zn), Oro (Au) y Cobre (Cu), que puede liberarse durante el proceso de fundición de los mismos. Los gases y el material en forma de partículas de la minería y fundiciones pueden actuar como fuentes contaminantes de Arsénico (Adriano, 2001).

En los suelos está uniformemente distribuido en los tipos de rocas más importantes ya que tiene gran afinidad a formar o existir en muchos minerales. Aunque los minerales y compuestos de arsénico son fácilmente solubles, la

migración de Arsénico está muy limitada debido a la fuerte adsorción por arcillas, hidróxidos y materia orgánica (Kabata, 2004).

2.15.1. Aplicaciones y producción del Arsénico

Se usa para librar al vidrio de los tonos verdosos y se agrega al Plomo (Pb) para volverlo más duro. También se le emplea en la elaboración de diversos insecticidas. Antes del advenimiento de los antibióticos se le empleaba como medicamento en dosis sumamente pequeñas para tratar padecimientos como la sífilis (Bernal, 2001).

Las reacciones del Arsénico (As) en los suelos están gobernadas por sus estados de oxidación (Kabata, 1992).

Se estima que la producción mundial de Arsénico (As) al año oscila entre 75.000 y 100.000 toneladas, de las cuales Estados Unidos utiliza la mitad (Bernal, 2001).

2.15.2. Efectos del Arsénico sobre la salud

El Arsénico (As) es uno de los elementos más tóxicos. Debido a sus efectos tóxicos, los enlaces de Arsénico elementos inorgánico ocurren en la tierra naturalmente en pequeñas cantidades. Los humanos pueden ser expuestos al Arsénico a través de la comida, agua y aire (Bernal, 2001).

La exposición al Arsénico (As) puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones. Es sugerido que la toma de significantes cantidades de Arsénico (As) puede intensificar las posibilidades de desarrollar cáncer de piel, pulmón, hígado, linfa (Kabata, 1992). A exposiciones a dosis elevadas el Arsénico (As) puede causar infertilidad y abortos en mujeres, puede causar perturbación de la piel, pérdida de la resistencia

a infecciones, perturbación en el corazón y daño del cerebro tanto en hombres como en mujeres, puede dañar el ADN. (Kabata, 1992).

2.15.3. Efectos ambientales del Arsénico

El Arsénico (As) puede ser encontrado de forma natural en la tierra en pequeñas concentraciones. Esto ocurre en el suelo y minerales y puede entrar en el aire, agua y tierra a través de las tormentas de polvo y las aguas de escorrentía (Fuente, 2009).

El ciclo del Arsénico (As) ha sido ampliado como consecuencia de la interferencia humana y debido a esto, grandes cantidades de Arsénico (As) terminan en el Ambiente y en organismos vivos. El Arsénico (As) es emitido en gran escala por las industrias productoras de Cobre (Cu), pero también durante la producción de Plomo (Pb) y Zinc (Zn) y en la agricultura (Fuente, 2009).

2.16. El Cadmio

Elemento químico relativamente raro, símbolo (Cd), número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc (Zn), con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, de color blanco con un ligero matiz azulado. Es más blando y maleable que el zinc (Zn), pero poco más duro que el Estaño (Sn). Peso atómico de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20°C (68°F). Su punto de fusión de 320.9°C (610°F) y de ebullición de 765°C (1410°F) son inferiores a los del Zinc (Zn). Hay ocho isótopos estables en la naturaleza y se han descrito once radioisótopos inestables de tipo artificial. El Cadmio es divalente en todos sus compuestos estables y su ion es incoloro (Margarita, 2010).

El Cadmio (Ca) no se encuentra en estado libre en la naturaleza y la greenockita (sulfuro de cadmio), único mineral de Cadmio (Ca), no es una fuente comercial de metal. Casi todo el que se produce es obtenido como subproducto de la fundición y refinamiento de los minerales de Zinc (Zn), los cuales por lo general contienen de

0.2 a 0.4%. Estados Unidos, Canadá, México, Australia, Bélgica, Luxemburgo y República de Corea son fuentes importantes, aunque no todos son productores (Margarita, 2010).

2.16.1. Efectos del Cadmio sobre la salud

El Cadmio (Cd) es dañino en dosis muy pequeñas. El envenenamiento por Cadmio (Cd) produce osteoporosis, enfisema pulmonar, cáncer de pulmón, cáncer de próstata, hipertensión, diversas cardiopatías y retraso en la habilidad verbal de los niños (Ramírez, 2002).

Otra alta exposición puede ocurrir con gente que vive cerca de los vertederos de residuos peligrosos o fábricas que liberan Cadmio en el aire y gente que trabaja en las industrias de refineras del metal. Cuando la gente respira el Cadmio este puede dañar severamente los pulmones. Esto puede incluso causar la muerte (Ramírez, 2002).

Otros efectos sobre la salud que pueden ser causados por el Cadmio son: Diarreas, dolor de estómago y vómitos severos, Fractura de huesos, Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, Daño al sistema nervioso central, Daño al sistema inmune, Desordenes psicológicos, Posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer (Alloway, 1995).

El Cadmio (Cd) no tiene función biológica esencial y tanto él como sus compuestos son muy tóxicos para plantas y animales. Casi todo el Cadmio (Cd) se obtiene como subproducto en el procesado de minerales de Zinc (Zn) Cobre (Cu) y Plomo (Pb), Alloway, (1995).

2.17. El Hierro

El Hierro (Fe), es un elemento metálico, magnético, maleable y de color blanco plateado, tiene de número atómico 26. También, es uno de los elementos metálicos más abundantes en el planeta. Constituye aproximadamente el 4.5% de la corteza terrestre (Lindsay, 1979).

2.17.1. Efectos del Hierro sobre la salud

El Hierro (Fe) puede ser encontrado en carne, productos integrales, patatas y vegetales. El cuerpo humano absorbe Hierro de animales más rápido que el Hierro de las plantas. El Hierro es una parte esencial de la hemoglobina: el agente colorante rojo de la sangre que transporta el oxígeno a través de nuestros cuerpos (Lucena, 2000).

Puede provocar conjuntivitis, coriorretinitis, y retinitis si contacta con los tejidos y permanece en ellos. La inhalación crónica de concentraciones excesivas de vapores o polvos de óxido de Hierro puede resultar en el desarrollo de una neumoconiosis benigna, llamada sideriosis, que es observable como un cambio en los rayos X. La inhalación de concentraciones excesivas de óxido de Hierro puede incrementar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón en trabajadores expuestos a carcinógenos pulmonares. (Juárez, 2008).

2.17.2. Efectos ambientales del Hierro

El Hierro (Fe) puede ser peligroso para el medio ambiente; se debe prestar especial atención a las plantas, el aire y el agua. Se recomienda encarecidamente que no se permita que el producto entre en el medio ambiente porque persiste en éste (Murad y Fischer, 1988).

2.18. El 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 (Zn) común se encuentra como isótopo de masa atómica 64 (Murad y Fischer, 1988).

Los usos más importantes del Zinc los constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. El Hierro (Fe) o el acero (recubiertos con Zinc (Zn) se denominan galvanizados, y esto puede hacerse por inmersión del artículo en Zinc fundido (proceso de hot-dip), depositando Zinc electrolíticamente sobre el artículo como un baño chapeado (electro galvanizado), exponiendo el artículo a Zinc en polvo cerca de su punto de fusión o rociándolo con Zinc fundido metalizado (Murad, 1988).

El Zinc (Zn) 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 (Zn), ZnS. Es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales. La deficiencia de Zinc en la dieta humana deteriora el crecimiento y la madurez y produce también anemia. La insulina es una proteína que contiene Zinc (Zn). El Zinc (Zn) está presente en la mayor parte de los alimentos, especialmente en los que son ricos en proteínas. En promedio, el cuerpo humano contiene cerca de dos gramos de Zinc (Zn) Murad, 1988.

2.18.1. Efectos del Zinc sobre la salud

El Zinc (Zn) es una sustancia muy común que ocurre naturalmente. Muchos alimentos contienen ciertas concentraciones de Zinc (Zn). El agua potable también

contiene cierta cantidad de Zinc (Zn). La cual puede ser mayor cuando es almacenada en tanques de metal. Las fuentes industriales o los emplazamientos para residuos tóxicos pueden ser la causa del Zinc (Zn) en el agua potable llegando a niveles que causan problemas (Rosado, 1998).

El Zinc (Zn) es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Cuando la gente absorbe poco Zinc (Zn) pueden experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor. Pequeñas llagas, y erupciones cutáneas. La acumulación del Zinc (Zn) puede incluso producir defectos de nacimiento (Rosado, 1998).

2.18.2. Efectos ambientales del Zinc

El Zinc (Zn) se encuentra de forma natural en el aire, agua y suelo, pero las concentraciones están aumentando, esto se debe a la implementación de Zinc (Zn) en las actividades humanas. La mayoría del Zinc (Zn) 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 (Zn) está todavía creciendo. Esto significa básicamente que más y más Zinc (Zn) termina en el ambiente (Rubio, 2007).

2.19. Biorremediación de suelos contaminados con metales pesados

El término “tecnología de remediación” implica el uso de cualquier operación unitaria o un conjunto de ellas, que altere la composición de un contaminante peligroso a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan su toxicidad, movilidad o volumen en la matriz o material contaminado (Volke, 2005).

Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en suelo de residuos peligrosos sin tratamiento y sus posibilidades de éxito. Antes

de considerar la aplicación de cualquier tecnología de remediación, es fundamental conocer ciertas características, tanto del suelo (factores ambientales), como del contaminante y de los Organismos vivos (plantas, hongos, bacterias etc.) presentes en el sitio (USEPA, 2001).

2.20. Factores ambientales

Dentro de los factores más importantes para la remediación de un suelo se encuentran las condiciones ambientales (temperatura, humedad, pH, etc.) y las características fisicoquímicas del suelo (Volqué, 2005).

2.21. Características de los contaminantes

La naturaleza y características del contaminante son variables de suma importancia para el éxito o fracaso de un proceso de remediación, dentro de las más importantes se encuentran: toxicidad, concentración, disponibilidad, solubilidad y absorción del contaminante a las superficies sólidas (Volqué, 2005).

2.22. Factores biológicos

Es un factor determinante para la aplicación de tecnologías biológicas. Este tipo de factores implica la verificación de la existencia de poblaciones de organismos y plantas nativas con capacidad para degradar o transformar el contaminante (USEPA, 2001).

Desde hace décadas se han propuesto algunas tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales, incluyendo tratamientos térmicos, biológicos y fisicoquímicos. Sin embargo, los tratamientos térmicos no son efectivos para remover metales pesados del suelo contaminado. Los tratamientos fisicoquímicos frecuentemente son caros y destruyen la estructura del suelo, además de reducir su productividad. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales no pueden descomponerse por vía biológica, física ni química, de

manera que la remediación de sitios contaminados con metales o metaloides se limita a la alteración de su solubilidad, movilidad y/o toxicidad. La biorremediación de un suelo implica su descontaminación por vía biológica (Volke, 2005).

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan el potencial metabólico de organismos vivos (plantas, hongos y bacterias, entre otros) para limpiar ambientes contaminados. Una estrategia de biorremediación que puede aplicarse de manera efectiva en sitios contaminados con metales es la Fitorremediación (Volke, 2005).

2.23. Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados

La fitorremediación es una nueva alternativa tecnológica de biorremediación, que puede utilizarse para la remoción y/o estabilización de elementos tóxicos en suelos contaminados (Salt, 1995). Esta técnica consiste en el uso de plantas para limpiar suelos y agua, y es de gran importancia debido a su eficiencia en cuanto a costos, además de que es una tecnología ambientalmente amigable. Las plantas tienen una habilidad única para captar y concentrar elementos esenciales y no esenciales del suelo a través de sus raíces. De esta manera, las plantas hiperacumulan metales para selectivamente remover y reciclar el exceso de metales tóxicos presentes en un suelo contaminado.

La fitorremediación de metales incluye a su vez varios mecanismos, tales como la Fitoextracción, la Fitoestabilización, la Rizofiltración y la Fitovolatilización (Raskin, 2002).

2.23.1. Selección de plantas fitorremediadora

El éxito de cualquier estrategia de fitorremediación depende de la identificación de especies de plantas adecuadas, que acumulen altas concentraciones de metales y produzcan grandes cantidades de biomasa. Pocas

son las especies de plantas adaptadas para sobrevivir en suelos contaminados con altas concentraciones de metales. Estas especies se dividen principalmente en dos grupos: las llamadas pseudometalofitas, que crecen en suelos contaminados; y las metalofitas, que crecen solo en suelos contaminados con metales y/o naturalmente ricos en ellos (Baker, 1989).

Las plantas que acumulan altas concentraciones de metales en cualquier parte de sus tejidos se conocen como hiperacumuladoras. En general, se considera que una planta es hiperacumuladora cuando la concentración de metal es al menos de 1000 mg kg^{-1} en la materia seca de cualquier tejido aéreo, cuando la planta crece en su hábitat natural (Prasad., 2003). Generalmente las concentraciones en brotes, usadas como criterio para definir especies hiperacumuladoras se encuentran entre 1 y 5% en peso seco. Específicamente 0.1% para Níquel (Ni), Cobalto (Co), Cobre (Cu) y Plomo (Pb); 1.0% para Zinc (Zn) y 0.01% para Cadmio (Cd). Baker *et al.*, (1990).

Se ha reportado una gran biodiversidad de especies con potencial, probado en campo y en laboratorio, para la fitorremediación. A la fecha, se han identificado 163 taxones de plantas, pertenecientes a 45 familias, tolerantes a los metales y capaces de crecer en concentraciones elevadas. Entre las angiospermas se han identificado cerca de 400 hiperacumuladoras; entre las familias dominantes se encuentran: *Asterácea*, *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Cyperaceae*, *Cunouniaceae*, *Fabaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lamiaceae*, *Poaceae*, *Violaceae* y *Europhobiaceae*. De estas familias, Brassicaceae tiene el mayor número de taxones, 11 géneros y 87 especies, con capacidad para hiperacumular metales (Prasad., 2003).

Un prerrequisito para la hiperacumulación de metales, es la capacidad de una especie para tolerar eficientemente altas concentraciones de metales dentro de sus tejidos y células. Las plantas hiperacumuladoras de metales tienen la habilidad

de solubilizar metales del suelo, absorbiéndolos en sus raíces y transportándolos hasta sus brotes (Prasad., 2003). La superficie de la raíz está específicamente desarrollada para captar los nutrientes elementales presentes en el suelo y en soluciones. Algunas de las plantas acumuladoras de metales liberan componentes que atrapan los metales en la rizósfera, lo cual ayuda a su solubilización y captación, como en el caso del Hierro (Nomoto 1984), el Aluminio (Al) y el Zinc (Zn) (Pellet, 1995). El principal mecanismo en especies tolerantes a metales, parece ser la captación en el compartimento vacuolar, la aparente tolerancia de las plantas para incrementar niveles de elementos tóxicos en sus tejidos puede ser resultado de la exclusión de los mismos elementos tóxicos de los sitios celulares donde se llevan a cabo los procesos vitales, tales como la división celular y la respiración. Lo anterior provee a la planta con un efectivo mecanismo de protección (Chaney *et al.*, 1997).

Para la adecuada limpieza, por fitorremediación, de un suelo contaminado con metales, es necesaria la selección adecuada de especies de plantas. Una planta adecuada para fitorremediación debe poseer las siguientes características (Raskin *et al.*, 1994).

1. Capacidad para acumular metales, preferentemente en sus partes aéreas.
2. Tolerancia a la concentración del metal acumulado
3. Rápido crecimiento y grandes cantidades de biomasa
4. Sistema radicular extenso, raíces profundas y ramificadas
5. Fácil de cosechar.

2.23.2. Mecanismo de las plantas para la desintoxicación de metales pesados

Las especies acumuladoras han desarrollado mecanismos específicos de desintoxicación por acumulación de altos niveles de metales en las células; estos mecanismos permiten la bioacumulación en niveles extremadamente altos de metales. Aunque algunos micronutrientes como Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni) y Cobre (Cu), son esenciales para el crecimiento de las plantas y su desarrollo,

altas concentraciones intracelulares de esos iones pueden llegar a ser tóxicos. Para tratar con éste estrés potencial, las plantas comúnmente no acumuladoras han desarrollado varios mecanismos para controlar la homeostasis de iones intracelulares. Algunos mecanismos incluyen la regulación de la entrada de iones y salida de iones intracelulares apoyándose en soluciones externas (Krämer *et al.*, 1996).

Las especies hiperacumuladoras, capaces de capturar cantidades superiores a las 1000 ppm, poseen mecanismos adicionales de desintoxicación.

Investigaciones han mostrado que *Thlaspi goesingense*, es una hiperacumuladora de Niquel (Ni). (Krämer *et al.*, 1996).

2.23.3. Mecanismos y fases de la fitorremediación

La fitorremediación aplicada a suelos contaminados con elementos o compuestos inorgánicos, incluye básicamente, tres mecanismos: Fitoextracción o fitoacumulación, la fitoestabilización y la fitovolatilización (Singh, 2003).

2.23.4. La fitoextracción o fitoacumulación

Consiste en la absorción de contaminantes por las raíces; es la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje. Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en plantas que acumulan metales y recientemente con materiales radioactivos (Dushenkov, 2005).

En la fitoestimulación o rizodegradación las plantas generan los exudados radiculares que estimulan el crecimiento de los microorganismos nativos capaces de degradar compuestos orgánicos xenobióticos (Pivetz *et al.*, 1997).

2.23.5. La fitoestabilización

Es un mecanismo que utiliza a la planta para desarrollar un sistema denso de raíces que le permite reducir la biodisponibilidad y la movilidad de los contaminantes evitando el transporte a capas subterráneas o a la atmósfera. (Dec, 1994) demostraron que *Raphanus sp.* Desarrolla su sistema radicular en un año y que, durante el mismo tiempo, absorbe compuestos fenólicos que remueve hasta en un 90 % de la concentración inicial. La fitodegradación consiste en la transformación de los contaminantes orgánicos en moléculas más simples (Jian *et al.*, 1997).

En determinadas ocasiones, los productos de la degradación le sirven a la planta para acelerar su crecimiento, en otros casos los contaminantes son biotransformados. Se encontró que el álamo fitodegradó moléculas como el éter metil terbutílico y el tricloroetileno presentes en acuíferos (Kassel *et al.*, 2002).

2.23.6. La fitovolatilización

Se produce a medida que las plantas en crecimiento absorben agua junto con los contaminantes orgánicos solubles. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse a la atmósfera. Los álamos, volatilizan el 90 % del tricloroetileno que absorben (Núñez *et al.*, 2004). Las raíces de *Populus deltoides* fueron expuestas a una solución de tricloroetileno (70 mg L⁻¹) durante 26 días y el 90 % del tricloroetileno fue volatilizado a través de las hojas (Orchard *et al.*, 2000).

Una planta fitorremediadora realiza cualquiera de los mecanismos anteriores siguiendo tres fases: Absorción, excreción y desintoxicación de contaminantes. La absorción de contaminantes se realiza a través de las raíces y las hojas mediante los estomas y la cutícula de la epidermis (Watt, 1999). Esta absorción ocurre en la rizodermis de las raíces jóvenes, que absorben los compuestos por ósmosis

dependiendo de factores externos como la temperatura y el pH del suelo. Otros factores importantes que inciden en la penetración del contaminante son su peso molecular e hidrofobicidad que determinan que estas moléculas atraviesen las membranas celulares de la planta. Después de cruzar la membrana, los contaminantes son distribuidos a través de toda la planta (Harvey *et al.*, 2002).

Los contaminantes que se absorben por las raíces, se excretan vía hojas (fitovolatilización). Cuando las concentraciones de los contaminantes son elevadas, solo pequeñas fracciones (menos del 5 %) se excretan sin cambios en su estructura química (Watt, 1999).

2.23.7. Limitaciones de la fitorremediación

La aplicación de la fitorremediación tiene limitaciones como: la profundidad de penetración de las raíces, la fitotoxicidad en áreas fuertemente contaminadas, los tiempos de proceso pueden ser muy prolongados, con respecto a las demás técnicas de remediación y la biodisponibilidad de los compuestos que siempre limita la captación. La localización del contaminante cercano a la rizosfera, las condiciones físicas y químicas del suelo (tales como el pH, la salinidad y el contenido de nutrientes, que pueden limitar el crecimiento vegetal), la concentración del contaminante (que debe estar dentro de los límites tolerables para la planta), riesgos de lixiviación de los contaminantes más móviles, y accesibilidad a la zona contaminada. Por lo tanto, estas tecnologías son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajo, y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo (Cunningham *et al.*, 1997).

La fitorremediación trabaja lo mejor posible cuando los contaminantes están al alcance de las raíces de las plantas, típicamente de tres a seis pies de profundidad para las plantas herbáceas y 10 a 15 pies para los árboles. Algunas

plantas absorben muchos metales venenosos, lo que implica un riesgo potencial a la cadena alimenticia. (Cunningham *et al.*, 1997).

2.23.8. Ventajas de la fitorremediación

Los metales absorbidos por las plantas, pueden ser extraídos de la biomasa cosechada y después ser reciclados. La fitorremediación se puede utilizar para limpiar una gran variedad de contaminantes, por su capacidad de absorción de estos metales en sus raíces. Puede reducir la entrada de contaminantes en el ambiente, disminuyendo su salida a los sistemas de las aguas subterráneas, por que los contaminantes quedan atrapados en las plantas (Watt, 1999).

Se pueden realizar *in situ*, es decir sin necesidad de transportar el suelo o sustrato contaminado, son de bajo coste, permiten su aplicación, tanto a suelos como a aguas, sólo requieren prácticas agronómicas convencionales, actúan positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, y son medioambientalmente aceptables, debido a que se basan en la formación de una cubierta vegetal. (Cunningham *et al.*, 1997). En el **Cuadro 2.2** se muestran algunas ventajas y desventajas de la fitorremediación.

Cuadro 2.2. Ventajas y desventajas de la fitorremediación (Carpena, 2007).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es una tecnología sustentable • Es eficiente para tratar diversos tipos de contaminantes in situ • Es aplicable a ambientes con concentraciones de contaminantes de bajas a moderadas • Es de bajo costo, no requiere personal especializado para su manejo ni consumo de energía • Es poco perjudicial para el ambiente • No produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desecho 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un proceso relativamente lento (cuando las especies son de vida larga, como árboles o arbustos) • Es dependiente de las estaciones • El crecimiento de la vegetación puede estar limitado por extremos de la toxicidad ambiental • Los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente durante el otoño (especies perennes) • Los contaminantes pueden acumularse en maderas para combustión • No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras • La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes • Se requieren áreas relativamente grandes • Pudiera favorecer el desarrollo de mosquitos (en sistemas acuáticos)

2.23.9. Especies vegetales acumuladoras de metales pesados

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, y de las características y contenido en metales del suelo. Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Baker, 1981).

Unas basan su resistencia a los metales con la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte a la parte aérea. Otras acumulan el metal en la parte aérea en una forma no tóxica para la planta. La exclusión es más característica de especies sensibles y tolerantes a los metales, y la acumulación es más común de especies que aparecen siempre en suelos contaminados (Cunningham *et al.*, 1997).

Algunas plantas son capaces de acumular cantidades excesivas de metales pesados, y se les conoce con el término "hiperacumuladoras" que fue introducido son las plantas que adquirieron una concentración excesiva del níquel (1000 mg/g)

sobre una base del peso seco. El concepto fue ampliado más adelante a otros elementos tales como cadmio, cobalto, cobre, plomo, selenio y zinc (Kabata, 2000).

Las plantas hiperacumuladoras generalmente tienen poca biomasa debido a que ellas utilizan más energía en los mecanismos necesarios para adaptarse a las altas concentraciones de metal en sus tejidos (Kabata, 2000).

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Estas diferencias en la absorción de metales, pueden ser atribuidas precisamente a la capacidad de retención del metal en cuestión, por el suelo de cultivo y a la interacción planta-raíz-metal y al metabolismo vegetal propio (Vig *et al.*, 2003).

De acuerdo con la estrategia de acumulación de las plantas hiperacumuladoras pueden superar en 100 o más veces los valores normales de metales acumulados. Estas plantas son especies muy tolerantes a uno o más metales pesados y a menudo su distribución está restringida a suelos ricos en un amplio rango de concentraciones de metales, pues no son competitivas en zonas no contaminadas (Baker, 1981).

La hiperacumulación ha evolucionado en más de 400 especies de plantas repartidas en 45 familias botánicas (Baker *et al.*, 2000). Existen varias hipótesis de cómo se pueden adaptar las especies a la hiperacumulación, pero la más actual es su función en la protección de la planta contra el estrés biótico causado por patógenos y herbívoros. Esta propuesta es muy atractiva para explicar la razón de ser de las plantas hiperacumuladoras y difiere de la defensa química natural existente en todas las plantas, basada en la síntesis de productos orgánicos procedentes del metabolismo secundario (Llugany *et al.*, 2007).

2.23.10. La fitorremediación en México

Comparado con otros países donde se han realizado investigaciones exhaustivas desde principios de los sesenta, que han conducido a la implementación y optimización de sistemas de fitorremediación tanto terrestre como acuática, en nuestro país prácticamente estamos comenzando. (Vig *et al.*, 2003).

En forma general, los proyectos sobre fitorremediación acuática en su mayoría se han enfocado a metales pesados, mientras que los relacionados con fitorremediación de suelos se han centrado en los hidrocarburos del petróleo. (Vig *et al.*, 2003).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área de estudio

La Comarca Lagunera, es una región agropecuaria e industrial ubicada en la zona suroeste del estado de Coahuila. Está localizada geográficamente entre los paralelos $29^{\circ} 52' 48''$ y $24^{\circ} 32' 33''$ de Latitud Norte y entre los meridianos $99^{\circ} 50' 35''$ y $103^{\circ} 57' 36''$ de Longitud Oeste, con una altitud sobre el nivel del mar de 1,122 msnm (INEGI 2017). Cuenta con una extensión montañosa y una superficie plana donde se localizan las áreas agrícolas, así como las áreas urbanas. Se encuentra limitada a el Oeste y Sur por la sierra madre oriental y hacia el Este y Norte por los bolsones de Mapimí (INEGI 2017). **Figura 3.1.**



Figura 3.1. Región de la Comarca Lagunera en el estado de Coahuila y Durango. UAAAN UL. 2018.

3.2. Localización del sitio de estudio

Los municipios que conforman la región lagunera son San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero, Matamoros y Viesca en el estado de Coahuila y por el estado de Durango Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Mapimí, Nazas, Rodeo, San Pedro del Gallo, San Luis del Cordero, Simón Bolívar y San Juan de Guadalupe. Es en el municipio de Torreón, Coahuila donde al oriente del mismo se localiza la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. (**Figura 3.2**).

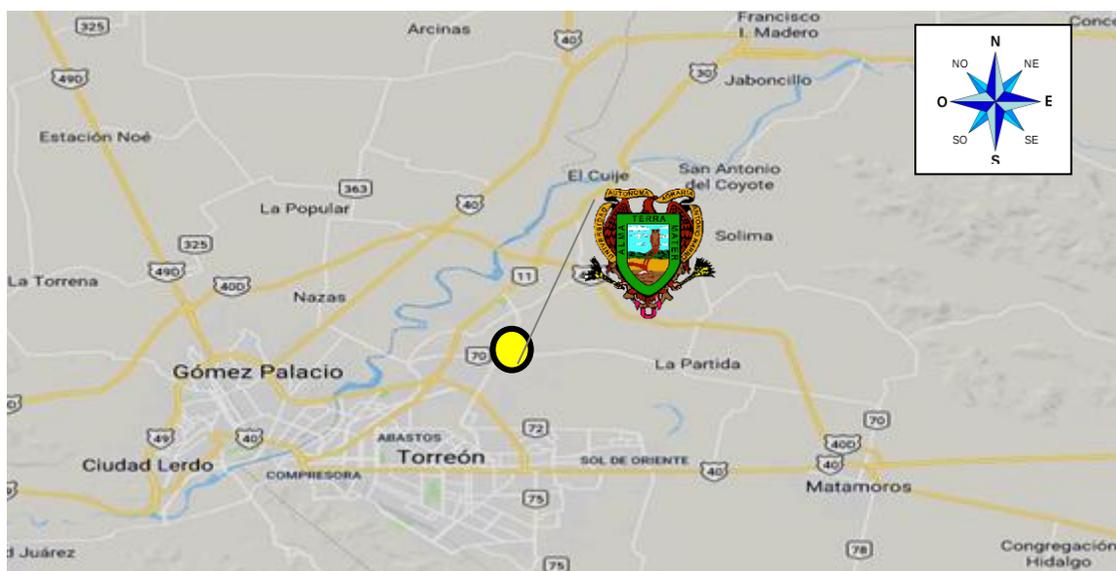


Figura 3.2. Localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna en el municipio de Torreón, Coahuila. UAAAN UL, 2018.

3.3. Localización del sitio experimental

El trabajo de investigación se realizó durante el periodo de febrero del año 2009 a enero del año 2010, en el área de sombreadero del departamento de Horticultura en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Regional Laguna, situada entre los paralelo $25^{\circ} 21' 13''$ y $25^{\circ} 32' 38''$ de Latitud Norte y los

meridianos $103^{\circ} 36' 55''$ y $101^{\circ} 25' 57''$ de Longitud Oeste, a una altura de 1124 msnm. (**Figura 3.3.**)



Figura 3.3. Localización del sitio experimental en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. UAAAN UL, 2018.

3.4. Características climáticas en la región de la Comarca Lagunera

Respecto al clima en la región es del tipo BWw que quiere decir: Clima seco de desierto o muy árido en verano. Con lluvias poco abundantes intercaladas que pueden presentarse en cualquier época del año.

3.4.1. Temperatura

La temperatura media anual es de 20 a 22°C. En cuanto a la temperatura a la región esta se presenta en un rango de 27.5° C. El mes de enero promedia la temperatura más baja del año con 13.7° C.

3.4.2. Precipitación pluvial

La precipitación media anual se encuentra en el rango de los 100 a los 200 milímetros anuales en la parte noreste, este y suroeste y de 200 a 300 milímetros en la parte centro-norte y noroeste, con régimen de lluvias en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y escasas en noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo; La precipitación menos frecuente ocurre durante el mes de agosto, con 11.4 mm y el más lluvioso el mes de junio con 60.6 mm.

3.4.3. Granizos

Granizadas de cero a un día en la parte norte-noroeste, sur-oeste, y de uno a dos días en la parte sureste. El mes de junio es considerado el más cálido del año, donde la temperatura promedio es de 27.5° C. Sin embargo, el mes de enero media la temperatura más baja del año con 13.7° C.

3.4.4. Vientos

Los vientos predominantes tienen dirección sur con velocidades de 27 a 44 km h⁻¹. La frecuencia de vientos con dirección noreste.

3.4.5. Heladas

Éstas se presentan durante el invierno con una gran variación. Sin embargo aquellas que ocurren durante el mes de enero son en promedio 17 y con una menor cantidad durante el mes de diciembre.

3.4.6. Humedad relativa

En cuanto al porcentaje de humedad relativa (HR), ésta presenta una variación durante el año, alcanzando en primavera un valor medio de 30.1 %, en otoño 49.3 % y finalmente en invierno un 43.1 %.

3.4.7. Evaporación

La evaporación promedio mensual durante el año es de 178 mm anuales, incrementando sus valores durante los meses de mayo y junio con 234 y 236 mm, respectivamente.

3.5. Suelos en la región de la Comarca Lagunera

Los suelos encontrados en la Comarca Lagunera cuentan con una amplia gama de órdenes, sobre los cuales se practica actividad ganadera y agricultura de riego, se ubica grandes parques industriales y zonas urbanas. Son suelos calcáreos, de origen sedimentario (posiciones), con endurecimientos en la capa superficial, donde al régimen climático que permite la elución de las sales, las cuales se manifiestan mediante en la superficie de los suelos del área en cuestión.

3.6. Selección de la especie vegetal para la fitorremediación

Se seleccionó la especie vegetal *Nicotiana glauca*, conocida como Virginio por presentar hábitos perennes, por ser resistente a los cambios de clima además de encontrarse con buen desarrollo en lugares de condiciones pobres y hostiles tales como lugares secos, contaminados, con escombros, en las orillas de ríos y arroyos. También presenta una gran característica, éstas planta se integren a las redes de polinización existentes en cualquier clima y esto facilita su reproducción de manera autógena. En este sentido, los sistemas de polinización autógenos y no especializados de *Nicotiana glauca* promueven la reproducción y aseguran que esta especie no tenga problemas de población la viabilidad de las semillas oscila alrededor del 90%. Por estas características representa un sistema ideal para abordar este tipo de estudios de fitorremediación.

3.7. Material vegetativo colectado

Las plantas de Virginio (*Nicotina glauca*), para ser utilizadas en el trabajo de investigación presentaban de dos a tres hojas verdaderas entre otras características (**Cuadro 3.7.**), las que fueron recolectadas en las orillas del río Nazas entre el límite

de los municipios de Torreón y Gómez Palacio. Ésta especie fue seleccionada de acuerdo a características de información en la extracción de metales pesados de los suelos contaminados y la sobrevivencia que presentan en terrenos áridos y a la falta de agua principalmente.

3.8. Sustratos utilizados

El suelo empleado como sustrato para dicho experimento fue proporcionado por la empresa Met-Méx Peñoles, S.A de C.V., ubicada en la ciudad de Torreón Coahuila, obtenido de superficies en los alrededores de la misma (0 a 5 cm) y en terrenos aldeaños a la empresa en mención. Además se utilizó arena de río, la que fue obtenida de las márgenes del río Nazas, realizando una mezcla de 50% de suelo con metales pesados y 50% de arena de río, base V/V.

3.9. Llenado de macetas

Para el llenado de macetas se utilizaron 30 bolsas de polietileno de color negro con capacidad para 10.0 kilogramos. Éstas fueron llenadas a un 70% de capacidad. Respecto al peso de los sustratos estos consistieron en 3.26 kg de arena de río y 3.28 kg de suelo con metales pesados mezclándolos obteniendo un peso total de 6.54 kg por maceta.

3.10. Tratamientos de estudio

Los tratamientos de estudio fueron dos con dieciséis repeticiones por tratamiento, obteniendo 32 unidades experimentales.

T1= 100% de arena de río

T2= 50% arena de río y 50% de suelo contaminado

3.11. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue en un arreglo de Bloques completos al azar.

3.12. Distribución y colocación de macetas en el área de sombreadero

La distribución y colocación de las macetas de estudio fueron colocadas en el sombreadero formando dos hileras de dieciséis macetas en cada una de ellas (**Cuadro 3.1.**)

Cuadro 3.1. Distribución de los tratamientos de estudio y sus repeticiones correspondientes. UAAAN UL, 2018.

T1R2	T2R3	T1R9	T2R9
T1R7	T2R1	T1R13	T2R14
T1R5	T2R5	T1R12	T2R16
T1R4	T2R8	T1R16	T2R11
T1R6	T2R6	T1R14	T2R13
T1R3	T2R7	T1R10	T2R11
T1R8	T2R2	T1R11	T2R10
T1R1	T2R4	T1R15	T2R15

3.13. Trasplante

Se realizó el día 18 de mayo del año 2012, seleccionando primero plantas homogéneas en tamaño, grosor y número de hojas. Antes del trasplante a las macetas conteniendo la mezcla de los sustratos fue saturada con agua corriente seguido del trasplante.

3.14. Riegos

Los riegos se realizaron de forma diario de forma manual, aplicando 250 mL por planta por día, durante los primeros 30 días, después de los días en mención solamente se realizaron riegos por la tarde con 250 mL por planta.

3.15. Variables de estudio

Las variables de estudio evaluadas fueron las cantidades de elementos pesados encontradas en el suelo problema (Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc), comparadas con las que establece la Norma LMP NOM-001-SEMARNAT-1996. Además de las cantidades de Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc, acumuladas en raíz, tallo y hojas de la planta de *Nicotiana glauca*, a los 101, 126 y 140 días después del trasplante. Cuantificar también las cantidades finales de Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc, que permanecieron en el suelo después de haber retirado la planta de estudio. Finalmente la cantidad de elementos pesados encontrados en los lixiviados obtenidos en las macetas de estudio realizando la obtención de dos muestreos a los 101, 126 ddt y 140 ddt su análisis en el laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, en la ciudad de Torreón, Coahuila.

3.15.1. Análisis químico de la muestra obtenida del suelo-problema

De la muestra de suelo problema, obtenida del total del suelo colectado en los alrededores y depositado en terrenos confinados de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, se determinó Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) por las metodologías IPC de la empresa en mención y las cantidades expresadas partes por millón (mg kg^{-1}) se presentan en el **Cuadros 3.2**.

Cuadro. 3.2. Valores correspondientes al análisis de suelo-problema, realizado en el laboratorio de empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. UAAAN UL, 2018.

	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Sodio (Na)	Cromo (Cr)
			(mg kg^{-1})			
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Límites máximos permisibles	400	N/A	22	37	N/A	280(Cr ⁺⁶)
Resultado obtenido en el laboratorio	12,710	20,190	1,160	459	2,587	23

Nota1: Valores con signo (-) indican menor que el límite de detección.

Nota 2: Los resultados amparan solamente a la muestra recibida con la identificación mostrada y no al total de la fuente.

3.15.2. Análisis físico-químico del suelo-problema

De la muestra obtenida del total del suelo confinado en la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V., el análisis correspondiente que se realizó en el laboratorio del departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, se determinaron características físico-químicas principalmente. Las determinaciones realizadas se presentan en el **Cuadro 3.3**.

Cuadro 3.3. Valores correspondientes al análisis físico-químico del suelo-problema, realizado en el laboratorio de Suelos. UAAAN UL, 2018.

Determinación	Valor
C.E	26.8 ms cm ⁻¹
pH	7.18
Textura	Franco arenoso
Arena	52.96 %
Arcilla	19.04 %
Limo	28.00 %
Densidad aparente	1.515 g cm ³⁻¹
M.O.	2.92 %

3.15.3. Análisis químico del agua corriente para el riego

La muestra obtenida del agua utilizada como agua de riego en las plantas de *Nicotiana glauca*, se obtuvo de depósitos cercanos al área de invernaderos y los análisis se realizaron en el laboratorio del departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Los valores se presentan en el **Cuadro 3.4**.

Cuadro 3.4. Valores correspondientes a los resultados del muestreo del agua de riego corriente utilizada en el desarrollo de la planta de *Nicotiana glauca*, realizados en el Laboratorio de Suelos. UAAAN UL, 2018.

Determinación	Valor
pH	7.95
CE	1892 $\mu\text{S cm}^{-1}$ o 1.892 mS cm^{-1}
$\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$	9.20 meq L^{-1}
Ca^{+2}	4.40 meq L^{-1}
Mg^{+2}	4.80 meq L^{-1}
Cl^{-1}	4.56 meq L^{-1}
HCO_3^{-1}	4.00 meq L^{-1}

3.15.4. Muestras de suelo obtenidas durante el desarrollo de la planta

Para la obtención de la muestra de suelo, se hicieron tres submuestreos en las macetas establecidas y los análisis se realizaron en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, mediante el protocolo de pruebas para Digestión y Análisis de los Metales, donde se determinó Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn), por la metodología IPC de Polvos y Suelos. Las determinaciones realizadas se muestran en el **Cuadro 3.5**.

Cuadro 3.5. Valores encontrados en los tres muestreos de suelo realizados en las macetas durante el desarrollo de la planta de *Nicotiana glauca*, realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. UAAAN UL, 2018.

Muestreos	Plomo (Pb)	Hierro (Fe)	Zinc (Zn)	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)
Primero (101 ddt)	7110	22081	8558	763	326
Segundo (126 ddt)	6875	20024	7425	669	195
Tercero (140 ddt)	4488	17370	5657	519	174

3.16. Muestras de agua lixiviada obtenidas durante el desarrollo de la planta

Las dos muestras obtenidas del agua lixiviada en las macetas durante el desarrollo de la planta fueron llevadas para su análisis al laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, mediante el protocolo de pruebas para Digestión y Análisis de los Metales, donde se determinó Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) y pH, por la metodología IPC de Polvos y Suelos. En las determinaciones realizadas los valores se presentan en el **Cuadros 3.6**.

Cuadro 3.6. Valores correspondientes a los dos muestreos del agua de riego corriente utilizada en el desarrollo de la planta de *Nicotiana glauca*, realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V.

	Pb	Zn	As	Cd	Na	Cr	pH
	mg L ⁻¹						
LMP NOM-001-SEMARNAT-1996	10.0	20.0	0.40	0.10	200.00	1.00	5.10
Primero (102 ddt)	0.08	0.24	1.87	1.92	87.99	0.008	7.59
Segundo (140 ddt)	0.43	1.90	0.32	13.69	121.80	0.002	7.21

Nota1: Valores con signo (-) indican menor que el límite de detección.

Nota 2: Los resultados amparan solamente a la muestra recibida con la identificación mostrada y no al total de la fuente de origen.

3.17. Muestras vegetales de raíz, tallo y hojas obtenidas durante el desarrollo de la planta

Obtenidas durante el desarrollo de la planta esta fueron analizadas y se encontraron las características que se presentan en el Cuadro 3.7.

Cuadro 3.7. Características vegetativas de la planta de Virginio (*Nicotiana glauca*), obtenidas durante el desarrollo a los 101 ddt, 126 ddt y 140 ddt, utilizada para el análisis en laboratorio de la UAAAN UL 2018.

	Características de las plantas		
	101	126	140
Altura de la planta	22.4 cm	39.5 cm	55.0 cm
Diámetro de tallo	3.0 mm	4.0 mm	5.0 mm
Número de hojas	22.0	33.0	40.0
Longitud de la raíz	33.0 cm	23.0 cm	36.0 cm
Peso de la planta	14.9 g	29.2 g	31.0 g

3.17.1. Primer muestreo vegetal de raíz, tallo y hojas obtenidas durante el desarrollo de la planta a los 101 ddt

El primer muestreo en las plantas de estudio se realizó a los 101 días después de trasplante, tomando al azar una planta desarrollada en suelo-problema y una planta desarrollada en arena de río, considerada esta como planta testigo. Se eliminó la cantidad de suelo-problema y arena de río, lavando la parte de raíz en agua corriente, presentando las características mostradas en el **Cuadro 3.7**. Después se separó la raíz, el tallo y las hojas, las que fueron colocadas en bolsas de papel canela perforadas y se llevaron a la estufa de secado a una temperatura de 80 °C, durante 144 horas hasta peso constante. Enseguida cada una de las parte vegetales fueron molidos en mortero de porcelana y puesta en sobres etiquetados y fechados, después llevadas para su análisis al laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, mediante el protocolo de pruebas para Digestión y Análisis de los Metales, donde se

determinó Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn). En las determinaciones realizadas los valores se presentan en el **Cuadros 3.8**.

Cuadro 3.8. Valores correspondientes al primer análisis vegetal realizado en dos plantas de *Nicotiana glauca*, durante su desarrollo a los 101 ddt y realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V.

	Planta Testigo			Planta Problema		
	Raíz	Tallo	Hojas	Raíz	Tallo	Hojas
Metales pesados			ppm			
Plomo (Pb)	15	5	14	844	199	172
Hierro (Fe)	1243	79	145	2269	251	598
Zinc (Zn)	60	79	76	1073	255	301
Arsénico(As)	14	3	5	187	34	24
Cadmio (Cd)	133	123	104	86	128	60

3.17.2. Segundo muestreo vegetal de raíz, tallo y hojas obtenidas durante el desarrollo de la planta a los 126 ddt

El segundo muestreo en las plantas de estudio se realizó a los 126 días después de trasplante, tomando al azar una planta desarrollada en suelo-problema y una planta desarrollada en arena de río, considerada esta como planta testigo. Se eliminó la cantidad de suelo-problema y arena de río, lavando la parte de raíz en agua corriente. Después se separó la raíz, el tallo y las hojas y se colocaron en bolsas de papel canela y se etiquetaron y se llevaron a la estufa de secado a 80 °C, durante 144 horas hasta peso constante. Enseguida se molieron en un mortero y se vaciaron en sobres etiquetados y fechados para que fueran llevadas para su análisis al laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, mediante el protocolo de pruebas para Digestión y Análisis de los Metales, donde se determinó Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo

(Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn). En las determinaciones realizadas los valores se presentan en el **Cuadros 3.9**.

Cuadro 3.9. Valores correspondientes al segundo muestreo de vegetales en plantas de *Nicotiana glauca*, durante su desarrollo y realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central. UAAAN.

	Planta Testigo			Planta Problema		
	Raíz	Tallo	Hojas	Raíz	Tallo	Hojas
Metales pesados			ppm			
Plomo (Pb)	15	5	14	2669	126	180
Hierro (Fe)	1243	79	145	6779	203	507
Zinc (Zn)	60	79	76	3207	264	455
Arsénico(As)	14	3	5	494	31	34
Cadmio (Cd)	133	123	104	37	127	127

3.17.3. Tercer muestreo vegetal de raíz, tallo y hojas obtenidas durante el desarrollo de la planta a los 140 ddt.

El tercer muestreo en las plantas de estudio se realizó a los 140 días después de trasplante, tomando al azar una planta desarrollada en suelo-problema y una planta desarrollada en arena de río, considerada esta como planta testigo. Se eliminó la cantidad de suelo-problema y arena de río, lavando la parte de raíz en agua corriente. Después se separó la raíz, el tallo y las hojas y se colocaron en bolsas de papel canela y se etiquetaron y se llevaron a la estufa de secado a 80 °C, durante 144 horas hasta peso constante. Enseguida se molieron en un mortero y se vaciaron en sobres etiquetados y fechados para que fueran llevadas para su análisis al laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, mediante el protocolo de pruebas para Digestión y Análisis de los Metales, donde se determinó Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn). Las determinaciones realizadas respecto a sus valores se presentan en el **Cuadros 3.10**.

Cuadro 3.10. Valores correspondientes al tercer muestreo vegetal en plantas de *Nicotiana glauca*, durante su desarrollo y realizados en el Laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central. UAAAN UL, 2018.

	Planta Testigo			Planta Problema		
	Raíz	Tallo	Hojas	Raíz	Tallo	Hojas
Metales pesados			ppm			
Plomo (Pb)	15	5	14	547	101	47
Hierro (Fe)	1243	79	145	1030	73	344
Zinc (Zn)	60	79	76	579	214	262
Arsénico (As)	14	3	5	47	11	14
Cadmio (Cd)	133	123	104	121	121	121

3.18. Análisis estadístico

Los datos obtenidos en las variables de estudio fueron ordenados, analizados y graficados con el paquete Excel.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados encontrados se describen a continuación

4.1. Del análisis físico-químico del suelo-problema

El análisis de laboratorio del departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (**Cuadro 3.3.**), reportó que el suelo-problema presentó una conductividad eléctrica con un valor igual a 26.8 mS cm^{-1} , que indica un suelo con una salinidad extrema. El valor de su pH, igual a 7.18, que de acuerdo a los rangos establecidos se ubica como un suelo neutro, sin problemas para el desarrollo de las plantas. La textura del suelo clasificada como Franco-arenoso, donde predominan las arenas con el 52.96%. Finalmente en el contenido de la materia orgánica con un valor de 2.92 %, que de acuerdo a rangos establecidos en suelos agrícolas es considerado un contenido medio de la misma.

El análisis para los metales pesados en el suelo-problema, realizado en laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central (**Cuadro 3.2.**), reportó que para Plomo (Pb), se encontraron 12,710 ppm, equivalente a 19,226.60 kg ha^{-1} , sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 400 ppm (606.0 kg ha^{-1}), para Zinc (Zn), 20,190 ppm, que equivale a 30,587.25 kg ha^{-1} la norma no establece rango para Zinc, en Arsénico (As), 1,160 ppm, que equivale a 1,757.4 kg ha^{-1} , la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 22 ppm (33.33 kg ha^{-1}), para Cadmio (Cd), 459 ppm, lo que equivale a 695.38 kg ha^{-1} , la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 37 ppm (56.05 kg ha^{-1}), para Sodio, 2,587 ppm, equivalente a 3,919.30 kg ha^{-1} la norma no establece valor permirico para Sodio, para Cromo (Cr), 23 ppm, que equivale a 34.84 kg ha^{-1} , sin embargo la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 280 ppm (424.22 kg ha^{-1}). La norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que los criterios para la caracterización y

determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Vanadio y sus compuestos inorgánicos, así como los criterios de remediación. En la **Figura 4.1**, se aprecia que Plomo y Zinc, presentaron cantidades muy elevadas en el suelo problema de estudio.

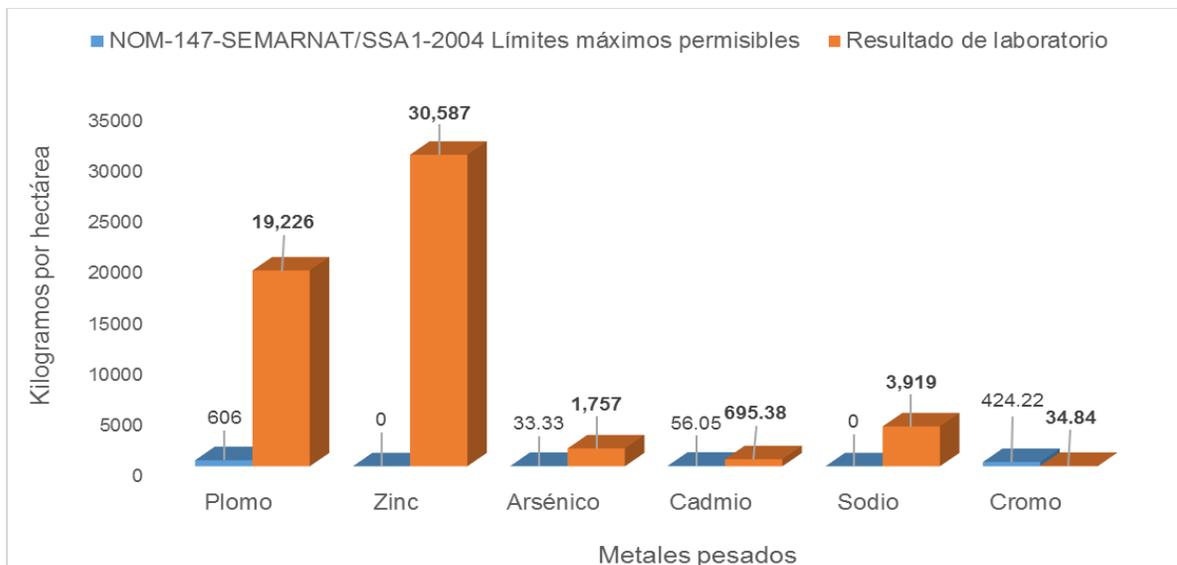


Figura 4.1. Valores de los metales pesados encontrados y expresados en kg ha⁻¹ de la muestra de suelo-problema obtenida del suelo colectado en los alrededores de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V., y realizado en el laboratorio de dicha empresa. UAAAN UL, 2018.

4.2. Del agua de riego corriente

4.2.1. Análisis químico del agua de riego corriente

El análisis del agua de riego corriente realizado en el laboratorio del departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna en la ciudad de Torreón, Coahuila (**Cuadro 3.4.**), se encontró que el pH del agua presentó un valor de 7.95, que indica una condición alcalina ligera. En la conductividad eléctrica (C.E.), con un valor de 1.892 mS cm⁻¹, que indica una condición no salina, donde no ocurren efectos perjudiciales por salinidad. Respecto

a los cationes de Calcio más Magnesio, se encontró un valor de 9.20 meq L^{-1} , que refiere una cantidad de $0.000184 \text{ kg L}^{-1}$ en el agua de riego. Para el elemento Calcio (Ca) en particular, el análisis reportó 4.40 meq L^{-1} , que equivale a 0.00008817 kg de dicho elemento en cada litro de agua. Para Magnesio (Mg), se encontraron 4.80 meq L^{-1} , valor que está por encima de lo que establece la NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental del agua para uso y consumo humano, permitiéndose un valor de 0.15 mg L^{-1} para dicho elemento que equivale a 0.000025312 kg por cada litro de agua. Para el elemento Cloro (Cl), se encontró 4.56 meq L^{-1} que equivale a 0.00002309 kg por litro de agua ($0.02309 \text{ kg m}^3^{-1}$), valor que está por debajo de la cantidad permitida que es de 250.0 mg L^{-1} . Finalmente para la cantidad de bicarbonatos (HCO_3^{-1}), se encontraron 4.0 meq L^{-1} , que indican 0.000048 kg por litro de agua ($0.048 \text{ kg m}^3^{-1}$).

4.2.2. Primer análisis químico del agua de riego (lixiviada) obtenida durante el desarrollo de la planta (101 ddt)

Los análisis del agua de riego (lixiviada) obtenida durante el desarrollo del cultivo a los 101 días después de trasplante (**Cuadro 3.6.**), realizados en el laboratorio de la empresa MET-MEX PEÑOLES, correspondiente a la Gerencia de Protección Ambiental del Área de Investigación y Desarrollo en la ciudad de Torreón, Coahuila, presentó las siguientes características. Para Plomo (Pb), se encontraron 0.08 mg L^{-1} , equivalente a 0.101 kg ha^{-1} , sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 10 ppm ($12.625 \text{ kg ha}^{-1}$), para Zinc (Zn), 0.24 mg L^{-1} , que equivale a 0.303 kg ha^{-1} , sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 20 ppm ($25.250 \text{ kg ha}^{-1}$), en Arsénico (As), 1.87 mg L^{-1} , que equivale a 2.360 kg ha^{-1} , NOM-001-SEMARNAT-1996 señala que solamente es permitido 0.4 ppm (0.505 kg ha^{-1}), para Cadmio (Cd), 1.92 mg L^{-1} , lo que equivale a 2.424 kg ha^{-1} , mientras que la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 0.1 ppm (0.126 kg ha^{-1}), para Sodio (Na), 87.99 mg L^{-1} , equivalente a $111.087 \text{ kg ha}^{-1}$ NOM-001-SEMARNAT-1996 señala

que solamente es permitido 200 ppm ($252.50 \text{ kg ha}^{-1}$), y para Cromo (Cr), 0.008 , que equivale a $0.0101 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la NOM-14, señala que solamente es permitido 1 ppm (1.262 kg ha^{-1}). La NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En la **Figura 4.2.**, se aprecia que principalmente Plomo, Zinc y Sodio se encontraron en cantidades por debajo de los valores correspondientes a la norma (NOM-001-SEMARNAT-1996).

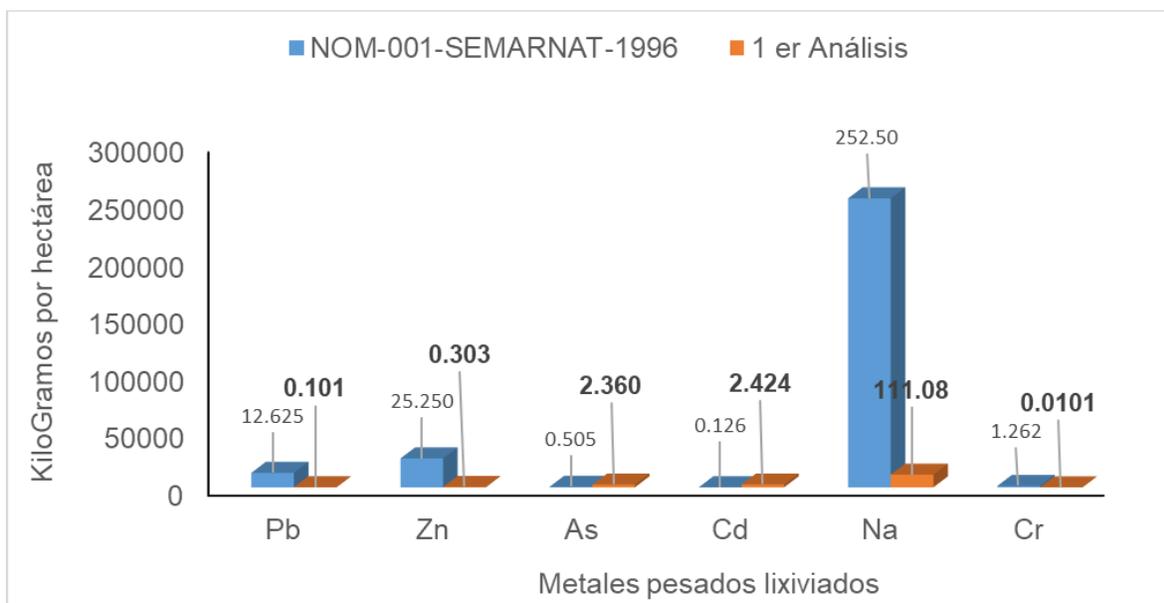


Figura 4.2. Valores de los metales pesados encontrados y expresados en Kg ha^{-1} del primer muestreo de agua lixiviada obtenida a los 101 ddt en las macetas con las plantas de Virginio en desarrollo. UAAAN UL, 2018.

4.2.3. Segundo análisis químico del agua de riego (lixiviada) obtenida durante el desarrollo de la planta (140 ddt)

El análisis del agua de riego (lixiviada) realizado durante el desarrollo del cultivo a los 140 días después de trasplante y a los 39 días después del primero (**Cuadro 3.6.**), realizado en el laboratorio de la empresa MET-MEX PEÑOLES, correspondiente a la Gerencia de Protección Ambiental del Área de Investigación y

Desarrollo en la ciudad de Torreón, Coahuila, presentó las siguientes determinaciones. Para Plomo (Pb), se encontraron 0.43 mg L^{-1} , equivalente a $0.2096 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 10 ppm (4.875 kg ha^{-1}), para Zinc (Zn), 1.9 ppm , que equivale a $0.9263 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 20.0 ppm (9.75 kg ha^{-1}), en Arsénico (As), 0.32 ppm , que equivale a $0.1560 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 0.4 ppm (0.195 kg ha^{-1}), para Cadmio (Cd), 13.69 mg L^{-1} , lo que equivale a $6.6739 \text{ kg ha}^{-1}$, mientras que la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 0.1 ppm ($0.04875 \text{ kg ha}^{-1}$), para Sodio (Na), 121.80 ppm , equivalente a $59.377 \text{ kg ha}^{-1}$ sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 200 ppm (97.5 kg ha^{-1}), y para Cromo (Cr), 0.002 ppm , que equivale a $0.0010 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que solamente es permitido 1 ppm (0.487 kg ha^{-1}). La NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En la **Figura 4.3.**, se aprecia que solamente el Cadmio presentó una cantidad mayor que la norma mientras que Plomo, Zinc y Sodio por debajo de los valores de dicha norma.

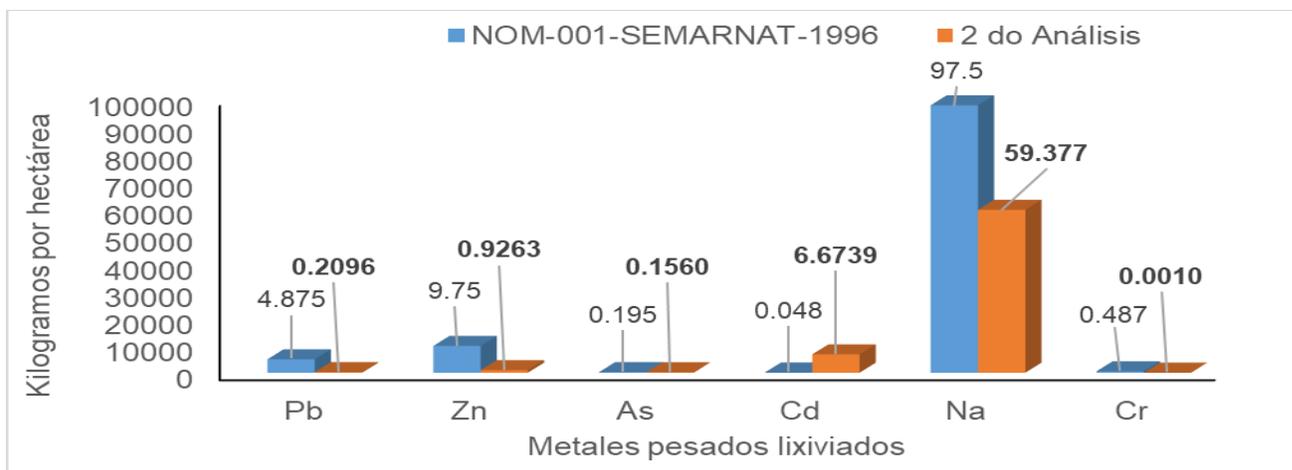


Figura 4.3. Valores de los metales pesados encontrados y expresados en Kg ha^{-1} en el segundo muestreo de agua lixiviada obtenida a los 140 ddt y a los

39 días después del primero en las macetas con las plantas de Virginio en desarrollo. UAAAN UL, 2018.

4.3. Del análisis químico del suelo durante el desarrollo de la planta

4.3.1. Del primer análisis químico del suelo a los 101 ddt

El análisis para los metales pesados en el suelo-problema durante el desarrollo de la planta el que se obtuvo a los 101 días después de trasplante, fue realizado en laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central (**Cuadro 3.5.**), reportando que para Plomo (Pb), se encontraron 7,110 ppm, equivalente a 2,844 kg ha⁻¹, sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 400 ppm (160 kg ha⁻¹), para Hierro (Fe), 22,081 ppm, que equivale a 8,832.4 kg ha⁻¹, no establece criterios para el elemento Hierro (Fe), reportó que para Zinc (Zn), se encontraron 8558 ppm, equivalente a 3,423.2 kg ha⁻¹, sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que N/A, en Arsénico (As), 763 ppm, que equivale a 305.2 kg ha⁻¹, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 22 ppm (8.8 kg ha⁻¹), para Cadmio (Cd), 326 ppm, lo que equivale a 130.4 kg ha⁻¹, mientras que la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 37 ppm (14.8 kg ha⁻¹), La norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que los criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Vanadio y sus compuestos inorgánicos, así como los criterios de remediación. En la **Figura 4.4**, se aprecia que tanto Plomo, Hierro, Zinc y Arsénico, presentaron cantidades más altas respecto a la Norma.

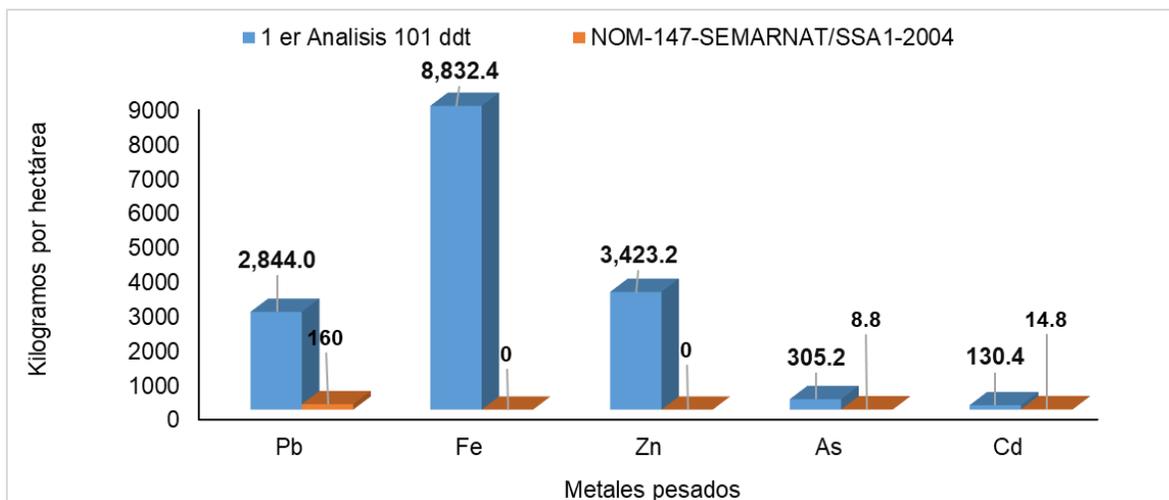


Figura 4.4. Valores de los metales pesados expresados en kg ha^{-1} en el primer muestreo de suelo-problema obtenido durante el desarrollo de la planta a los 101 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.3.2. Del segundo análisis químico del suelo a los 126 ddt

El análisis para los metales pesados en el suelo-problema durante el desarrollo de la planta obtenido a los 126 días después de trasplante, realizado en laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central (**Cuadro 3.5.**), reportó que en Plomo (Pb), se encontraron 6875 ppm, equivalente a $2,750 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 400 ppm (160 kg ha^{-1}), para Hierro (Fe), 20024 ppm, que equivale a $8,009.6 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, no establece criterios para el elemento Hierro (Fe), reportó que para Zinc (Zn), se encontraron 7425 ppm, equivalente a $2,970 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que N/A, en Arsénico (As), 669 ppm, que equivale a 267.6 kg ha^{-1} , la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 22 ppm (8.8 kg ha^{-1}), para Cadmio (Cd), 195 ppm, lo que equivale a 78 kg ha^{-1} , mientras que la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 37 ppm (14.8 kg ha^{-1}).

ha⁻¹), La norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que los criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Vanadio y sus compuestos inorgánicos, así Como los criterios de remediación. En la **Figura 4.5**, se aprecia que el Plomo, el Hierro, el Zinc y el Arsénico, presentaron cantidades más altas respecto a la Norma.

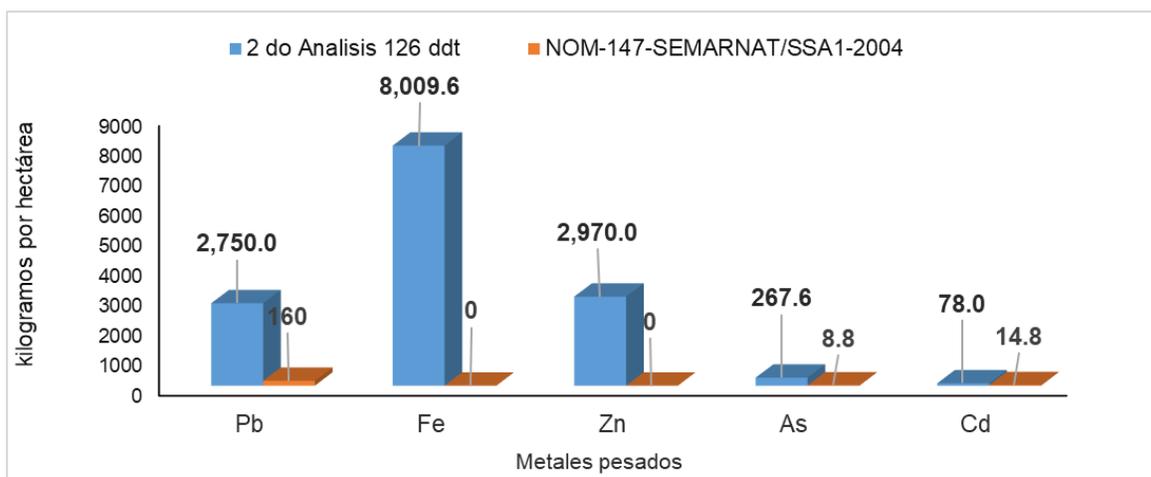


Figura 4.5. Valores de los metales pesados expresados en kg ha⁻¹ en el segundo muestreo de suelo-problema obtenido durante el desarrollo de la planta a los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.3.3. Del tercer análisis químico del suelo a los 140 ddt

El análisis para los metales pesados en el suelo-problema durante el desarrollo de la planta obtenido a los 140 días después de trasplante, realizado en laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central (**Cuadro 3.5.**), reportó que para Plomo (Pb), se encontraron 4488 ppm, equivalente a 1,795.2 kg ha⁻¹, sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 400 ppm (160 kg ha⁻¹), para Hierro (Fe), 17370 ppm, que equivale a 6,948 kg ha⁻¹, no establece

criterios para el elemento Hierro (Fe), reportó que para Zinc (Zn), se encontraron 5657 ppm, equivalente a 2,262.8 kg ha⁻¹, sin embargo la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que N/A, en Arsénico (As), 519 ppm, que equivale a 207.6 kg ha⁻¹, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 22 ppm (8.8 kg ha⁻¹), para Cadmio (Cd), 174 ppm, lo que equivale a 69.6 kg ha⁻¹, mientras que la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que solamente es permitido 37 ppm (14.8 kg ha⁻¹), La norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, señala que los criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Vanadio y sus compuestos inorgánicos, así como los criterios de remediación. En la **Figura 4.6.**, se aprecia que Plomo y Zinc, presentaron cantidades muy elevadas en el suelo problema de estudio.

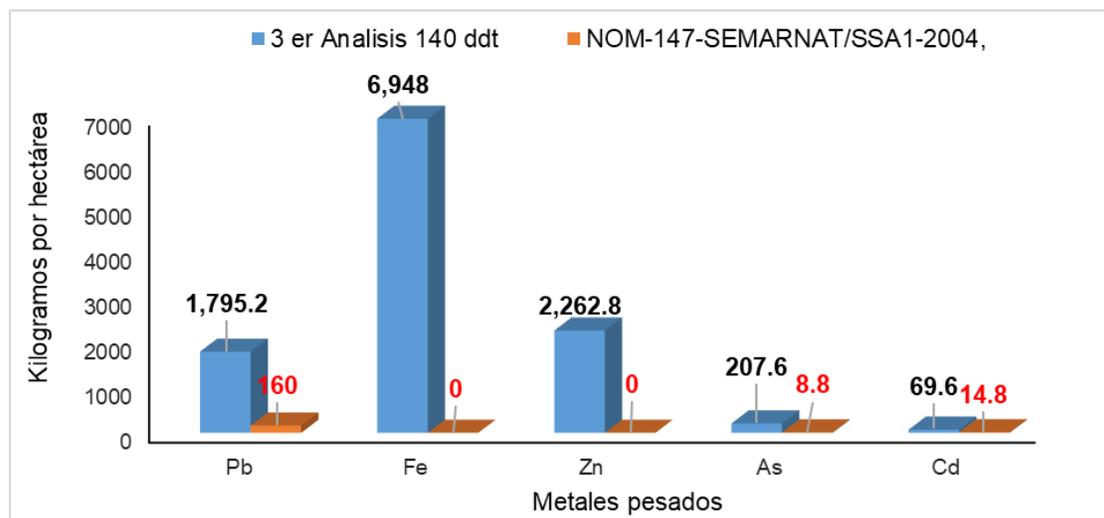


Figura 4.6. Valores de los metales pesados expresados en kg ha⁻¹ en el tercer muestreo de suelo-problema obtenido durante el desarrollo de la planta a los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.4. Del análisis vegetal en la planta

4.4.1. Del primer análisis vegetal de la raíz a los 101 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 101 días después de trasplante considerando la parte de raíz de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.8.**), se encontró para Plomo (Pb), 844 ppm, en la planta-Problema equivalente a 42.20 kg ha^{-1} , mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 15 ppm, equivalente a 0.750 kg ha^{-1} . Para Hierro (Fe), 2,269 ppm, equivalente a $113.45 \text{ kg ha}^{-1}$ en la planta-Problema y 1,243 ppm en la planta-Testigo que equivale a 62.15 kg ha^{-1} , para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 1,073 ppm, equivalente a $53.620 \text{ kg ha}^{-1}$, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 60 ppm equivalente a 3.00 kg ha^{-1} . Para Arsénico (As), 187 ppm, en la planta-Problema que equivale a 9.35 kg ha^{-1} , y 14 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.70 kg ha^{-1} , finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 86 ppm, en la planta-Problema que equivale a 4.30 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 133 ppm, equivalente a 6.65 kg ha^{-1} .

Se aprecia en la **Figura 4.7.**, que de los elementos pesados de estudio, el Hierro (Fe), el Plomo (Pb) y el Zinc (Zn), fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas vía raíz, como lo señala (García, 2005), que pueden ser absorbidos por las plantas los que al ser incorporados a las cadenas tróficas; pasan a la atmósfera por volatilización y se movilizan a las aguas superficiales o subterráneas.

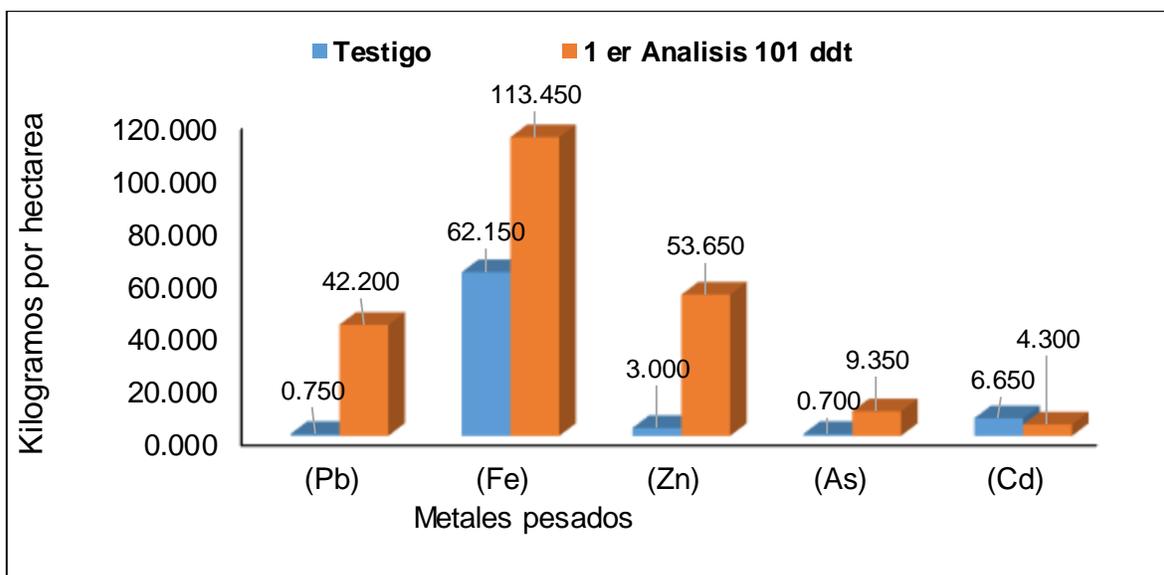


Figura 4.7. Valores encontrados en el primer análisis vegetal de raíz en la planta de *Nicotiana glauca*, los 101 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.4.2. Del segundo análisis vegetal de la raíz a los 126 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 126 días después de trasplante considerando la parte de raíz de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.9.**), se encontró para Plomo (Pb), 2669 ppm, en la planta-Problema equivalente a 133.45 kg ha⁻¹, mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontraron 15 ppm, equivalente a 0.750 kg ha⁻¹. Para Hierro (Fe), 6,779 ppm, equivalente a 338.95 kg ha⁻¹ en la planta-Problema y 1,243 ppm en la planta-Testigo que equivale a 62.15 kg ha⁻¹, para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 3,207 ppm, equivalente a 160.35 kg ha⁻¹, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 60 ppm equivalente a 3.00 kg ha⁻¹. Para Arsénico (As), 494 ppm, en la planta-Problema que equivale a 24.7 kg ha⁻¹, y 14 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.70 kg ha⁻¹, finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 37 ppm, en la planta-Problema que equivale a 1.85 kg ha⁻¹, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 133 ppm, equivalente a 6.65 kg ha⁻¹.

Se aprecia en la **Figura 4.8.**, que de los elementos pesados en estudio, el Hierro (Fe), el Plomo (Pb) y el Zinc (Zn), fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en la raíz.

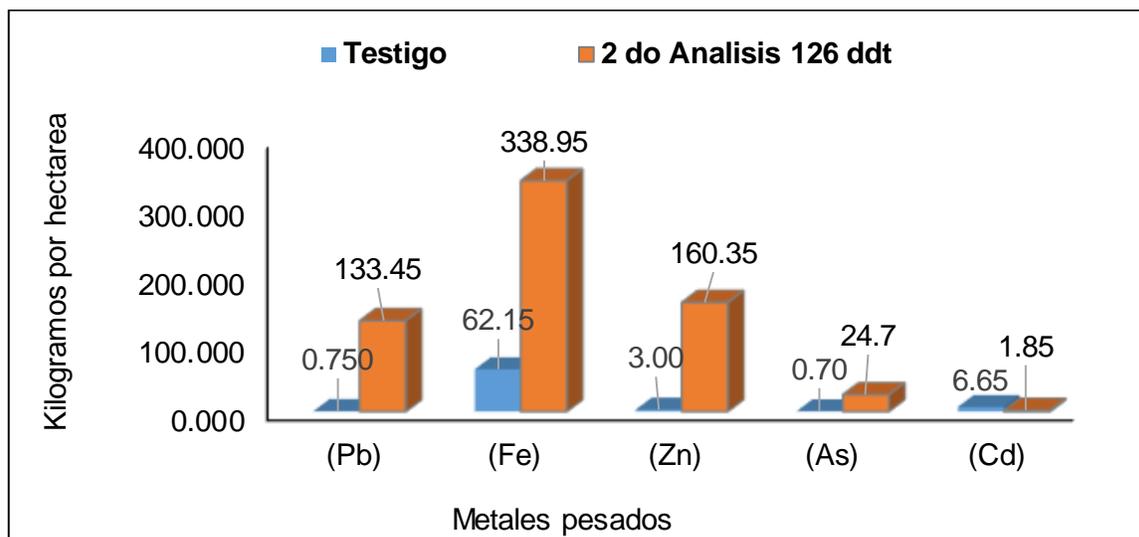


Figura 4.8. Valores encontrados en el segundo muestreo de la raíz de la planta de *Nicotiana glauca*, los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.4.3. Del tercer análisis vegetal de la raíz a los 140 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 140 días después de trasplante considerando la parte de raíz de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.10.**), se encontró para Plomo (Pb), 547 ppm, en la planta-Problema equivalente a 27.35 kg ha⁻¹, mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 15 ppm, equivalente a 0.750 kg ha⁻¹. Para Hierro (Fe), 2030 ppm, equivalente a 101.5 kg ha⁻¹ en la planta-Problema y 1,243 ppm en la planta-Testigo que equivale a 62.15 kg ha⁻¹, para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 579 ppm, equivalente a 28.95 kg ha⁻¹, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 60 ppm equivalente a 3.00 kg ha⁻¹. Para Arsénico (As), 47 ppm, en la planta-Problema que equivale a 2.35 kg ha⁻¹, y 14 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.70 kg ha⁻¹, finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 121 ppm, en la planta-Problema

que equivale a 6.05 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 133 ppm, equivalente a 6.65 kg ha^{-1} .

Se aprecia en la **Figura 4.9.**, que de los elementos pesados de estudio, el Hierro (Fe), el Plomo (Pb) y el Zinc (Zn), fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en la raíz.

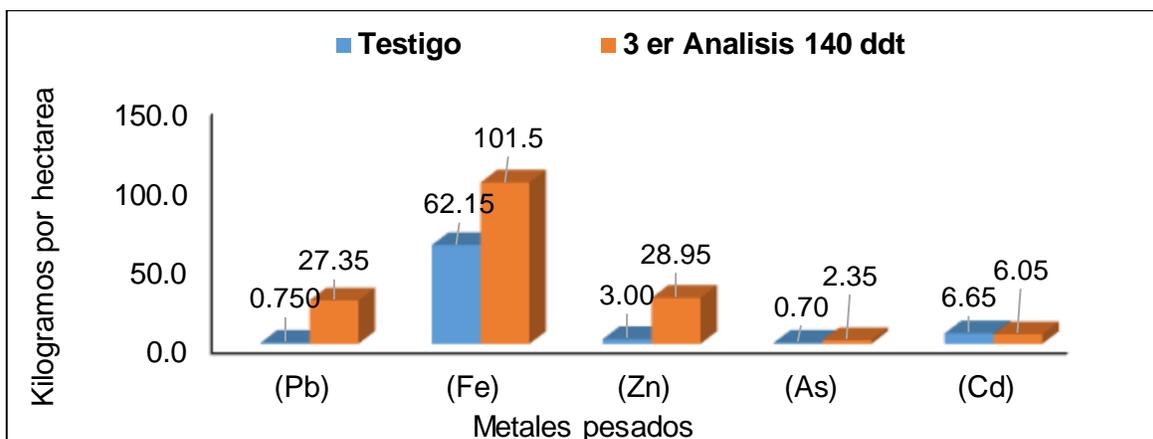


Figura 4.9. Valores encontrados en el tercer muestreo de la raíz de la planta de *Nicotiana glauca*, los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.5. Del análisis vegetal del tallo

4.5.1. Del primer análisis vegetal del tallo a los 101 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 101 días después de trasplante considerando la parte de tallo de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.8.**), se encontró para Plomo (Pb), 199 ppm, en la planta-Problema equivalente a 9.95 kg ha^{-1} , mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 5 ppm, equivalente a 0.25 kg ha^{-1} . Para Hierro (Fe), 251 ppm, equivalente a 12.55 kg ha^{-1} en la planta-Problema y 79 ppm en la planta-Testigo que equivale a 3.95 kg ha^{-1} , para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 255 ppm, equivalente a 12.75 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 79 ppm equivalente a 3.95 kg ha^{-1} . Para Arsénico (As), 34 ppm, en la planta-Problema que equivale a 1.7 kg ha^{-1} , y 3.0 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.15 kg ha^{-1} ,

finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 128 ppm, en la planta-Problema que equivale a 6.4 kg ha⁻¹, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 123 ppm, equivalente a 6.15 kg ha⁻¹. Se aprecia en la **Figura 4.10.**, que de los elementos pesados de estudio, el Zinc (Zn), Hierro (Fe), y Plomo (Pb) y, fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en tallo.

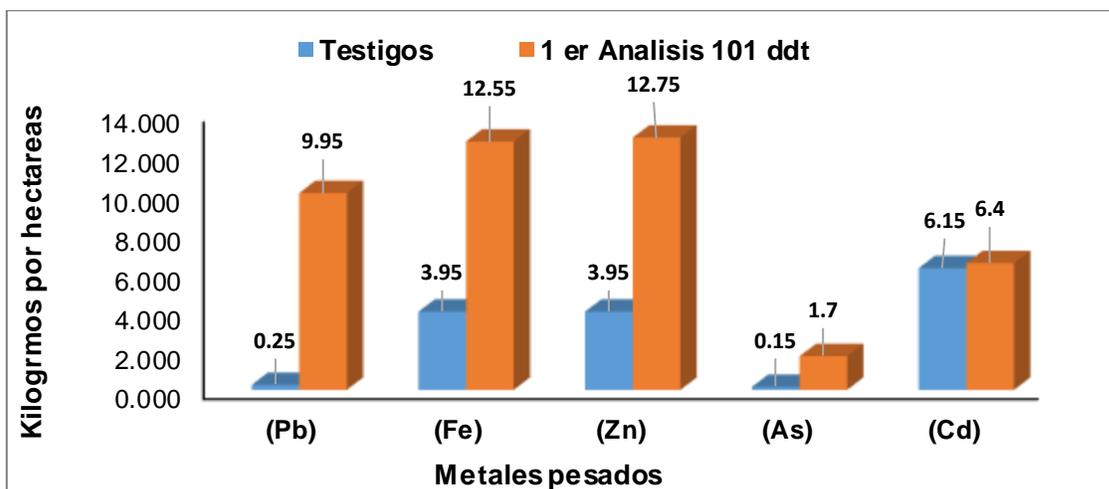


Figura 4.10. Valores encontrados en el primer muestreo del tallo de la planta de *Nicotiana glauca* los 101 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.5.2. Del segundo análisis vegetal del tallo a los 126 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 126 días después de trasplante considerando la parte de tallo de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.9.**), se encontró para Plomo (Pb), 126 ppm, en la planta-Problema equivalente a 6.30 kg ha⁻¹, mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 5 ppm, equivalente a 0.25 kg ha⁻¹. Para Hierro (Fe), 203 ppm, equivalente a 12.55 kg ha⁻¹ en la planta-Problema y 79 ppm en la planta-Testigo que equivale a 3.95 kg ha⁻¹, para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 265 ppm, equivalente a 13.20 kg ha⁻¹, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 79 ppm equivalente a 3.95 kg ha⁻¹. Para Arsénico (As), 31 ppm, en la planta-Problema que equivale a 1.55 kg ha⁻¹, y 3.0 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.15 kg ha⁻¹, finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 127 ppm, en la planta-Problema que

equivale a 6.35 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 123 ppm, equivalente a 6.15 kg ha^{-1} . Se aprecia en la **Figura 4.11.**, que de los elementos pesados de estudio, Zinc (Zn), el Hierro (Fe) y el (Cd) Cadmio fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en tallo.

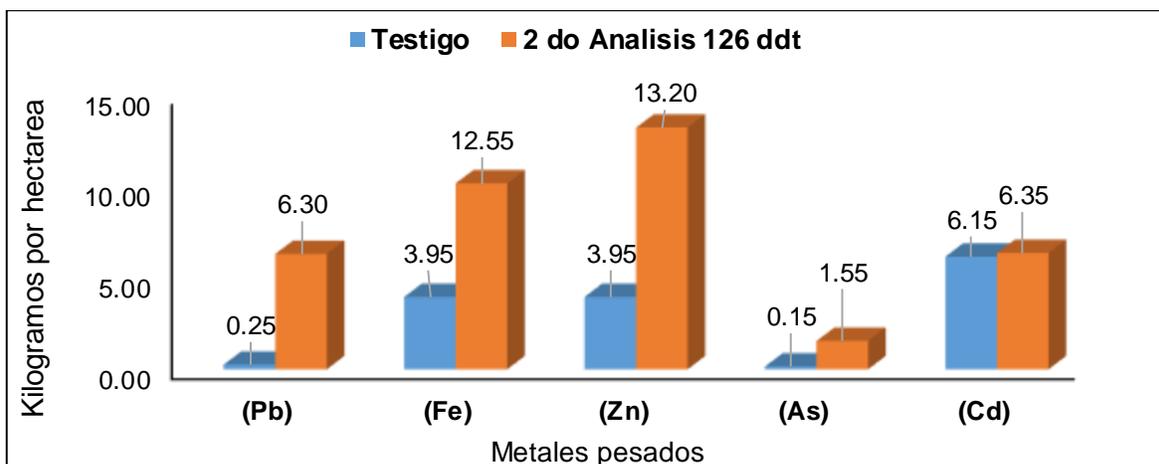


Figura 4.11. Valores encontrados en el segundo análisis vegetal del tallo en la planta de *Nicotiana glauca*, los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.5.3. Del tercer análisis vegetal del tallo a ddt los 140

En el análisis vegetal realizado a los 140 días después de trasplante, considerando la parte de tallo de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.10.**), se encontró para Plomo (Pb), 101 ppm, en la planta-Problema equivalente a 5.05 kg ha^{-1} , mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 5 ppm, equivalente a 0.25 kg ha^{-1} . Para Hierro (Fe), 173 ppm, equivalente a 8.65 kg ha^{-1} en la planta-Problema y 79 ppm en la planta-Testigo que equivale a 3.95 kg ha^{-1} , para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 214 ppm, equivalente a 10.7 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 79 ppm equivalente a 3.95 kg ha^{-1} . Para Arsénico (As), 11 ppm, en la planta-Problema que equivale a 0.55 kg ha^{-1} , y 3.0 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.15 kg ha^{-1} , finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 121 ppm, en la planta-Problema que

equivale a 6.05 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 123 ppm, equivalente a 6.15 kg ha^{-1} .

Se aprecia en la **Figura 4.12.**, que de los elementos pesados de estudio, Zinc (Zn), Hierro (Fe), el Cadmio (Cd), fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en tallo.

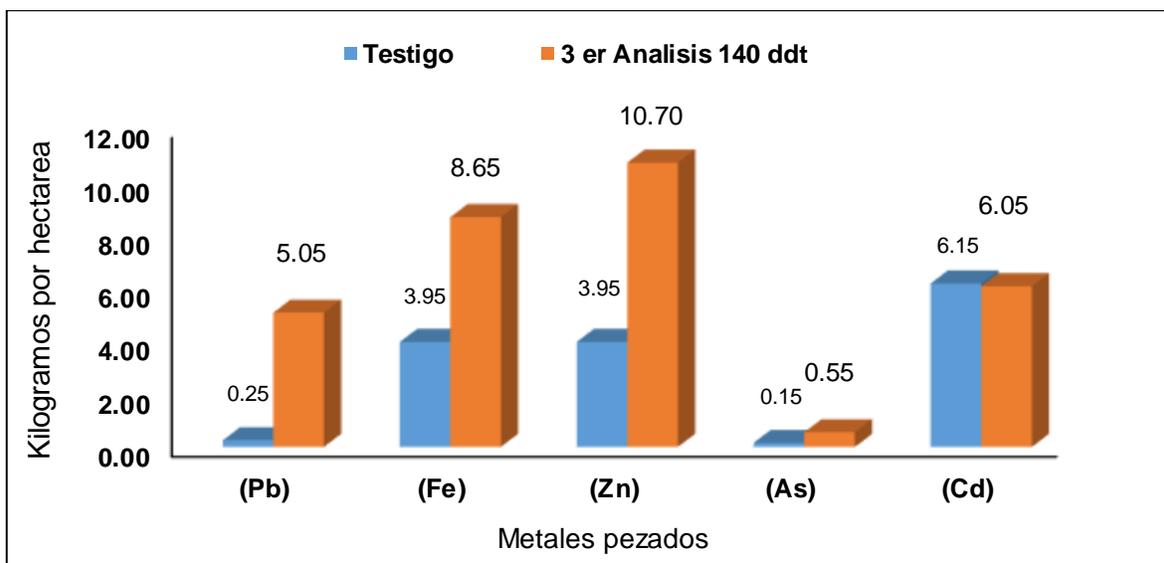


Figura 4.12. Valores encontrados en el tercer análisis vegetal del tallo en la planta de *Nicotiana glauca*, a los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.6. Del análisis vegetal de las hojas

4.6.1. Del primer análisis vegetal de las hojas a los 101 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 101 días después de trasplante considerando la parte de las hojas de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.8.**), se encontró para Plomo (Pb), 172 ppm, en la planta-Problema equivalente a 8.60 kg ha^{-1} , mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 14 ppm, equivalente a 0.700 kg ha^{-1} . Para Hierro (Fe), 598 ppm, equivalente a 29.90 kg ha^{-1} en la planta-Problema y 145 ppm en la planta-Testigo que equivale a 7.250 kg ha^{-1} , para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 301 ppm, equivalente a 15.05 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 76 ppm equivalente a 3.80 kg ha^{-1} . Para Arsénico (As), 24 ppm, en la planta-Problema que equivale a 1.20 kg ha^{-1} , y 5.0 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.250 kg ha^{-1} , finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 60 ppm, en la planta-Problema que equivale a 3.00 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 104 ppm, equivalente a 5.20 kg ha^{-1} . Se aprecia en la **Figura 4.13.**, que de los elementos pesados de estudio, el Hierro (Fe), el Zinc (Zn) y Plomo (Pb), fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en hojas.

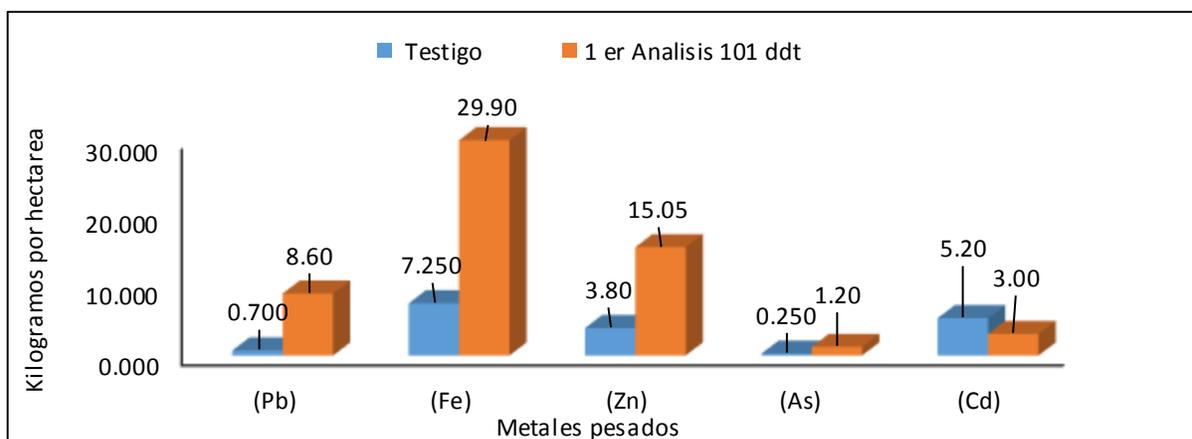


Figura 4.13. Valores encontrados en el primer análisis vegetal de hojas en la planta de *Nicotiana glauca*, los 101 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.6.2. Del segundo análisis vegetal de las hojas a los 126 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 127 días después de trasplante considerando la parte de la hoja de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.9.**), se encontró para Plomo (Pb), 180 ppm, en la planta-Problema equivalente a 9.00 kg ha^{-1} , mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 14 ppm, equivalente a 0.700 kg ha^{-1} . Para Hierro (Fe), 507 ppm, equivalente a $25.350 \text{ kg ha}^{-1}$ en la planta-Problema y 145 ppm en la planta-Testigo que equivale a 7.250 kg ha^{-1} , para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 455 ppm, equivalente a $22.750 \text{ kg ha}^{-1}$, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 76 ppm equivalente a 3.80 kg ha^{-1} . Para Arsénico (As), 34 ppm, en la planta-Problema que equivale a 1.70 kg ha^{-1} , y 5.0 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.250 kg ha^{-1} , finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 127 ppm, en la planta-Problema que equivale a 6.350 kg ha^{-1} , mientras que en la planta-Testigo, se encontró 104 ppm, equivalente a 5.200 kg ha^{-1} . Se aprecia en la **Figura 4.14.**, que de los elementos pesados de estudio, el Hierro (Fe), el Plomo (Pb) y el Zinc (Zn), fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en hojas.

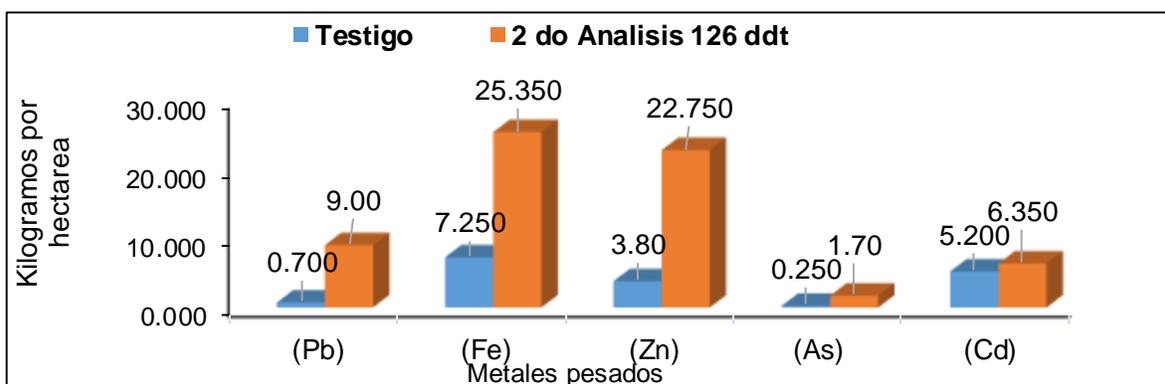


Figura 4.14. Valores encontrados en el segundo análisis vegetal de hojas en la planta de *Nicotiana glauca*, los 126 ddt. UAAAN UL, 2018.

4.6.3. Del tercer análisis vegetal de las hojas a los 140 ddt

En el análisis vegetal realizado a los 140 días después de trasplante considerando la parte de la hoja de la planta-Problema y de la planta-Testigo (**Cuadro 3.10.**), se encontró para Plomo (Pb), 47 ppm, en la planta-Problema equivalente a 2.350 kg ha⁻¹, mientras que para la planta-Testigo desarrollada en arena de río, se encontró 14 ppm, equivalente a 0.700 kg ha⁻¹. Para Hierro (Fe), 344 ppm, equivalente a 17.20 kg ha⁻¹ en la planta-Problema y 145 ppm en la planta-Testigo que equivale a 7.250 kg ha⁻¹, para Zinc (Zn), se encontró en la planta-Problema 262 ppm, equivalente a 13.10 kg ha⁻¹, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 76 ppm equivalente a 3.80 kg ha⁻¹. Para Arsénico (As), 14 ppm, en la planta-Problema que equivale a 0.700 kg ha⁻¹, y 5.0 ppm, en la planta-Testigo que equivale a 0.250 kg ha⁻¹, finalmente para el Cadmio (Cd) se encontró 126 ppm, en la planta-Problema que equivale a 6.05 kg ha⁻¹, mientras que en la planta-Testigo, se encontró 104 ppm, equivalente a 5.200 kg ha⁻¹.

Se aprecia en la **Figura 4.15.**, que de los elementos pesados de estudio, el Hierro (Fe), el Plomo (Pb) y el Zinc (Zn), fueron los que presentaron las mayores cantidades absorbidas y acumuladas en hojas.

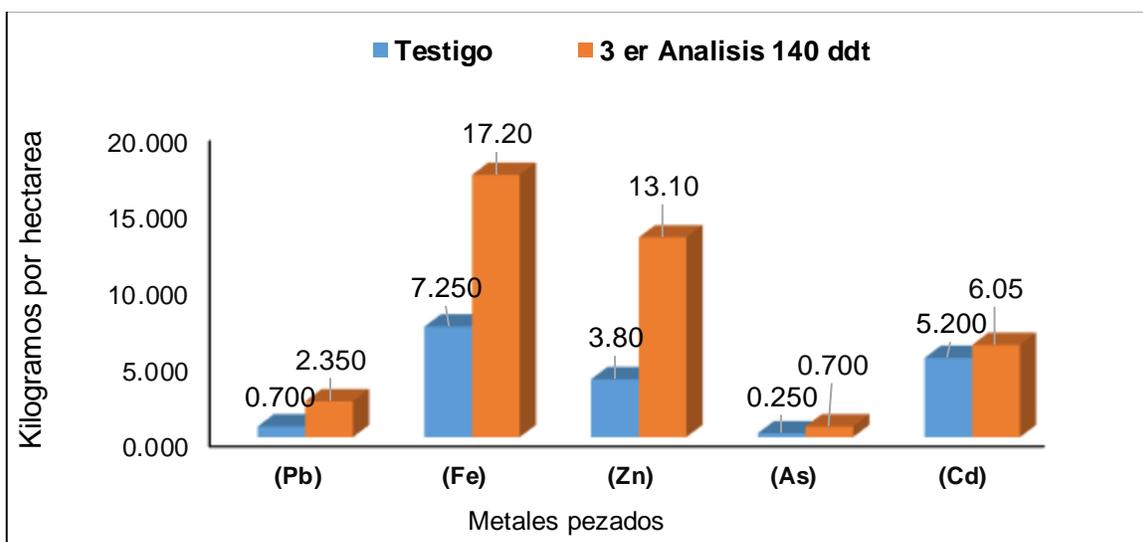


Figura 4.15. Valores encontrados en el tercer análisis vegetal de hojas en la planta de *Nicotiana glauca*, a los 140 ddt. UAAAN UL, 2018.

V. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones

1.- Del análisis físico-químico del suelo, solamente la conductividad eléctrica (C.E.), que se refiere a la cantidad de sales en el suelo-problema fue extrema (muy salina). El análisis químico para los metales pesados en el suelo-problema, realizado en laboratorio de la empresa Met-Mex Peñoles S.A de C.V. Sistema de Gestión de Calidad Laboratorio Central, se encontró que la cantidad de Zinc (Zn) y Plomo (Pb) estuvieron por encima de lo que permite la Norma-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, solamente el Cromo (Cr), por debajo de los valores permitidos por la norma.

2.- En el primer análisis químico del agua de riego para las cantidades de metales pesados, estos se encontraron por debajo de la Norma-NOM-001-SEMARNAT-1996. Mientras que para el segundo análisis químico, solamente Cadmio se encontró por encima de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

3.- Para el primer análisis de suelo realizado a los 101 ddt, se encontró que los metales pesados se encontraron por encima de la Norma-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, donde Hierro y Zinc, con las cantidades más altas. En el segundo análisis realizado a los 106 ddt, los metales pesados estuvieron por encima de lo que establece la Norma, encontrando que Hierro y el Zinc, presentaron los valores más altos. Y para el tercer análisis de suelo a los 140 ddt, estos se encontraron por encima de lo establecido por la norma oficial, encontrando a Hierro y Zinc, con los valores más altos.

4.- En el primer análisis vegetal realizado a los 101 ddt, a la raíz, tallo y hoja, se encontró un alto contenido de metales pesados por encima de los resultados que presenta la planta testigo los valores más altos se encontraron en Hierro y Zinc, para la planta-problema. En el segundo análisis, realizado a los 126 ddt, en raíz, tallo y hoja, también se encontró un alto contenido de los metales pesados donde la mayor cantidad Hierro fue para raíz y hojas y Zinc en el tallo. En el tercer análisis vegetal realizado a los 140 ddt, nuevamente Hierro en raíz y hojas y Zinc en el tallo.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abollino O., M. Aceto., and M. Malandrino. 2002. Distribution and mobility of metals in contaminated sites. *Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. Environmental Pollution*. 119 (2):177-193.
- Adriano D., C. 2001. Trace elements in terrestrial environments. *Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals*. 2 ed. Springer-Verlag, New York, USA. 867 p.
- Alloway B., J. 1995. *Heavy Metals in Soils*. 2 ed. Blackie Academic and Professional Londres. 370 p.
- Ansorena M., J. 1994. El suelo en la Agricultura y el medio Ambiente. 4 ed. Laboratorio Agrario. Guipuzkoa. pp. 24-35.
- ATSDR., Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. 2007. Resumen de Salud Pública Arsénico. Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. 74(40): 38-2:11.
- Baker A., J. 1981. Accumulators and Excluders. Strategies in the Response of Plants to Heavy-Metals. Department de Botanica. University of Sheffield. U.K. 3. pp. 643-654.
- Baker A., J. and R. Brooks R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. 1 ed. Great Britain. 81-126 p.
- Baker A., J. and P .L. Walker. 1990. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. *Heavy Metal Tolerance in Plants*. 6 ed. CRC Press. Boca Raton. (10). p.155, 178.

- Banat K., M. and F. Howari. 2005. Heavy Metals in Urban Soils. Department of Earth and Environmental Sciences. 7 ed. Yarmouk University. Irbid Jordan. pp. 258-273.
- Baldwin T., and C. Patric. 1993. Autotoxicity and chemical defense. Nicotina accumulation and carbon gain in Solanaceous plants. *Ecologia* 94 (2): 534-541.
- Banuelos G., S. and H. A. Ajwa. 1997. Selenium-induced growth reduction in Brassica landraces considered for phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1 ed. Oxford University Press. Fresno, California. pp. 282-287.
- Bernal M., P. y R. Clemente. 2001. Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas*. 16 (2): 67-76.
- Bovet P., and P. Rekacewicz. (2008): Atlas Medioambiental. Le Monde Diplomatique, Edición española. Valencia. 114 p.
- Bowen H., J. 1979. Environmental chemistry of the elements. Trace elements in biochemistry. 14 ed. Academic Press. New York. 333 p.
- Brooks R., R. and J. Lee. 1977. Detection of Nickeliferous Rocks by Analysis of Herbarium Specimens of Indicator Plants. *Journal of Geochemical Exploration*. (7). pp. 49-57.
- Buchanan R., 1987. A weaver's garden. Interweave Press, Loveland, Colorado. 230 p.

- Buka I., and S. Koranteng. 2001. Trends in Childhood Cancer Incidence. 1 ed. Pediatric Clinics of North America. 54 (1): 177-203.
- Burt R., and M. A. Wilson. 2003. Trace Element Speciation in Selected Smelter-Contaminated. Yongchao Liang. Montana, USA. 8 (1): 51-67.
- Carrere R., 2007. El misterioso ciudadano Palán-palán (*Nicotiana glauca*). Grupo Guayubira. <http://www.guayubira.org.uy/.../el-misterioso-ciudadano-palan-palan-nicotiana>. [24/04/2017].
- Carpena R., y P. Bernal. 2007. Claves de la fitorremediación. Fitotecnologías para la recuperación de suelos. Ecosistemas. Madrid, España. 16 (2): 1-3.
- Chaney R., L. and M. Li. Malik. 1997. Phytoremediation of soil metals. 7 ed. Biotechnology. Hubei Province, China. pp. 279-284.
- Chaney R., L. and J.A. Ryan. 1994. Risk based Standards for arsenic lead and cadmium in soils. Decheam, Frankfurt, Germany. Agricultural Sciences. 4(4): 130-140.
- Cunningham S., and J. Shann. 1997. Phytoremediation of Contaminated soil and water. 1ed. American Chemical Societ. Washington DC. pp. 2-17.
- Davies B., E. 1995. Environmental Contaminations Ecosystems and Human Health. The Pennsylvania Academy of Science. Easton PA. USA .pp. 287-307.
- Dec J., and Bollang. J. 1994. Use of plant material for the decontamination of water polluted with phenols. Laboratory of Soil Biochemistry. Center for

Bioremediation and Detoxification. The Pennsylvania State University. Pennsylvania, USA. 44. pp. 1132-1139.

Derache R., 1990. Toxicología y seguridad de los alimentos. 1ed. Ediciones Omega. Barcelona, España. 510 p.

Dajoz R., 1969. Les insecticides. 2 ed. Presses Universitaires. France, Paris. 127 p.

Dushenkov V., and P. B. Kumar. 1995. Rhizofiltration. The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. Environmental Science and Technology. pp. 1239-1245.

Falasca S., L. 2012. Cultivos energéticos para biocombustibles de 1ª y 2ª generación. Académica Española. España. pp. 218.

Falasca S., y A. Ulberich (2011). La maleza *Nicotiana glauca* (Graham) como cultivo energético en sectores áridos y semiáridos de Argentina. Centro de Investigaciones de Zonas Áridas. Lima, Perú 15(1): 148-168.

Florentine S., and M. E. Westbrooke (2005). Invasion of the noxious weed *Nicotiana glauca* Graham after an episodic flooding event in the arid zone of Australia. Journal of Arid Environments. Australia. pp. 531-545.

Foy C. and R. L. Chaney. 1979. The physiology of metal toxicity on plants. Plants stress laboratory. Plant physiology institute. Beltsville, Maryland, USA. pp. 511-66.

Galán H., y B. A. Romero. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. 4 ed. Mineralogía y Química Agrícola. Sevilla, España. pp .48-60.

- García I., y Dorronsoro C. 2005. Contaminación por metales pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es>. 2/Jun/2018.
- Han F., and A. Banin. 2003. New Approach to Studies of Heavy Metal Redistribution in Soil. 8 ed. Advances in Environmental Research. pp. 113-120.
- Harvey P., and B. F. Campanella. 2002. Phytoremediation of Polyaromatic Hydrocarbons. Anilines and Phenols. 9 ed. Environmental Science and Pollution Research. pp. 29-47.
- Hurrell J., and D.H. Bazzano, 2003. Biota Rioplatense. Monocotiledóneas Herbáceas nativos y exóticos. 10 ed. L.O.L.A. Buenos Aires. Argentina. 322 p.
- Huang C., 1999. Environmental Soil Chemistry and Human Welfare. 14 ed. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Temuco. Chile. 238 p.
- Huxley A., 1992. The New RHS Dictionary of Gardening. 4ed. Mac Millan Press. Nueva York. pp. 837-853.
- Ibarra S. 2003. Flora fanerogámica del distrito héroes. Tesis. Maestría. Universidad Nacional. Jorge Basadre Grohmann. Facultad de Ciencias. Albarracín, Tacna, Perú. pp. 36-38.
- Instituto Nacional de Ecología Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. INE-SEMARNAT. 1996. Programa para la minimización y manejo integral de residuos industriales peligrosos en México. Delegación Coyoacán. Ciudad de México. 165 p.

- Jianwei W. H., and J. Jian. 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soils. Role of synthetic chelates in lead phytoextraction. DuPont Central Research and Development, Environmental Biotechnology. Newark, Delaware, USA. 31 (3): 800–805.
- Joner E., y C. Leyval. 2003. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon PAH. Poincaré University. Vandoeuvre-les-Nancy Cédex, France. 37 (11): 2371–2375.
- Juarez M., y Cerdan M. 2008. Hierro en el sistema suelo-planta. 1 ed. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. Alicante. España. 33 p.
- Kabata P., A. 2000. Soil plant transfer of trace elements an environmental issue. Geoderma. Elsevier. Pulawy, Poland. pp.143-149.
- Kabata P., A. and H. Pendias. 2004. Trace Elements in Soils and Plants. 3 ed. Crc Press. Boca Raton London New York Washington, D.C 1 (403):365, 413.
- Kassel A., and G. Ghoshal. 2002. Phytoremediation of trichloroethylene using hybrid poplar. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. Universidad de Minnesota Duluth, Duluth, Minnesota, EE.UU. 8 (1): 3-10.
- Krämer U., and Cotter. H.J.D. 1996. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. Department of Plant Sciences, University of Oxford, South Parks Road. Inglaterra, Reino Unido. pp 635-638.
- Kumar N., and V. Dushenkov. (1995). Phytoextraction the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.* pp. 1232–1238.

- Nanda P., B. and Kumar. 1995. Phytoextraction the use of Plants. *Technol.* Brunswick. New Jersey. 29 (5): 1232–1238.
- Nattero J., and A. Cocucci. (2007). Geographical variation in floral traits of the tree tobacco in relation to its hummingbird pollinator fauna. *Biological Journal of the Linnean Society*. pp. 657-667.
- Lane S., D. and E.S. Martin. 1977. Histochemical Investigation of Lead Uptake in *Raphanus sativus*. *British Botanical Journal. New Phytol.* Londres, Inglaterra. pp. 281–286.
- Lauwerys R., 1990. Toxicology industrielle and intoxication professionells. 3^o ed. Masson. Paris, Milán, Barcelona. 254 p.
- Lilia A., 2002. Introducción a la toxicología ambiental. 2 ed. UTEHA. Metepec. México. pp. 211-26.
- Lindsay W., L.1979. Chemical equilibria in soils. 36 Ed. Intercience. New York. USA. p. 449.
- Llugany M., y R. P. Toira. 2007. Hiperacumulacion de metales. Una ventaja para la planta y para el hombre. Barcelona, Bellaterra. *Ecosistema* 16(2): 4-9.
- López D., 2009. Distribución y fitodisponibilidad de metales pesados (Sb, Hg, As) en los jales de la mina de antimonio de wadley. Tesis. Maestría. Universidad nacional autónoma de México. San Luis Potosí, México. pp. 96-99.
- Lucena. J., J. 2000. Effects of bicarbonate nitrate and other environmental factors on iron. Deficiency chlorosis. Taylor Francis. Madrid, España. 23 (11-12): 1591-1606.

- Margarita A., 2010. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Análisis del flujo del comercio y revisión de prácticas de manejo ambientalmente racionales de productos conteniendo cadmio, plomo y mercurio en América Latina y el Caribe. 1 ed. UNEP. DF, México. 43p.
- Marjories S., and F.W. Hong. 2001. Phytoremediation of MTBE from a Grounwater plume. *Environmental Science y Technology*. Houston, Texas. 35(6): 1231-1239.
- Martin C., W. 2000. Heavy metal trends in floodplain sediments and valley fill. 39 ed. Department of Geography. Lahn, Alemania. pp. 53-68.
- Matte T., D. 2003. Efectos del Plomo en la Salud de la Niñez. Fifth Avenue. 45 ed. Nueva York. pp. 5220-5225.
- Mahler R., L. 2003. General overview of nutrition for field and container crops. IDNR. Springfield, Nueva York, EUA. pp. 33-39.
- Muraj E., and W.R. Fischer. 1988. *The Geobiochemical Cycles of Iron*. Reidel Publishing Company. pp. 1-18.
- Newman L., and X .Wang 1999. Remediation of trichloroethylene in an artificial aquifer with trees. *Environmental Science y Technology*. 33(13): 2257-2265.
- Nomoto k., 1984. Effective regulation of iron acquisition in graminaceous plants the role of mugineic acids as phytosiderophores. 7 ed. *Physiologia Plantae*. Osaka, Japon. pp. 469-477.

- Núñez L., and Y. Meas. 2004. Fitorremediación fundamentos y Aplicaciones. Revista Ciencia. pp.69, 82. <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx> 10/feb/2018.
- Orchard J., and J. Doucette. 2000. Uptake of trichloroethylene by hybrid poplar trees grown hydroponically in flow-through plant growth chambers. Environmental Toxicology and Chemistry. Old Main Hill, Logan, Utah USA 19 (4): 781–783.
- Pagnanelli F., and E. Moscardini. 2004. Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area. Elsevier. Rome, Italy. pp. 189- 201
- Parker K., F. 1972. An Illustrated Guide to Arizona Weeds. The University of Arizona Press, Tucson, USA. 338 p.
<http://www.uapress.arizona.edu/online.bks/weeds>.
- Panter K., E. 1992. Impacto de las toxinas de las plantas en el desarrollo fetal y neonatal. Journal of Range Management. 45(1): 52-57.
- Pellet D., M. and D.I. Grunes. 1995. Organic acid exudation as an aluminum tolerance mechanism in maize *Zea mays L.* Ithaca, Nueva York, U.S.A. 196: 788-795.
- Pérez Z., 2008. Fitorremediación de suelo contaminado por Pb y Zn mediante la especie vegetal *Nicotiana glauca* G. Tesis. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unida Laguna. Torreón, Coahuila, México. 70 p.

- 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 Anus L.*) Crecido en un Suelo Contaminado con Residuos de Mina. Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Tecoman, Colima.
- Pivetz B., and R. Cochran. 1997. Phytoremediation of PCP and PAH- contaminated soil. 54 ed. Research Services Corporation. Misuri, Kansas City, USA. pp 145.
- Prasad M., N. V. and H. M. Freitas. 2003. Metal Hyperaccumulation In Plants Biodiversity Prospecting For Phytoremediation Technology. Electronic Journal of Biotechnology. 6 (3): pp. 285– 321.
- Rafael G. 2010. Física del suelo. Textura del suelo. 1 ed. Universidad Nacional de Tucumán. San Miguel de Tucumán, Argentina. 16 p.
- Ramírez A., 2002, Anales de la Facultad de Medicina Universidad Nacional Mayor de San Marcos. ISSN. 63, (1) 51 – 64 p.
- Raskin I., and R. Smith. 2002. Phytoremediation of metals. Using plants to remove pollutants from the environment. 6 ed. Elsevier. New Brunswick, Canada. 8221-8226 p.
- Riley L., E. and R.K. Dumroese. 2004. Container Seedling Storage and Handling in the Pacific Northwes. Forest and Conservation. Springfield. U.S.A. 9(12):156-167.
- Rosado J., L. 1998. Deficiencia de zinc y sus implicaciones funcionales. Salud Pública México. pp 181-188.

- Rubio C., y D. González W. 2007. El zinc. Oligoelemento Esencial. Hardisson Área de Toxicología. Universidad de La Laguna. España. 22 (1):101-107.
- Sauquillo A., and A. Rigol. 2003. Overview of the use of Leaching/Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. Trends in Analytical Chemistry. pp. 152-159.
- Schueller SK (2004). Self-pollination in island and mainland populations of the introduced hummingbird- pollinates. American Journal of Botany. Estados Unidos. pp. 672-681.
- Seaward M., R. and D. H. Richardson. 1991. In Heavy Metal Tolerance in Plants. Evolutionary Aspects. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida, Estados Unidos de América. pp 75-92.
- Seregin I.V., and A.D. Kozhevnikova. 2004. Strontium Transport, Distribution, and Toxic Effects on Maize Seedling Growth, *physiol. Rast. Moscow, Russia*. 51(2): 215–22.
- Seregin I., V. and A. D. Kozhevnikova. 2005. Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots. 4 ed. *Russ. Plant Physiol.* Pp. 525-533.
- Sharma P. and R. S. Dubey. 2005 Lead toxicity in plants *Brazilian Journal Plant Physiology. Varanasi, India*. 17 (1): 35-52.
- Siciliano S., and J. Germida. 2003. Changes in microbial community composition and function during a polyaromatic hydrocarbon. *Appl. Environ. Microbiol.* pp. 483-489.

- Singh O., and R. K. Jain. 2003. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied and Microbiology Biotechnology*. pp. 128-135.
- Spain A. 2003. Implications Microbial Heavy Metals Tolerance in the Environment. *Environmental Science and Technology*. pp. 1232-1238.
- Uphof J., C. 1959. Dictionary of economic plants. Libraries Australia. Weinheim, Germany. 400 p.
- Usher G., A. 1974. Dictionary of Plants Used by Man. Constable. London, Minnesota, USA. 450 p
- UNEP. 2010. Estudio sobre los posibles efectos en la salud humana El medio ambiente en América Latina y el Caribe del comercio de productos que contienen cadmio, plomo y mercurio. Recuperado el 1 de abril de 2012, de Programa de Naciones Unidas Para el Medio Ambiente. http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_mercmetal5.html.
- USEPA (United State Environmental Agency). 2001. Residential lead hazard standards-TSCA section 403. Office of pollution prevention and toxics. Environmental protection Agency, U.S.
- USDA. 1998. United States Department of Agriculture. Prepared for delivery by, Dr. Catherine Woteki, Food Safety and Inspection Service. Washington, D.C.
- Valdés P., 1999. El caso Peñoles. Contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila. En Defensa del Ambiente, A.C. Torreón, Coahuila. México. 50 p.

- Vilches A., y P.D. Gil. 2003. Agotamiento y destrucción de los recursos naturales. 1ed. Iberciencia. Andalucía, España. pp. 139-147.
- Vig K., and M. Megharaj. 2003. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil. *Advances in Environmental Research*. Pergamon, Adelaida, Australia. pp. 121-135.
- Volke S., y T, Velasco. 2005 *Suelos contaminados por metales y metaloides*. 1 ed. Instituto Nacional de Ecología Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INESEMARNAT). Cuicuilco, México. 141 p.
- Ware G., W. 1980. *Guía Completa Para el Control de Plagas con y sin Químicos*. Thomson Publ. Fresno, California, USA. 81(10). 290 p.
- Watt M., and Evans J. 1999. Proteoid roots physiology and development. *American Society of Plant Physiologists*. Canberra, Australian. pp. 317-323.
- Wickland D.E., 1990. *Vegetation of heavy metal contaminated soils in North America. Evolutionary aspects*. CRC Press, Boca Raton. pp. 39-51.
- Wierzbicka M., and J. Obidzinska. 1998. The effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species. *Plant Science*. Varsovia Polonia. 137(2): 155–171.
- Wild, A. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel*. 1 ed. Mundi-Prensa. España. 1045 p.
- Woolson E.A., 1973. Arsenic phytotoxicity and uptake in six vegetable crops. *Weed Science Society of America*. Maryland, Beltsville USA. 21 (6): 524-527.

