

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**EVALUACIÓN DE LA CHICURA (*AMBROSIA AMBROSIOIDES.*)
COMO ESPECIE FITORREMIADORA DE SUELOS
CONTAMINADOS POR METALES PESADOS**

POR:

LUIS HUMBERTO HERNÁNDEZ MEDINA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

TORREÓN, COAHUILA

SEPTIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Evaluación de la Chicura (*Ambrosia Ambrosioides*) como especie
fitorremediadora de suelos contaminados por metales pesados.

POR:
LUIS HUMBERTO HERNÁNDEZ MEDINA

TESIS

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

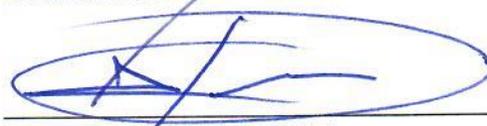
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR:

PRESIDENTE


DR. MARIO GARCIA CARRILLO

VOCAL


DR. ALFREDO OGAZ

VOCAL


M.C. FEDERICO VEGA SOTELO

VOCAL SUPLENTE


M.C. ERNESTO LUNA DÁVILA


M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



TORREÓN, COAHUILA

SEPTIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Evaluación de la Chicura (*Ambrosia Ambrosioides*) como especie
fitorremediadora de suelos contaminados por metales pesados.

POR:
LUIS HUMBERTO HERNÁNDEZ MEDINA

TESIS

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

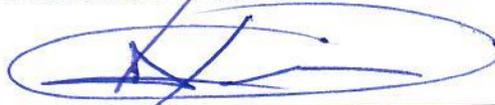
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR:

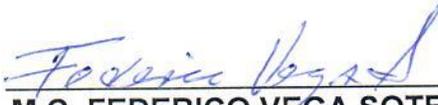
ASESOR PRINCIPAL


DR. MARIO GARCÍA CARRILLO

ASESOR


DR. ALFREDO OGAZ

ASESOR


M.C. FEDERICO VEGA SOTELO

ASESOR


M.C. ERNESTO LUNA DAVILA


M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



TORREÓN, COAHUILA

SEPTIEMBRE DE 2017

DEDICATORIAS

A Dios: Por la vida que me ha regalado y por haberme cuidado a lo largo de mi camino, brindándome buena salud y bienestar para poder culminar mis estudios.

A mi “Alma Terra Mater”: Por abrirme sus puertas y darme una formación como profesionalista.

A mis asesores: Por todo el apoyo de su conocimiento recibido y lograr con éxito este trabajo.

A mis padres: Por su apoyo incondicional, su gran amor y confianza que depositaron en mí para lograr este gran triunfo.

A mis hermanos: Por el apoyo y confianza que me brindaron a lo largo de esta trayectoria.

AGRADECIMIENTOS

A Dios: Por darme la vida, una familia maravillosa y cuidar siempre de mí en cualquier lugar y hora que he estado. Además, por haberme permitido obtener este logro importante en mi vida. “GRACIAS MI DIOS”.

A mis padres: Gaudencio y Anita, por su apoyo incondicional que me entregaron para poder verme triunfar, su amor y cariño que me dieron demostrándome que son los mejores padres. Los quiero y los amare siempre, “MUCHAS GRACIAS”.

A mis hermanos: Por haberme brindado sus apoyos, sus consejos y sus buenas vibras cuando más los necesite.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna: Por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios en ella y prepararme como profesionista.

A mis maestros: Por haber sido parte de mi formación, transmitiéndome sus conocimientos dentro y fuera de las aulas.

A mis asesores: Por el apoyo recibido de ellos en el desarrollo de esta investigación y por el tiempo que me dedicaron para el éxito de este trabajo.

A mis amigos: Por haberme brindado de una u otra manera sus apoyos a lo largo de mi carrera y por los buenos y malos momentos que pasamos juntos dentro y fuera de las aulas.

A todas aquellas personas que en algún momento me dieron palabras de aliento para luchar y seguir siempre por delante, “MIL GRACIAS”.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN.....	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo.....	3
Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1. CARACTERÍSTICAS DE LA CHICURA (AMBROSIA AMBROSIOIDES) ...	4
1.1 DESCRIPCIÓN.....	4
1.2 HÁBITAT.....	4
1.3 PROPIEDADES.....	4
1.4 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	5
2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
3. PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE METALES PESADOS	10
4. FITOTECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELO	12
5. CARACTERÍSTICAS DE LOS METALES PESADOS	13
5.1 COBRE	14
5.1.1 TOXICIDAD DEL COBRE EN LAS PLANTAS.....	15
5.1.2 TOXICIDAD DEL COBRE EN EL SER HUMANO	15
5.2 CADMIO.....	16
5.2.1 TOXICIDAD DEL CADMIO EN PLANTAS.....	17
5.2.2 TOXICIDAD DEL CADMIO EN EL HUMANO	18
6. CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR METALES PESADOS	19
7. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR METALES PESADOS.....	23
8. CONTAMINACIÓN DE ALIMENTOS POR METALES PESADOS	28

8.1. LISTA DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES EN LOS ALIMENTOS	29
8.2. CONSEJOS PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DE LOS ALIMENTOS	30
9. EFECTOS EN LA SALUD POR INTOXICACIÓN DE METALES PESADOS	32
10. NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR METALES PESADOS Y DE LA SECRETARIA DE SALUBRIDAD Y ASISTENCIA	34
10.1 NOM-147-SEMARNAT/SSA-2004	34
10.2 NOM-127-SSA1-1994	34
10.3 NOM- 117-SSA1-1994	34
10.4 NOM-185-SSA1-2002	35
10.5 NOM-243-SSA1-2010	35
10.6 NOM-247-SSA1-2008	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	36
2. MUESTREO DE PLANTAS	36
3. ADAPTACIÓN DE LA PLANTA	36
4. SOLUCIÓN NUTRITIVA	37
5. PREPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS	38
6. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	39
7. COSECHA DE LAS PLANTAS.....	39
8. SECADO	39
9. MOLIDA	39
10. PREPARACIÓN DE LAS DIGESTIONES	40
11. DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS	40

12.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
13.	MATERIALES Y REACTIVOS.....	41
IV.	RESULTADOS.....	42
4.1.	CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA PLANTA.....	42
4.2.	ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN EL TALLO.....	42
4.3.	COMPARACIÓN DE MEDIAS (TUKEY´S) PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN EL TALLO.....	43
4.4.	ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN LA HOJA DE LA PLANTA.....	43
4.5.	COMPARACIÓN DE MEDIAS (TUKEY´S) PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA HOJA.....	44
4.6.	ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA RAÍZ.....	44
4.7.	COMPARACIÓN DE MEDIAS (TUKEY´S) PARA LA COMPARACIÓN DE METALES PESADOS EN LA RAÍZ DE LA PLANTA.....	44
V.	DISCUSIÓN.....	46
VI.	CONCLUSIÓN	50
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	51

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. Principales contaminantes en los alimentos	29
CUADRO 2 Análisis del agua empleada en el riego del experimento de la chicura (<i>Ambrosia Ambrosioides</i>).	37
CUADRO 3. Solución Steiner empleada en el experimento de la chicura (<i>Ambrosia Ambrosioides</i>)	38
CUADRO 4. Concentraciones de metales pesados en el tallo, hoja y raíz de la planta.	42
CUADRO 5. Análisis de varianza de cadmio y cobre en el tallo de la planta.	42
CUADRO 6. Comparación de medias por el método Tuckey's para los metales en el tallo.	43
CUADRO 7. Análisis de varianza de Cadmio y Cobre en la hoja de la planta.	43
CUADRO 8. Comparación de medias por el método Tukey's para los metales en la hoja.	44
CUADRO 9. Análisis de varianza de Cadmio y Cobre en la raíz de la planta.	44
CUADRO 10. Comparación de medias por el método de Tukey's para los metales en la raíz de la planta.	44

RESUMEN

Existen estudios tendientes a resolver la contaminación originada por metales pesados en el suelo, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen la propiedad de acumular metales pesados, proceso denominado fitorremediación.

La Chicura (*Ambrosia Ambrosioides*), es una especie vegetal silvestre nativa de los desiertos del norte de México, y solo es usada como planta medicinal para remedios caseros.

El objetivo del presente trabajo de investigación fue determinar la concentración de metales pesados (Cadmio y Cobre), que se acumularon en la raíz, tallo y hoja de la chicura (*Ambrosia Ambrosioides*) regada con diferentes concentraciones metálicas.

Los trabajos se realizaron en la Comarca Lagunera, el muestreo de plantas se hizo en el lecho seco del Río Nazas, la adaptabilidad, el riego y el seccionamiento de la planta se desarrolló en uno de los invernaderos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, la molienda y digestión en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de Matamoros Coahuila, y la lectura de metales pesados en el laboratorio de Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento (SIMAS) de Torreón Coahuila, México. Se evaluaron cuatro tratamientos (0,1,2 y 3 mg kg⁻¹) con cuatro repeticiones utilizando un diseño completamente al azar.

Los resultados mostraron que el Cobre fue el metal que más se acumuló en la planta. Con una media de 2.4483 mg kg⁻¹, mientras que el Cadmio mostro una media de 1.1250 mg kg⁻¹. En la hoja de la planta fue donde se presentaron las mayores concentraciones de los metales, mientras que en la raíz las menores.

Palabras Clave: Chicura, Metales Pesados, Fitorremediación, Concentración, Acumulación.

I. INTRODUCCIÓN

El término contaminación se refiere a la introducción o incremento anormal de sustancias que pueden ejercer un efecto dañino sobre los organismos en los ecosistemas. A veces la contaminación es de origen natural, pero en general, está relacionada con la actividad del hombre, que en busca de supervivencia y bienestar dispersa sustancias agresivas, algunas de las cuales pueden ser transformadas por los organismos vivos (biodegradables) y otras que son persistentes (no biodegradables).

La contaminación ambiental puede estudiarse para su “remediación” atendiendo tres elementos de los ecosistemas: agua, aire y suelo. Los contaminantes pueden generarse o depositarse en cualquiera de estos tres elementos y moverse de un elemento a otro hasta llegar a la biota, que es el elemento en el que ocasionan los daños y por el que ingresan las redes tróficas (Zuñiga,1999).

El término metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relatividad alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Arsénico (As), Cromo (Cr), Talio (Tl) y Plomo (Pb), entre otros (Lucho et al.,2015).

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya

que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino et al., 2002).

Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre, no obstante, su equilibrio en el medio ambiente se ve afectado por actividades antropogénicas como la minería, la fundición, la agricultura, la refinación de combustibles, entre otras (Vogel et al., 2008). La acumulación de metales pesados en suelo y agua es un riesgo para el medio ambiente y para la salud humana, ya que estos no pueden ser degradados (Rajkumar et al., 2010).

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de estos en la cadena alimenticia. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta.

En plantas, el concepto de bioacumulación se refiere a la agregación de contaminantes; algunos de ellos son más susceptibles a ser fitodisponibles que otros (Kabata, 2000).

El término “fitorremediación” es la combinación de dos palabras, “fito” del griego que significa “planta” y “remedium” del latín que significa “corrección o remoción de un mal”, por lo tanto, esta técnica puede resumirse como el uso de plantas y microorganismos del suelo para retirar agentes contaminantes y/o amortiguar sus efectos negativos en el agua o suelo. Dentro de la fitorremediación hay 6 ramas básicas: fitovolatilización, Fitodegradación, Fitorestauración, fitofiltración, fitoestabilización y fitoextracción (Bhargava et al., 2012).

Objetivo

Determinar la concentración de los metales pesados Cadmio y Cobre, acumulados en la raíz, tallo y hoja de la Chicura (Ambrosia Ambrosioides).

Hipótesis

Las concentraciones de Cadmio y Cobre se acumulan principalmente en la raíz de la Chicura (Ambrosia Ambrosioides).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. CARACTERÍSTICAS DE LA CHICURA (AMBROSIA AMBROSIOIDES)

La Chicura o *Ambrosia ambrosioides*, es una especie de planta herbácea perteneciente a la familia de las asteráceas. Es originaria de Norteamérica donde se encuentra en los desiertos del norte de México y el sur de Arizona (Felger et, al., 1985).

1.1 DESCRIPCIÓN

Crece como un arbusto alcanzando un tamaño de 1 a 2 metros de altura, con hojas gruesas dentadas de 4 a 18 cm de largo y 1.5 a 4 cm. Es monoica, con ambas inflorescencias en racimos terminales y axilares. La floración ocurre principalmente en febrero y abril. Los frutos son de 10-15 mm de fresas cubiertas de espinas ganchudas. Algo similar en apariencia a *Ambrosia ilicifolia*, de la que se diferencia en que *A. ilicifolia* tiene hojas sésiles con un patrón reticular de venas, y los dientes marginales desarrollados en espinas cortas (Turner, 1995).

1.2 HÁBITAT

Esta ambrosia se puede encontrar en arenas lavadas y otras áreas disturbadas tales como bordes de caminos, y se ve a veces crecer en grietas de las rocas (Hickman, 1993).

1.3 PROPIEDADES

En Baja California Sur, es común el uso de las hojas o raíces en cocimiento, como remedio para el dolor de estómago, contra el reumatismo, como abortivo y para

fortificar el útero; en este último caso se debe tomar el cocimiento en lugar de agua, durante los 9 días posteriores al parto (en la cuarentena). En Sonora, también se emplean las hojas y las raíces para la expulsión de la placenta, contra trastornos menstruales, heridas llagas y enfermedades del cuero cabelludo (Raymond, 1995).

1.4 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Orden:	Asterales
Familia:	Asteraceae
Subfamilia:	Asteroideae
Tribu:	Heliantheae
Subtribu:	Ambrosiinae
Género:	Ambrosia
Especie:	Ambrosia Ambrosioides

(CONABIO, 2009)

2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas, globalmente reciben el nombre de *fitorremediación* (en español se usa también: *fitorrecuperación*, *fitocorrección*, *fitorrestauración* o *fitorrehabilitación*). Se define como el uso de plantas verdes para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad. (Salt et al., 1998).

La aparición de la fitorremediación en seguida tuvo su eco entre los investigadores europeos y, fruto de ello, fueron varias iniciativas, proyectos, entre los que destacan la creación de redes científicas específicas, como: *PHYTONET* (Marmioli, 1999), y las acciones *COST 837* (1998-2003) y *859* (en vigor hasta 2009) (Vanek, 2003). Esto posibilitó numerosos contactos científicos tanto internacionales como nacionales. En este sentido se presenta aquí una muestra de las aportaciones a esta línea por algunos investigadores participantes en Acción *COST 859*. Así, a continuación, se revisan tanto aspectos básicos de la fitorremediación. Como la aplicación de diversas tecnologías a emplazamientos concretos afectados por metales pesados, en España. En particular los siguientes:

- La hiperacumulación de metales que conlleva al desarrollo de mecanismos de tolerancia en las plantas que cuentan con esta capacidad, permite, su estudio como plantas modelo; y la discusión de distintas hipótesis sobre las ventajas que obtiene de esta peculiaridad.

- Los aspectos bioquímicos y de genética molecular de plantas, más destacados en los mecanismos de tolerancia y acumulación de metales pesados.
- El objetivo final de la fitorremediación de un suelo contaminado no debe ser solo eliminar o reducir el contaminante sino, sobre todo, recuperar la calidad del mismo. Los indicadores biológicos sobre la calidad del suelo, en especial aquellos relacionados con las comunidades microbianas, presentan un enorme potencial para el seguimiento y control de un proceso fitorremediador.
- La conservación de especies nativas de suelos contaminados con metales (metalofitas y pseudometalofitas) debería ser por su posible utilización en fitotecnologías ambientales de revegetación, fitoestabilización y fitoextracción. Se presenta un estudio llevado a cabo con especies nativas procedentes de suelos mineros con altos niveles de Zn, Pb y Cd del norte de España.
- Las hiperacumuladoras de Ni son mucho más numerosas que las de otros metales. La mayoría de ellas pertenecen al género *Alyssum* L. se han llevado a cabo estudios de fitoextracción de Ni con estas plantas en zonas del N.O de la Península Ibérica.
- Se ha realizado un estudio de las posibilidades de la flora natural y agrícola en la rehabilitación de suelos contaminados por mercurio en la antigua zona minera de Almadén.

- El vertido al río Guadiamar de lodo piritico de la mina de Aznalcollar en 1998 dio la posibilidad de desarrollar y poner en practica estas tecnologías de fitorremediación. Se presenta un resumen de los trabajos desarrollados durante cinco años en uno de los suelos afectados, que ha puesto de manifiesto las posibilidades reales de aplicación de estas tecnologías y las limitaciones y las dificultades que conllevan (Prieto, 2007)

(Prieto, 2007) realizo una prueba donde demuestra como el metal pesado se adhiere a la célula vegetal, y se transporta a las partes de la planta. Y que tan toxico es para los microorganismos.

(Prieto, 2007) elaboro pruebas en el norte de España, donde indican que existe un gran potencial de estos suelos mineros, con posibilidad de fitorremediación, destacando la presencia de *T. caerulescens* “lanestosa” y de *R. acetosa* “lanestosa”. Fue muy tolerante a la contaminación metálica, acumuló concentraciones moderadas de Zn, y respondió bien a tratamientos de fertilización y otros sistemas de manejo de los cultivos, presentando un gran potencial para su utilización en la fitorremediación de suelos mineros contaminados con Zn y Pb.

Se hizo un estudio en invernadero para evaluar la tolerancia y el crecimiento de tres especies de leguminosas (*Clitoria ternatea*, *Phaseolus coccineus*, *Cicer arietinum*) y tres gramíneas (*Brachiaria híbrido*, *Brachiaria brizantha* y *Panicum maximum*) en suelo contaminado con combustóleo, así como su capacidad de reducir el contenido de hidrocarburos provenientes del mismo. Se sembraron semillas en el suelo no contaminado y en el suelo colectado de la comunidad Frijol

Colorado, Veracruz, que fue contaminada por un derrame accidental de combustóleo (50,000 mg kg⁻¹). A los 90 días, se evaluó la tolerancia, crecimiento, la población microbiana en la rizósfera y la degradación de combustóleo. *Phaseolus coccineus* fue la única leguminosa con tolerancia y crecimiento en suelo contaminado; mientras que las tres gramíneas no fueron afectadas negativamente por la presencia del contaminante, aunque el híbrido de *Brachiaria* mostró mayor crecimiento. La población rizosférica de bacterias y hongos fue diferencialmente afectada por la presencia del contaminante en combinación con la planta. Sin embargo, la rizósfera de *P. coccineus* presentó mayor población microbiana en el suelo contaminado en comparación con las plantas restantes. La degradación de combustóleo evaluada cualitativamente por GC-MS, fue mayor en la rizósfera de *B. brizantha* y *P. maximum*. En contraste *P. coccineus* presentó una degradación similar a la observada en suelo contaminado sin planta (Wendy, et al., 2006).

(Zavala, 2008) realizó un trabajo donde realizó la capacidad de retención de Plomo y Zinc, en la especie vegetal *Nicotiana glauca* G. en raíz, tallo y hoja. Encontró que la *Nicotiana glauca* G. absorbió plomo en cantidades siendo 283.3 mg/kg entre las estructuras de la planta hoja, tallo y raíz. Mientras que el Zinc absorbió 605.1 mg/kg entre sus estructuras, hoja, tallo y raíz. La considero una planta hiperacumuladora.

(Martínez, 2011) elaboró un experimento donde demostró que la alfalfa (*Medicago sativa* L.) es capaz de absorber grandes contenidos de metales pesados, los cuales se presentan en mayor concentración dentro de los tallos con cantidades

de 3625 mg/kg, el zacate ballico (*Lolium sativa L.*) es capaz de absorber ligeras concentraciones de metales pesados (Pb: 1925 mg/kg, Cu: 1665 mg/kg, Cd: 401.5 mg/kg, As: 100 mg/kg), y el zacate navajita (*Bouteloua gracilis L.*) es capaz de absorber mínimas concentraciones de metales pesados en sus tejidos (Pb: 1615 mg/kg, Cu: 1700 mg/kg, Cd: 566.5 mg/kg, As: 100 mg/kg).

3. PLANTAS HIPERACUMULADORAS 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 el contenido de metales en el suelo. Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno las 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. La hiperacumulación ha evolucionado en más de 400 especies de plantas repartidas en 45 familias botánicas (Llugany, et al., 2007).

Muchas especies toleran las elevadas concentraciones de metales en el suelo, entre las acumuladoras se han reconocido diferentes grados de acumulación metálica, desde pequeñas elevaciones sobre el nivel de fondo hasta concentraciones excepcionalmente elevadas de metales pesados (Kidd, et al, 2007).

La hiperacumulación es un fenómeno raro, y la base evolutiva de su selección ha sido una incertidumbre desde su descubrimiento. Algunos estudios recientes sugieren que la acumulación inusual de metales confiere a estas plantas la capacidad de limitar su depredación y las infecciones microbianas causantes de enfermedades vegetales (Kidd, et al., 2007).

Los organismos genéticamente modificados (OGM), comúnmente conocidos como transgénicos, juegan un papel importante en diversos ámbitos de la vida actual. Algunas plantas genéticamente modificadas (GM) están adaptadas específicamente para ser plantas hiperacumuladoras específicas de algunos elementos (Delgadillo, et al., 2011).

Entre las plantas hiperacumuladoras de metales la especie *Thlaspi caerulescens* merece un lugar destacado por su portentosa capacidad para acumular grandes cantidades de zinc y cadmio en sus tejidos aéreos. De hecho, esta especie puede acumular de forma simultánea más de un 3,0 y 0,1% (en peso seco) de zinc y cadmio, respectivamente, en su parte aérea. Desafortunadamente, muchas de las especies hiperacumuladoras de metales, como *Thlaspi caerulescens*, son de crecimiento lento, baja biomasa y presentan un sistema de raíces poco profundo, lo que implica que, si el suelo está contaminado con altas concentraciones de metales, se necesitan muchos años para que esta fitotecnología reduzca la concentración de metales hasta niveles aceptables (Garbisu, et al., 2008).

4. FITOTECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELO

La fitorremediación de suelos contaminados se basa en el uso conjunto de plantas, enmiendas del suelo y técnicas agronómicas para eliminar, retener o disminuir la toxicidad de los contaminantes del suelo. Este grupo de fitotecnologías reúne un gran número de ventajas, especialmente la limpieza y la economía; no utiliza reactivos químicos se realiza “in situ” evitando costosos transportes (Carpena, et al., 2007).

Estas fitotecnologías se pueden aplicar tanto a contaminantes orgánicos, presentes en sustratos sólidos, líquidos o en el aire. Se distinguen:

- Fitoextracción: uso de plantas acumuladoras de elementos tóxicos o compuestos orgánicos para retirarlos del suelo mediante su absorción.
- Fitoestabilización: uso de plantas para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el entorno, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio.
- Fitoinmovilización: uso de las raíces de las plantas para la fijación o inmovilización de los contaminantes en el suelo.
- Fitovolatilización: uso de plantas para eliminar los contaminantes del medio mediante su volatilización, y para eliminar contaminantes del aire.
- Fitodegradación: uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes orgánicos.
- Rizofiltración: uso de raíces para absorber contaminantes del agua y de otros efluentes acuosos (Delgadillo, et al., 2011).

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS METALES PESADOS

En la tierra existe casi un centenar de elementos químicos naturales, pero los seres vivos que la habitan usan tan solo una veintena. Conforman este grupo numerosos metales, muchos de ellos esenciales para que los organismos puedan completar su ciclo de vida. Sin embargo, mientras algunos son imprescindibles para la supervivencia, el exceso o la presencia de otros pueden resultar tóxicos o aún letales (Azpilicueta, et al., 2010).

Los metales son especies químicas no degradables. Por tal motivo, una vez volcados al medio ambiente, solo pueden distribuirse entre los entornos aire-agua-suelo, a veces cambiando su estado de oxigenación, o incorporarse a los seres vivos (Vullo, 2003).

Los metales pesados constituyen un grupo cercano a los 40 elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm^3 . El rasgo distintivo de la fisiología de los metales pesados, es que aun cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento como el Na, K, Mg, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn y Mo, se ha reportado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas (Cañizares, 2000).

Los metales pesados son peligrosos por que tienden a bioacumularse en diferentes cultivos. La bioacumulación significa un aumento en la concentración de un producto químico en un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo, comparada a la concentración de dicho producto químico en el ambiente (Prieto, et al., 2009).

Debido a su toxicidad y tendencia a acumularse en los sistemas biológicos, representan un riesgo para la salud del hombre y los ecosistemas. Estos elementos provienen de diferentes fuentes como consecuencia de la actividad antropogénica: combustibles, aerosoles urbano-industriales, desechos líquidos y sólidos de origen animal y humano, industria minera, química, textil, productos químicos empleados en el sector agropecuario. Además, está comprobado en general, los fertilizantes fosfatados en particular, los cohetes utilizados en la lucha antigranizo y los abonos orgánicos (Martí, et al., 2011).

Se cree que los metales pesados tal vez sean los agentes tóxicos más conocidos por el hombre. Los metales pesados difieren de otros agentes tóxicos porque no son sintetizados ni destruidos por los seres vivos. La presencia de metales pesados muchas veces está asociada a la localización geográfica, sea en el agua o en el suelo (Nakano, et al., 2006).

5.1 COBRE

El cobre es un elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; uno de los metales de transición e importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El Cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos. La mayor parte del Cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como Calcocita, Covelita, Calcopirita, Birnita y Enargita. Los minerales oxidados son la Cuprita, Tenorita, Malaquita, Azurita, Crisocola y Brocantita. El Cobre natural, antes abundante en Estados Unidos, se extrae ahora

solo en Michigan. El grado del mineral empleado en la producción de Cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de Cobre. Hay grandes cantidades de Cobre en la Tierra para uso futuro si se utilizan los minerales de los grados más bajos, y no hay probabilidad de que se agoten durante un largo periodo (Lenntech, 2015).

El Cobre es un elemento esencial en la nutrición mineral de las plantas, requerido en concentraciones trazas para completar su ciclo (León, et al., 2012).

5.1.1 TOXICIDAD DEL COBRE EN LAS PLANTAS

El Cobre es un metal toxico cuando se encuentra en los tejidos de las plantas a concentraciones más altas a las necesarias para el crecimiento vegetal. El Cobre promueve la generación de especies reactivas de oxígeno, en forma enzimática y no enzimática, las cuales pueden causar la oxidación de proteínas y lípidos, alterar la integridad de las membranas, la fotosíntesis, el crecimiento e inducir la muerte celular (León, et al., 2012).

5.1.2 TOXICIDAD DEL COBRE EN EL SER HUMANO

El Cobre puede ser encontrado en muchas clases de comidas, en el agua potable y en el aire. Debido a que absorbemos una cantidad eminente de Cobre cada día por la comida, bebiendo y respirando. La absorción del Cobre es necesaria, porque el Cobre es un elemento traza que es esencial para la salud de los humanos. Aunque los humanos pueden manejar concentraciones de Cobre proporcionalmente altas, mucho Cobre puede también causar problemas de salud. Exposiciones de largo periodo al Cobre pueden irritar la nariz, la boca, los ojos y

causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos, diarreas. Una toma grande de Cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte. Aún no se ha determinado si el Cobre es cancerígeno (Lenntech, 2015).

Los efectos por deficiencias y excesos intensos de Cobre se conocen en la medicina humana porque existen dos enfermedades genéticas que representan estos casos extremos y están ampliamente descritas. La enfermedad de Menkes, es el modelo clásico de deficiencia de Cobre muy grave. Por su parte, la enfermedad de Wilson es el ejemplo más conocido de los efectos que produce el exceso de Cobre debido a la falla de la eliminación por la bilis acumula Cobre hasta enfermar y desarrollar cirrosis e insuficiencia hepática. La información existente sugiere que no hay relación entre el consumo de Cobre y el cáncer (PROCOBRE, 2010).

5.2 CADMIO

Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, numero atómico 48; tiene relación estrecha con el Zinc, 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, pero poco más duro que el estaño. Pero atómico de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20°C. su punto de fusión de 320.9°C y de ebullición de 765°C son inferiores a los del Zinc (Lenntech, 2015).

Los metales como el Cadmio se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, lo que hace inevitables que se acumulen a través de toda la cadena

alimenticia. Esto es muy importante desde el punto de vista toxicológico, ya que el cadmio presenta un gran espectro de efectos tóxicos (García, et al., 1999).

5.2.1 TOXICIDAD DEL CADMIO EN PLANTAS

Los efectos tóxicos del Cadmio sobre las plantas, han sido ampliamente estudiados. En general el Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta. Las plantas expuestas a suelos contaminados con Cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración. Uno de los síntomas más extendidos de la toxicidad por Cadmio es la clorosis producida por una deficiencia en Hierro, fosfatos o por la reducción del transporte de Mn. También ocasiona alteraciones en la funcionalidad de la membrana plasmática y desequilibrios en el metabolismo del cloroplasto, inhibiendo la síntesis de clorofila y reduciendo la actividad de enzimas implicadas en la fijación de CO₂ (Rodríguez, et al., 2008).

Estos son algunos de los efectos del Cadmio sobre las plantas según (Pernía, et al., 2008). Reducción en el crecimiento y de la elongación de las raíces, inhibición de la apertura estomática, inhibición de la síntesis de clorofila, inhibición de la fotosíntesis, disminución en el contenido de carotinoides, disminución en la tasa de transpiración, c y el crecimiento del tubo polínico, estrés oxidativo y enzimas antioxidantes, interferencia con la toma, transporte y uso de varios macro y micronutrientes, especialmente Fe, Mn y Zn. Reacciones semejantes a hipersensibilidad, disturbio en el control redox y el metabolismo.

5.2.2 TOXICIDAD DEL CADMIO EN EL HUMANO

El cadmio tiene efectos bien establecidos sobre los riñones, los huesos y los pulmones; se tiene menos evidencia de sus efectos neurotóxicos, teratogénicos o alteradores del sistema endocrino. Incluso una exposición crónica relativamente baja puede causar daños irreversibles a los túbulos renales, que pueden dar lugar al daño glomerular y a la insuficiencia renal; con frecuencia se observe pérdida de hueso junto con estos efectos (Mead, 2011).

El Cadmio está clasificado como carcinógeno para los seres humanos, en general, la población está expuesta al Cadmio principalmente por vía oral a través del agua e ingesta de comida contaminada con Cadmio (hojas vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras animales y pescado). El Cadmio afecta diversos órganos y tejidos como son: riñón produciendo disfunción renal tubular, proteinuria e insuficiencia renal crónica, corazón produciendo arteroesclerosis aórtica y coronaria, incremento en colesterol y ácidos grasos; huesos, testículos, placenta y sistema nervioso central y periférico. El pulmón es un órgano muy susceptible a la exposición de Cadmio, la inhalación crónica subaguda, puede producir bronquitis con daño progresivo alveolar, fibrosis secundaria y enfisema. Los mecanismos moleculares de la toxicidad de Cadmio no son completamente conocidos hasta el momento (Nava, et al, 2011).

Algunas manifestaciones clínicas por ingestión son: náuseas, vómitos, dolores abdominales y cefalea. En muchos casos hay diarrea intensa con colapso. Estos síntomas aparecen cuando se ingiere agua o alimentos con Cadmio en

concentraciones de alrededor de 15 ppm. La intoxicación aguda puede producirse por la ingestión de altas concentraciones de Cadmio y lleva, incluso, al choque (Pérez, et al., 2012).

El contenido corporal de Cadmio se incrementa con la edad hasta los 50 años. En los adultos, la carga corporal de Cadmio puede llegar a 40 miligramos, dependiendo de la situación geográfica y sobretodo del hábito de fumar, pues en un fumador la carga alcanza el doble. La vida media del Cadmio en el organismo total es de 30 a 40 años. El riñón es más sensible al Cadmio que el pulmón e hígado y el epitelio del túbulo renal proximal es el punto blanco. Su deterioro se pone de manifiesto por el incremento de proteínas de peso molecular bajo, lo que causa “proteína de peso molecular bajo” (Ramírez, 2002).

6. CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR METALES PESADOS

La contaminación de los suelos por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) se ha incrementado considerablemente, como consecuencia del empleo intensivo de agroquímicos, de los residuos generados por actividades de minería, fundición y del riego con aguas residuales. Esta problemática ocurre, generalmente, en las zonas agrícolas cercanas a las grandes urbes, en donde los volúmenes de aguas residuales industriales y municipales son cada vez mayores (Tamariz, 1996).

Los EPTs pueden ser absorbidos por las plantas cultivadas y asimilados o depositados en las mismas, por lo que es necesario conocer los niveles actuales de contaminación por metales pesados en suelos agrícolas, sobre todo por el efecto que estos pueden ejercer sobre la salud humana y animal. Adicionalmente,

los contaminantes tienen la capacidad de reducir la calidad del suelo y, por ende, su productividad (Bautista & Viñas, 2006).

Cuando el contenido de metales pesados en el suelo alcanza niveles que rebasan los límites máximos permitidos causan efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas. En el suelo, los metales pesados como iones libres, pueden tener acción directa sobre los seres vivos lo que ocurre a través del bloqueo de las actividades biológicas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos (Cañizares, 2000).

La problemática de los metales pesados como Plomo, Níquel, Cadmio y Manganeso, presentes en el agua residual utilizada para riego, radica principalmente en que pueden ser acumulados en los suelos agrícolas. Resultan peligrosos por su carácter no biodegradable (Mancilla, et al., 2012).

(Brito & Galváz, 2015) señalan que algunos de los metales pesados pueden formar parte natural del suelo en cantidades que no resultan tóxicas para los seres vivos; sin embargo; la industrialización ha provocado un aumento de la presencia de estos en las aguas residuales que se utilizan para riego, con el consecuente riesgo para la salud humana y ambiental. El proceso de migración y fijación de contaminantes dentro de un sistema cerrado, dependerá de la capacidad de absorción por parte de los subsistemas agua-suelo-planta, aplicación de tasas de riego (concentración del contaminante), y de la persistencia y toxicidad de los contaminantes.

(Arrayone, et al., 2010) cita que con frecuencia los metales pesados se encuentran en forma iónica interactuando fuertemente con la matriz del suelo. Estos metales pueden movilizarse y cambiar su forma química debido a cambios en las condiciones medioambientales.

Entre los metales pesados, el plomo (Pb) es un contaminante potencial y real en algunos lugares en el mundo ya que se acumula con facilidad en suelos y sedimentos. La presencia de Pb en el ambiente se debe principalmente a las actividades antrópicas. El Pb no es un elemento esencial para las plantas, los animales o para los seres humanos, por lo que concentraciones elevadas de este metal pesado en los humanos causan diferentes síntomas de toxicidad tales como: retraso del crecimiento, impacto al sistema nervioso, entre otros. La fitorremediación es una tecnología alternativa de bajo costo que consiste en la utilización de plantas para descontaminar los suelos. Los hongos micorrizicos arbusculares (HMA) ofrecen un atractivo mecanismo de fitorremediación, debido a que durante la interacción simbiótica, el sistema radical de las plantas micorrizadas se incrementa y con esto se aumenta el potencial para tomar Pb. Algunos reportes muestran que la mayor concentración de Pb en plantas micorrizadas que crecen en suelos contaminados se encuentra en las raíces, funcionando la micorriza como un sistema fitoestabilizador. También se ha observado que la inoculación de plantas con HMA permite la acumulación de Pb en tallos y hojas. Los mecanismos por los cuales se logra almacenar el Pb en la raíz y en la parte aérea de la planta son desconocidos (Alvarado, et al., 2011).

Las técnicas de fitocorrección son reconocidas actualmente como alternativas prometedoras a las técnicas clásicas de limpieza de suelos con una contaminación difusa o moderada en metales pesados. Sin embargo, relativamente pocas especies de plantas han sido estudiadas para propósitos de fitocorrección. El avance de estas técnicas todavía requiere de la realización de estudios biogeoquímicos y de búsqueda de nuevas especies vegetales adecuadas. En este sentido, suelos naturalmente ricos en metales pesados como consecuencia de la composición química de las rocas de las cuales derivan, como pueden ser las áreas serpentínicas, pueden funcionar como fuentes de plantas metalotolerantes con un potencial uso en aplicaciones de fitocorrección. Para ello se recogieron muestras de roca, suelos y plantas en seis localizaciones del área estudiada en base a su diferente litología (serpentinitas, peridotitas, granulitas, migmatitas y esquistos), analizando la composición química de las rocas, el contenido total, fraccionamiento químico y biodisponibilidad de Mn, Cr, Ni, Co, Cu, Zn y Pb en los suelos y la acumulación de estos metales en las raíces, tallos y hojas de las plantas. Los resultados muestran que las rocas de composición ultrabásica presentan las mayores concentraciones de Ni, Cr y Co, especialmente las que presentaban rasgos de serpentización; por su parte el Cu, Zn y Mn se asociaron con las rocas de composición básica (granulitas) y el Pb con las rocas ácidas, especialmente con los esquistos. El contenido total de estos metales en el suelo, pero no su biodisponibilidad, reflejó de forma general el contenido metálico de los materiales originales. Nueve especies de plantas (representando 7 familias) fueron muestreadas, incluyendo a efectos comparativos a la hiperacumuladora de Ni

Alyssum serpyllifolium subsp. *lusitanicum*. Los patrones de absorción y acumulación de los metales en planta no sólo variaron en función de la especie vegetal, sino también de las condiciones edáficas de su procedencia. Generalmente la mayor acumulación de metales, translocación ($[\text{Metal}]_{\text{Hoja}}: [\text{Metal}]_{\text{Raíz}}$) y bioacumulación ($[\text{Metal}]_{\text{Hoja}}: [\text{Metal}]_{\text{Suelo}}$) fue encontrada en cuatro de las especies no hiperacumuladoras de metales: *Cistus ladanifer*, *Lavandula stoechas*, *Plantago subulata* subsp. *radicata* y *Thymus mastichina*. Mientras que *P. subulata* es de menor interés dada su escasa biomasa, las otras tres especies podrían llegar a tener un uso potencial en tecnologías de fitocorrección, particularmente en la fitoextracción de Cr, Mn y Zn en suelos contaminados (Diez, 2008).

7. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR METALES PESADOS

En la actualidad se estima en más de un millón de sustancias diferentes las que son introducidas en las aguas naturales a través de los vertidos antropogénicos (Forstner et al., 1993). Muchas de ellas no son consideradas tóxicas, si bien pueden alterar las características organolépticas del agua, perturbar severamente el ecosistema y/o ser directamente nocivas para el hombre.

Los problemas de la contaminación de las aguas tienen su origen en la Revolución Industrial, hace aproximadamente unos 200 años y con un rápido aumento de la población mundial (Dekov et al., 1998). La industrialización condujo a una urbanización muy localizada creando problemas en la calidad y en la cantidad del agua (Forstner et al., 1990; Vink et al., 1999). El hombre abandonó el campo para trabajar en las nuevas fábricas alrededor de las cuales se crearon grandes

ciudades densamente pobladas. El primer suceso para los problemas de la calidad del agua, se presentó con motivos de la contaminación fecal y orgánica por la falta de tratamiento de aguas residuales en zonas de alta densidad poblacional (Meybeck & Helmer 1989). Por ello, las concentraciones de los metales pesados en las aguas están directamente relacionadas con las actividades humanas y descargas de efluentes, como también son función de las variaciones de caudal de ciertos vertidos puntuales que el río recibe (Geesey et al., 1984 & Behrendt, 1997).

Los cursos de agua han sido desde tiempo inmemorial los receptores, directos o indirectos de los desechos líquidos que el hombre ha generado debido a su propia actividad. En un principio, eran capaces de soportar las cargas contaminantes que a los ríos se vertían merced a su carácter autodepurador. Posteriormente, al crearse grandes asentamientos urbanos, se incrementó notablemente la cuantía de los vertidos. En consecuencia, los cursos fluviales perdieron su capacidad autodepuradora y se produjeron graves alteraciones en la calidad de sus aguas, con los subsiguientes peligros para la salud de las poblaciones situadas aguas abajo. Estos riesgos se debían principalmente a que la carga orgánica transportada podría servir de vehículo para la aparición de enfermedades infecciosas y por tanto, para la propagación de epidemias (Rovira, 1993).

Desde entonces, los esfuerzos para lograr la eliminación de los contaminantes generados por el hombre no han sido capaces de ajustarse ni al ritmo de incremento en la cantidad de desechos industriales, ni al crecimiento demográfico. Esto ha provocado a menudo la transformación de las aguas de ríos, lagos y

costas en depósitos de residuos en los que el equilibrio natural esta severamente perturbado y en muchos casos totalmente roto (Forstner & Wittmann, 1981).

Al contrario que muchos contaminantes orgánicos los metales pesados, generalmente, no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales debido a que no son biodegradables (Murray, 1996). Por el contrario, son muy contaminantes y sufren un ciclo global eco-biológico, donde las aguas naturales son el principal camino (Moalla et al., 1998). Hoy en día los metales pesados tienen un gran significado como indicadores de la calidad ecológica de todo flujo de agua debido a su toxicidad y muy especialmente al comportamiento bioacumulativo (Purves, 1985).

Asimismo, los metales pesados tienen tendencia a formar asociaciones, con sustancias minerales (carbonatos, sulfatos, etc) y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante fenómenos de intercambio iónico, adsorción, quelación, formación de combinaciones químicas, etc., por lo que se acumulan en el medio ambiente, principalmente en los sedimentos de ríos, lagos y mares (Dekov et al., 1998).

Estos elementos por otra parte, pueden pasar fácilmente de fases solidad de los sistemas acuáticos y viceversa, debido tanto a variaciones de los componentes bióticos como abióticos, lo que hace que los sedimentos no sean compartimentos estancos de metales. Pueden resolubilizarse por distintos fenómenos así (generalmente en formas químicas diferentes) son directamente incorporados por el hombre, o bien llegan indirectamente hasta el a través de la cadena trófica.

Las altas concentraciones de metales pesados en las aguas de corrientes fluviales asociados a sulfuros tales como el As, Cd, Cu, Pb y Zn pueden atribuirse a la minería son causa del fuerte impacto en el medio ambiente (Salomons, 1995). En cambio, otros metales no-sulfurosos como el Cr, Ni y Hg posiblemente indican una contaminación antropogénica de metales pesados que están estrechamente asociados con las descargas industriales (Fernández et al., 1997).

En España se han comparados dos praderas de *Cymodocea nodosa* que crecían en zonas cercanas a la desembocadura de ramblas sobre sedimentos contaminados por metales pesados procedentes de la minería, situadas en la cubeta sur del Mar Menor. Se estudió la acumulación de Zn, Pb y Cd en diferentes compartimientos de la planta: raíces, rizomas, hojas y el biofilm que se desarrolla sobre las hojas, junto con ciertos parámetros de sedimento que regulan la disponibilidad de los metales. Se determinó la estructura y dinámica de cada pradera y se estudiaron sus respectivas comunidades de macroinvertebrados asociados. Los resultados indican que *C. nodosa* acumula metales pesados en sus tejidos, reflejando la biodisponibilidad de los mismos para las plantas vasculares que crecen en los fondos contaminados. En todas las estaciones de muestreo, el contenido de metales en rizomas fue menor que el de las hojas o las raíces. La concentración de sulfuros en los sedimentos parece no tener influencia en la disponibilidad de los metales para la planta, posiblemente debido al transporte de oxígeno que esta realiza hacia las raíces, aunque pudiera ser la causa de distintos patrones de acumulación encontrados entre las estaciones. La mayor concentración de metales en las estaciones contaminadas fue encontrada

en el biofilm, debido a la formación de complejos entre los metales y las sustancias poliméricas extracelulares que lo forman. Todas las praderas se encontraron en expansión, acumulando gran cantidad de metales aquellas que crecían en fondos contaminados próximos a las ramblas y mostrando a su vez mayor superficie fotosintética por la hoja y mayor biomasa foliar. Sin embargo, estos parámetros estructurales parecen no ser los responsables de las diferencias encontradas en sus comunidades de invertebrados asociadas. En este sentido, el análisis multivariante identificó la concentración de metales en las hojas, en el biofilm y en el sedimento como las principales variables que podrían ser responsables de dichas diferencias faunísticas. Se demuestra cómo tanto la fanerógama marina *C. nodosa* como el biofilm que crece sobre sus hojas, pueden ser usadas como herramientas ambientales en la laguna contera del Mar Menor. *C. nodosa* como indicador de la contaminación de los sedimentos y el biofilm de las hojas como un centinela de la calidad del agua (Marín, 2007).

El sector meridional de la cuenca del río Guadiana (CRG) drena la parte centro-occidental de la Faja Piritica Iberica (FPI), una zona con innumerables yacimientos de sulfuros polimetálicos y residuos de las actividades mineras que, en condiciones oxidantes, generan un lixiviado ácido con grandes cantidades de sulfatos, metales y metaloides en solución. Estos lixiviados ácidos se filtran en el sistema fluvial, contaminando las masas de agua superficiales y aumentando el riesgo contaminación para las poblaciones locales y el hábitat ribereño, los lixiviados ácidos son neutralizados de forma gradual, a medida que discurren lejos de las zonas mineras, por la precipitación de minerales secundarios de Fe-(Cu-Al).

Del mismo modo, hay una reducción importante de la carga contaminante en el área estearina como consecuencia del proceso de mezcla con agua de mar. Esto contribuye a una pérdida de los metales en solución debido a la dilución y a los procesos de precipitación que se producen como consecuencia del aumento del pH (Delgado, 2012).

8. CONTAMINACIÓN DE ALIMENTOS POR METALES PESADOS

La contaminación con metales pesados de las fuentes de agua superficial y subterránea da como resultado una considerable contaminación del suelo y esa contaminación se incrementa cuando se desparraman las rocas minerales en la superficie de la tierra para relleno manual (Garbarino, et al., 1995).

Cuando se contaminan los suelos destinados a la agricultura, esos metales son absorbidos por las plantas y consecuentemente se acumulan en sus células (Trueby, 2003). Los animales que pastan en esos terrenos y comen esas plantas y beben las aguas contaminados de los alrededores, como así también se alimentan de las plantas acuáticas contaminadas con metales pesados, acumulan tales metales en su carne y leche, que se transfiera a sus crías por lactancia (Peplow, 1999).

Luego les llega el turno a los humanos de exponerse a los metales pesados al consumir esas plantas y animales contaminados, y ello es sabido que resultara en varios desordenes bioquímicos. En resumen, todos los organismos vivos dentro de un determinado ecosistema son contaminados en distinta forma a lo largo de la cadena alimentaria (Habashi, 1992).

8.1. LISTA DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES EN LOS ALIMENTOS

CUADRO 1. Principales contaminantes en los alimentos

Contaminantes	Alimentos
Aldrin, Dieldrin, Complejo DDT, Endosulfan, Endosulfan Sulfato, Endrin, Hexaclorociclohexano, Hexaclorobenceno, Heptachlor, Heptachlor epóxido policlorobifenilos	Leche entera, mantequilla, grasas, y aceites animales, cereales, leche humana
Plomo	Leche, carne fresca enlatada, riñones, cereales, frutas en conserva, condimentos, zumo de frutas, alimentos de bebes, refrescos, vino, agua envasada
Cadmio	Riñones, moluscos, crustáceos, cereales
Mercurio	Pescado, productos de mar
Aflatoxinas	Leche, productos lácteos, huevo, maíz, cereales, cacahuates, almendras, nueces, especias y condimentos, higos

	secos
Ochratoxina A	Trigo, cereales, carne de cerdo
Patulin	Manzana, zumo de manzana, otros tipos de manzana y sus frutas
Fumonisis	Maíz
Diazinon, fenitrothion, malathion, parathion, metil parathion, metil pirimiphos, chlorpyrifos	Cereales, vegetales, frutas, agua potable
Dithiocarbamatos	Cereales, vegetales, frutas, agua potable
Radionucleidos (Cs-137, Sr-90, I-131, Pu-239)	Cereales, vegetales, frutas, agua potable
Nitratos y nitritos	Vegetales, agua potable

(Fuente: Ortega, 2001)

8.2. CONSEJOS PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DE LOS ALIMENTOS

Diez consejos para prevenir la contaminación de alimentos

- Comprar alimentos de vendedores de buena reputación. Observar las fechas de caducidad. Comprar solo productos cuya envoltura este en buen estado. Evitar los alimentos cuyo envase este oxidado o deforme.
- Leer las etiquetas para conocer los ingredientes, incluyendo aditivos.
- Llevar los alimentos del mercado inmediatamente a la casa y guardarlos debidamente. No permitir que reposen a temperaturas en zona de peligro (entre 4°C y 60°C) por más de dos horas.
- Mantener limpios los mostradores y utensilios de cocina.
- Tirar los alimentos echados a perder a la basura.
- Lavar la fruta fresca y vegetales con agua limpia antes de comerlos. Usar un cepillo cuando sea posible, para quitar gérmenes y residuos. El pelar frutas y legumbres reduce el riesgo de residuos y gérmenes, pero puede reducir una fuente de nutrientes valiosa.
- Descongelar los alimentos adecuadamente, en el refrigerador no sobre el mostrador, cocine alimentos inmediatamente después de descongelarlos.
- Cocine todos los alimentos completamente (hasta la debida temperatura interna).
- Mantenga temperaturas adecuadas en el refrigerador.
- Refrigere las sobras inmediatamente. Póngalas en recipientes poco profundos y bien tapados. Caliente las sobras hasta 74°C y salsas o alimentos líquidos hasta que hiervan (Nasreddine, 2002).

9. EFECTOS EN LA SALUD POR INTOXICACIÓN DE METALES PESADOS

Los metales pesados y otras toxinas amenazan cada vez más nuestra salud. En estudios recientes se ha comprobado que hoy en día tenemos de 400 a 1000 veces más Plomo en nuestros huesos que hace 400 años. Entre los metales los más importantes en cuestión de salud son el Mercurio, Plomo, Cadmio, Níquel, y Zinc. Algunos elementos intermedios como el Arsénico y el Aluminio, los cuales son muy relevantes desde el punto de vista toxicológico (Sharapin, 2000).

La intoxicación por metales pesados en la salud es un problema a nivel mundial. Los metales pesados son perjudiciales porque compiten con los minerales sanos (Zinc, Hierro, Selenio, etc.) y esto afecta la forma de aprovechar los nutrientes que ingerimos y a las reacciones químicas que se llevan a cabo en nuestro organismo. Se van acumulando de forma lenta en distintos órganos alterando su correcto funcionamiento (Manahan, 2005).

Desde la época de la revolución industrial los niveles de contaminación han ido aumentando de forma notable. Siendo los metales pesados de los contaminantes principales. Estos no se degradan con facilidad una vez emitidos, permaneciendo en el medio ambiente durante cientos de años en algunos casos, contaminando el agua, la tierra y los alimentos (Bautista, 2002).

Los metales se inhalan principalmente en forma de polvos y humos. También se puede producir una intoxicación por metales como consecuencia de la exposición a vapores; por ejemplo, el vapor de mercurio en la fabricación de lámparas fluorescentes. Cuando se ingieren metales en alimentos o bebidas contaminadas,

la absorción gastrointestinal varía mucho según la forma química específica del metal y la situación nutricional de cada persona. Una vez absorbido el metal, el principal medio de transporte es la sangre, y su cinética precisa depende de la capacidad de difusión (Kantor, 2006).

La mayoría de los metales pesados se eliminan por la saliva, el sudor, la exhalación, la descamación cutánea y la caída del pelo y las uñas (Koivusalo, 1997).

Algunos metales, como el Cobre y el Selenio, son esenciales para el funcionamiento metabólico normal en forma de oligoelementos, pero a niveles altos resultan tóxicos, otros como el Plomo y el Mercurio, son xenobioticos y teóricamente capaces de ejercer efectos tóxicos a cualquier nivel de exposición (Sun, 1999).

Las cantidades de metales pesados en el cuerpo no se pueden medir mediante análisis de sangre; estos se fijan rápidamente a las distintas partes del cuerpo y ahí se almacenan; no se detectan cantidades elevadas ni en las heces ni en la orina, la sangre o el vello. Para medir los metales es necesario utilizar sustancias que los atraigan y los movilicen para expulsarlos del cuerpo por lo que se utilizan una serie de productos llamados quelantes. El empleo de quelantes, se utilizan para ligar los metales y formar compuestos cíclicos estables de toxicidad relativamente baja y que facilitan su excreción.

Los principales quelantes son el Dimercaprol, el Edatat, el Succimero y la Penicilamina; su empleo específico depende del metal implicado. Esta indicado inducir el vómito o el lavado gástrico en las primeras 4 a 6 horas después de la

ingestión aguda. Otros métodos comprenden la diuresis forzada, en el tratamiento con Cloruro de Potasio y la diálisis peritoneal (Lázaro, 1996).

10. NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR METALES PESADOS Y DE LA SECRETARIA DE SALUBRIDAD Y ASISTENCIA

10.1 NOM-147-SEMARNAT/SSA-2004

Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y/o Vanadio. El límite permisible para el Cadmio es de 37mg/Kg de suelo y en el plomo es de 400 mg/kg. El límite permisible del cobre no está determinado.

10.2 NOM-127-SSA1-1994

Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que se debe someterse el agua para su potabilización. Nos menciona que el límite para el Cadmio es de 0.0005 mg/l, para el Cobre es de 2 mg/l.

10.3 NOM- 117-SSA1-1994

Bienes y servicios. Métodos de prueba para la determinación de Cadmio, Arsénico, Plomo, Estaño, Cobre, Fierro, Zinc y Mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. No se señalan límites permisibles para Cadmio ni Cobre.

10.4 NOM-185-SSA1-2002

Productos y servicios, mantequilla, cremas, producto lácteo condensado azucarado, productos lácteos fermentados y acidificados, dulces a base de leche. Especificaciones sanitarias. Los límites máximos permisibles de Plomo para los productos mencionados en esta norma son de 0.10 mg/kg. No se encuentran límites permisibles para Cobre y Cadmio.

10.5 NOM-243-SSA1-2010

Productos y servicios. Leche, formula lactes, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba. El límite máximo permisible para el Plomo es de 0.01 mg/kg para leche, formula láctea y producto lácteo combinado, y para quesos es de 0.5 mg/kg. Los límites permisibles para Cadmio y Cobre no vienen definidos.

10.6 NOM-247-SSA1-2008

Esta Norma Oficial Mexicana establece las disposiciones y especificaciones sanitarias que deben cumplir el transporte y almacenamiento de cereales destinados para el consumo humano, así como el proceso de las harinas de cereales, sémolas o semolinas, alimentos preparados a base de cereales, de semillas comestibles, de harinas, de sémolas o semolinas o sus mezclas y los productos de panificación. Para el Cadmio el límite máximo permisible es de 0.10 mg/kg y en Plomo de 0.50 mg/kg, no señala el límite permisible para el Cobre.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La Comarca Lagunera es la región ubicada en el centro-norte de México, está conformada por parte de los estados de Coahuila y Durango. Se localiza a 24° 22' de latitud norte y 102° 22' de longitud oeste, a una altura de 1,120 metros sobre el nivel del mar. Geográficamente la región lagunera está formada por una enorme planicie semidesértica de clima caluroso y con un alto grado de aridez. El clima es árido y con lluvias deficientes en todas las estaciones. La temperatura promedio fluctúa entre los 28 y 40 grados centígrados, pero puede alcanzar hasta 48°C (2008) en verano y -8°C (1997) en invierno (SEMARNAT, 2010).

2. MUESTREO DE PLANTAS

Las plantas de La Chicura (*Ambrosia ambrosioides*) fueron recolectadas en el lecho seco del Rio Nazas, entre Torreón y Gómez Palacio. Se seleccionaron de acuerdo a características como la altura y la cantidad de hojas y raíces. Fueron extraídas desde la raíz y colocadas en recipientes de aproximadamente 500 cm³, se le agrego suelo de la misma zona y agua para que no sufrieran estrés hídrico.

3. ADAPTACIÓN DE LA PLANTA

Las plantas recolectadas fueron llevadas al invernadero número dos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, para que se adaptaran al clima del invernadero durante un periodo de 22 días, en este tiempo fueron regadas con la solución nutritiva de Steiner para un mejor establecimiento de la planta.

4. SOLUCIÓN NUTRITIVA

Se prepararon doscientos litros de agua para la solución nutritiva de Steiner de acuerdo al análisis de agua para la solución, con esta fueron regadas las plantas durante su adaptación al invernadero y durante el desarrollo del experimento.

CUADRO 2 Análisis del agua empleada en el riego del experimento de la chicura (*Ambrosia Ambrosioides*).

Contenido del agua	Concentraciones Meq/L
Nitratos (NO_3^-)	0.59
Fosfatos (H_2PO_4^-)	0
Sulfatos (SO_4^-)	4.24
Bicarbonatos (HCO_3^-)	1.79
Cloruros (CL^-)	3.64
Potasio (K^+)	0.01
Calcio (Ca^{++})	6.86
Magnesio (Mg^{++})	0.16
Amonio (NH_4^+)	0
Sodio (Na^+)	2.2

CUADRO 3. Solución Steiner empleada en el experimento de la chicura (*Ambrosia Ambrosioides*)

Compuesto	Cantidad de fertilizante (g) en 200 litros de agua
Nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	46.36
Nitrato de potasio KNO_3	144.57
Nitrato de magnesio MgNO_3	54.49
Sulfato de magnesio MgSO_4	42.94
Ácido fosfórico	13.4 ml

5. PREPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Se evaluaron dos metales que son el Cobre y el Cadmio, para cada metal se tenía un estándar de mil ppm (125 ml) de la marca Perkir Elmer.

Se utilizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos, cuatro niveles y cuatro repeticiones. Los niveles evaluados fueron: N1: solución nutritiva Steiner, N2: una ppm, N3: dos ppm, y N4: tres ppm, para el Cobre y para el Cadmio: El nivel uno solo fue regado con solución nutritiva Steiner; Para el nivel dos, que es una ppm del metal, se preparó en un garrafón la solución, un volumen de 19.98 litros de solución nutritiva Steiner más 20 ml del estándar metálico; Para el nivel tres, que es dos ppm del metal, se preparó en un garrafón la solución, un volumen de 19.60 litros de solución nutritiva Steiner más 40 ml del estándar metálico; Para el nivel cuatro, que es tres ppm del metal, se preparó en un garrafón la solución, un volumen de 19.40 litros de solución nutritiva Steiner más 60 ml del estándar metálico. Esto fue para cada metal el Cobre y el Cadmio.

6. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Las plantas fueron trasplantadas a recipientes más grandes de aproximadamente mil cm³ con un sustrato de arena más perlita en relación 1:1, para la retención de la solución. En un diseño experimental completamente al azar de cuatro tratamientos y cuatro repeticiones se tienen 16 plantas por metal, con un total de 32 plantas. A partir del primer día del trasplante las plantas fueron regadas con su respectivo tratamiento cada tercer día con 500 ml de la solución, teniendo una duración de 21 días.

7. COSECHA DE LAS PLANTAS

El día número 21 del experimento las plantas fueron cosechadas, extrayendo cada planta del recipiente y separándola en raíz, tallo y hojas. Cada parte de la planta se colocó en bolsas de papel canela con su respectiva identificación para las 32 plantas del experimento, teniendo al final 96 muestras.

8. SECADO

Las muestras fueron llevadas a otro invernadero sin pared húmeda para que se deshidrataran, extendiendo las muestras en un espacio del invernadero de forma que estuvieran expuestas a la luz. Se mantuvieron durante una semana, a una temperatura interior del invernadero de 30°C.

9. MOLIDA

Una vez que las muestras se secaron, fueron trasladadas al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de la ciudad de Matamoros Coahuila donde se llevó a cabo el proceso de molienda y digestión. La

molienda es el proceso por el cual la planta es triturada y molida hasta que esta quede de una manera homogénea y con textura de polvo. Este proceso se llevó a cabo utilizando un molino marca Dayton de HP 1/4, una licuadora marca Osterizer en la cual se daba la primera triturada a las raíces y los tallos que son la parte de la planta más rígida, para así facilitar el trabajo del molino y un compresor de aire que se utilizaba para realizar limpieza de los equipos. Al realizar la molienda las muestras se colocaron en bolsas pequeñas de plástico transparente, previamente etiquetadas.

10. PREPARACIÓN DE LAS DIGESTIONES

Al terminar la molienda de las muestras se inició inmediatamente con el proceso de digestión, en el cual el primer paso fue pesar 0.50 gramos de cada muestra en una báscula de precisión marca OHAUS con capacidad de 250 gramos. Después cada muestra se colocó en un recipiente agregando 2 ml de agua oxigenada y 6 ml de ácido nítrico. Se sellaron herméticamente, posteriormente se colocaron en el equipo Ethos One Microwave Digestion System, durante 50 minutos a una temperatura de 200 grados centígrados. Al terminar el proceso se dejan enfriar las muestras para poder retirarlas y el contenido se vacía en frascos de 100 ml donde se afora con agua destilada.

11. DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS

La cuantificación de metales pesados se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo AANALYST200, se utilizó para la curva de calibración un estándar de 1000 ppm, estas determinaciones se realizaron en el

laboratorio del sistema municipal de agua y saneamiento (SIMAS) de Torreón Coahuila, acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

12. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se utilizó un diseño completamente al azar, dos tratamientos (Cobre y Cadmio) por cuatro niveles (solución Steiner, una, dos y tres ppm) por cuatro repeticiones, en tres niveles de respuesta (hoja, tallo y raíz); asimismo la prueba de medias se realizó por el método de Tuckey's y se llevó a cabo utilizando el programa SAS.

13. MATERIALES Y REACTIVOS

Los materiales utilizados en el transcurso del experimento fueron los siguientes: palas truper, maceteros de aproximadamente 500 cm³ y 1000 cm³, charolas para el transporte de las plantas, tambo de 200 litros para la solución Steiner, ocho garrafas de 20 litros para las soluciones metálicas, sustratos arena y perlita, vasos graduados para aplicar la dosis exacta a cada planta en el riego con la solución, tijeras de poda, bolsas de papel color canela, licuadora, molino, compresor de aire, báscula de precisión, aluminio, cuchara de plástico, agua oxigenada, ácido nítrico, Ethos One Microwave Digestion System, frascos de polietileno con tapa, y los estándares de Cobre y Cadmio a una concentración de mil ppm.

IV. RESULTADOS

4.1. CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA PLANTA

En el cuadro 4 se muestran las concentraciones de los metales pesados encontrados en el tallo, hoja y raíz de la planta.

CUADRO 4. Concentraciones de metales pesados en el tallo, hoja y raíz de la planta.

TRATAMIENTO	REPETICIÓN	CONCENTRACIÓN (mg kg ⁻¹)					
		TALLO		HOJA		RAÍZ	
		COBRE	CADMIO	COBRE	CADMIO	COBRE	CADMIO
1	1	0.44	0.5270	1.166	0.1000	2.6200	0.1000
1	2	2.11	0.1000	1.060	0.1000	1.2450	0.1000
1	3	0.65	1.3960	0.808	0.1000	0.6510	0.1000
1	4	1.18	0.1000	2.182	0.1000	1.3380	0.1000
2	1	1.64	0.1000	1.106	0.1000	0.9720	0.1000
2	2	1.36	5.6200	0.972	0.1412	1.0630	0.1000
2	3	0.67	0.1000	6.320	0.1000	0.9640	0.1000
2	4	1.34	0.2905	1.395	0.2334	1.2530	0.2859
3	1	0.65	0.1000	0.649	0.4080	0.7560	0.1000
3	2	4.18	0.1412	0.444	2.5960	0.6510	0.1000
3	3	1.15	0.1000	0.649	1.3960	1.2910	0.0774
3	4	0.53	0.1000	1.486	0.1000	0.3970	0.1000
4	1	3.31	0.1000	1.337	0.9320	0.9780	0.1000
4	2	1.18	0.1000	1.377	0.1000	0.8226	0.1000
4	3	0.97	0.1000	1.267	0.1000	0.9650	0.1000
4	4	1.06	0.1000	2.059	2.5960	0.5250	0.1000

T1: SOLUCIÓN NUTRITIVA, T2: 1, T3: 2, T4: 3 (mg kg⁻¹)

4.2. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN EL TALLO.

En el cuadro número 5 se muestra el análisis de varianza de los resultados obtenidos en el tallo. Estos resultados no muestran diferencia significativa entre los tratamientos.

CUADRO 5. Análisis de varianza de cadmio y cobre en el tallo de la planta.

Metales Pesados	R ²	Coefficiente de Variación (C.V)	Valor de F	Significancia Estadística
Cadmio	0.305667	136.6102	1.76	>0.2080
Cobre	0.055471	79.54018	0.23	>0.8703

4.3. COMPARACIÓN DE MEDIAS (TUKEY'S) PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN EL TALLO.

CUADRO 6. Comparación de medias por el método Tuckey's para los metales en el tallo.

Metales pesados	Media	Numero de muestras	Tratamiento	Significancia
Cadmio	0.5308	4	1	A
	0.1635	4	2	A
	0.1103	4	3	A
	0.1000	4	4	A
Cobre	1.6293	4	4	A
	1.6253	4	3	A
	1.2488	4	2	A
	1.0963	4	1	A

*Tratamiento con la misma letra no es significativo.

4.4. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN LA HOJA DE LA PLANTA.

En el cuadro número 7 observamos el análisis de varianza realizado en Cadmio y Cobre en la hoja de la planta.

CUADRO 7. Análisis de varianza de Cadmio y Cobre en la hoja de la planta.

Metales Pesados	R ²	Coefficiente de Variación (C.V)	Valor de F	Significancia Estadística
Cadmio	0.297037	141.6681	1.69	>0.2219
Cobre	0.203161	89.69639	1.02	>0.4181

4.5. COMPARACIÓN DE MEDIAS (TUKEY'S) PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA HOJA.

CUADRO 8. Comparación de medias por el método Tukey's para los metales en la hoja.

Metales pesados	Media	Numero de muestras	Tratamiento	Significancia
Cadmio	1.1250	4	3	A
	0.9320	4	4	A
	0.1427	4	2	A
	0.1000	4	1	A
Cobre	2.4483	4	2	A
	1.5100	4	4	A
	1.3040	4	1	A
	0.8070	4	3	A

*Tratamiento con la misma letra no es significativo.

4.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA RAÍZ.

En el cuadro 9 se muestra el análisis de varianza de los resultados obtenidos en el análisis de la raíz.

CUADRO 9. Análisis de varianza de Cadmio y Cobre en la raíz de la planta.

Metales Pesados	R ²	Coefficiente de Variación (C.V)	Valor de F	Significancia Estadística
Cadmio	0.212578	42.48142	1.08	>0.3946
Cobre	0.308156	45.79111	1.78	>0.2041

4.7. COMPARACIÓN DE MEDIAS (TUKEY'S) PARA LA COMPARACIÓN DE METALES PESADOS EN LA RAÍZ DE LA PLANTA.

CUADRO 10. Comparación de medias por el método de Tukey's para los metales en la raíz de la planta.

Metales pesados	Media	Numero de muestras	Tratamiento	Significancia
-----------------	-------	--------------------	-------------	---------------

Cadmio	0.14648	4	2	A
	0.10000	4	1	A
	0.10000	4	4	A
	0.09435	4	3	A

Cobre	1.4635	4	1	A
	1.0630	4	2	A
	0.8227	4	4	A
	0.7738	4	3	A

*Tratamiento con la misma letra no es significativo.

V. DISCUSIÓN

En el cuadro 4 se observan las concentraciones de los metales pesados (Cadmio y Cobre) en el tallo, hoja y raíz de la planta. Se analizan los cuatro tratamientos (T1: solución nutritiva, T2: 1, T3: 2 y T4:3 mg kg⁻¹) con sus cuatro repeticiones. El metal con mayor concentración que se encuentra es el Cobre en el tratamiento dos, con 6.320 mg kg⁻¹, localizado en la hoja de la planta, mientras que en la raíz se localizan las menores concentraciones de este metal, siendo inferiores a 0.1000 mg kg⁻¹. Por otra parte, el Cadmio se encontró en mayor concentración en la hoja, siendo en los tratamientos tres y cuatro con 2.5960 mg kg⁻¹, mientras que la menor acumulación se observó la raíz en concentraciones menores a 0.1000 mg kg⁻¹ en sus cuatro tratamientos. Este resultado concuerda con lo realizado por (Prieto, 2007), donde demuestra como el metal pesado se adhiere a la célula vegetal y se transporta a las partes de la planta.

En el cuadro 5 se muestra el análisis de varianza de Cadmio y Cobre de los resultados obtenidos en el tallo. Se observa que los coeficientes de variación son muy altos, esto se debe a que las plantas empleadas en el experimento no estaban limpias porque se extrajeron del campo y ya venían contaminadas por otro metal. Por lo tanto, para otro experimento de continuidad se recomienda propagar la planta a evaluar para así asegurar mejores resultados. Estos resultados no muestran diferencia significativa entre los tratamientos.

En el cuadro 6, se muestra la comparación de medias (Tuckey's) para los metales (Cadmio y Cobre) en el tallo. En el tratamiento cuatro el metal que tuvo mayor

concentración fue el Cobre con una media de $1.6293 \text{ mg kg}^{-1}$, aunque fue este tratamiento el que tuvo mayor concentración no hubo significancia, el tratamiento que menos concentración obtuvo fue el uno con una media de $1.0963 \text{ mg kg}^{-1}$. Se puede observar que en el Cadmio el tratamiento que mostró mayor concentración fue el uno con una media de $0.5308 \text{ mg kg}^{-1}$, y por otro lado el tratamiento de menor concentración fue el cuatro con una media de $0.1000 \text{ mg kg}^{-1}$, no obteniendo alguna significancia.

En el cuadro 7 se muestra el análisis de varianza de Cadmio y Cobre de los resultados obtenidos en la hoja de la planta. Se observa que los coeficientes de variación son muy altos, de igual manera que sucedió en el tallo. Estos resultados no muestran diferencia significativa entre los tratamientos.

En el cuadro 8, se muestra la comparación de medias (Tuckey's) para los metales (Cadmio y Cobre) en la hoja. En el tratamiento dos el metal que tuvo mayor concentración fue el Cobre con una media de $2.4483 \text{ mg kg}^{-1}$, aunque fue este tratamiento el que tuvo mayor concentración no hubo significancia, el tratamiento que menos concentración obtuvo fue el tres con una media de $0.8070 \text{ mg kg}^{-1}$. Se puede observar que en el Cadmio el tratamiento que mostró mayor concentración de este metal fue el tres con una media de $1.1250 \text{ mg kg}^{-1}$, y por otro lado el tratamiento de menor concentración del metal fue el uno con una media de $0.1000 \text{ mg kg}^{-1}$, no obteniendo alguna significancia.

En el cuadro 9 se muestra el análisis de varianza de Cadmio y Cobre de los resultados obtenidos en la raíz de la planta. Se observa que los coeficientes de

variación son muy altos, por la razón ya mencionada anteriormente. Estos resultados no demuestran diferencia significativa entre los tratamientos.

En el cuadro 10, se muestra la comparación de medias (Tuckey's) para los metales (Cadmio y Cobre) en la raíz. En el tratamiento uno el metal que tuvo mayor concentración fue el Cobre con una media de $1.4635 \text{ mg kg}^{-1}$, aunque fue este tratamiento el que tuvo mayor concentración no hubo significancia, el tratamiento que menos concentración obtuvo fue el tres con una media de $0.7738 \text{ mg kg}^{-1}$. Se puede observar que en el Cadmio el tratamiento que mostro mayor concentración de este metal fue el 2 con una media de $0.14648 \text{ mg kg}^{-1}$, y por otro lado el tratamiento de menor concentración fue el tres con una media de $0.09435 \text{ mg kg}^{-1}$, no obteniendo alguna significancia.

Estos resultados son los primeros en reportarse, ya que esta especie (*Ambrosia Ambrosioides*), no había sido evaluada como fitorremediadora. Por lo cual no es posible realizar comparación con resultados de diferentes concentraciones con esta planta; sin embargo, (Pérez, 2008) en su experimento con la especie vegetal *Nicotina glauca*, G, y los metales pesados evaluados fueron el Plomo y Zinc, encontró que esta planta acumulo Pb en concentraciones de 283.3 mg/kg entre la raíz, tallo y hoja, y Zn en una cantidad de 605.1 mg/kg entre la raíz, tallo y hoja. Utilizando suelo contaminado por Plomo y Zinc en concentraciones iniciales de 32260 mg kg^{-1} y 31231 mg kg^{-1} respectivamente, y al finalizar se redujeron a 26252 mg kg^{-1} de Plomo y 24252 mg kg^{-1} de Zinc.

(Luna, 2011) demostró en su trabajo de experimentación, que la alfalfa (*Medicago sativa L.*) absorbe grandes contenidos de metales pesados, los cuales se presentan en mayor concentración dentro de los tallos con cantidades de 3625 mg kg⁻¹, el zacate ballico (*Lolium sativa L.*) acumula ligeras concentraciones de metales pesados (Pb: 1925 mg kg⁻¹, Cu: 1665 mg kg⁻¹, Cd: 401.5 mg kg⁻¹, As: 100 mg kg⁻¹), y el zacate navajita (*Bouteloua griseoloba L.*) logra absorber mínimas concentraciones de metales pesados en sus tejidos (Pb: 1615 mg kg⁻¹, Cu: 1700 mg kg⁻¹, Cd: 566.5 mg kg⁻¹, As: 100 mg kg⁻¹). Y concluye que la alfalfa es la planta que acumula las mayores concentraciones de metales pesados.

VI. CONCLUSIÓN

Después de analizar los resultados obtenidos en este trabajo de experimentación, se demuestra que:

- La Chicura (*Ambrosia Ambrosioides*) es capaz de absorber metales pesados en sus estructuras, la mayor concentración se encuentra en la hoja, con una acumulación de $2.4483 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cobre y $1.1250 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cadmio.
- En la hoja de la planta se encontraron las concentraciones mayores, mientras que en la raíz las menores.
- La hipótesis que considera que la mayor concentración de Cadmio y Cobre se localiza en la raíz, se rechaza.

Se sugiere hacer una investigación a mayor concentración de metales pesados, observándose que en este experimento la planta no presento afectaciones.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. (2001). *Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites*. Environmental Pollution.
- Alvarado, C. J., Nabanita, D. S., & Enrique, A. (2011). Hongos Micorrízicos Arbusculares y la Fitorremediación de Plomo. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27 (4), 357-364.
- Arrayone, Q., Araque, M., & Pelaez, J. (2010). Evaluación de la bioacumulación y toxicidad de cadmio y mercurio en pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*). *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, XVVII(1), 45-49.
- Azpilicueta, C., Pena, L., & Gallego, S. (2010). Los metales y las plantas: entre la nutrición y la toxicidad. *Ciencia Hoy XX(116)*, 13-16.
- Bautista Zuñiga, F. (2002). Introducción al estudio de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados. *UNAM*, 99.
- Bautista, C., & Arnaud, V. (2006). Elementos potencialmente tóxicos en suelos agrícolas con manejo de riesgo contaminante. *Naturaleza y Desarrollo*, 36-42.
- Behrendt, T. (1997). Detection of anthropogenic trends in time series loads using Windows of discharge and long-term means. *ICES*, 20-29.
- Bhargave, A., Carmona, F., Bhargava, M., & Srivastava, S. (2012). *Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals*. Journal.
- Cañizares Villanueva, R. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa. *Latinoamericana de Microbiología*, 131-143.
- Cañizares Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa. *Latinoamericana de Microbiología*, 131-143.
- Carpena, R., & Pilar Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Revista Ecosistemas XVI(2)*, 1-3.
- CONABIO. (2009). *Catálogo taxonómico de especies de Mexico*. Mexico: CONABIO.
- Dekov, V., Araujo, F. V., & Subramanian, V. (1998). Chemical composition of sediments and suspended matter from the Cauvery and Brahmaputra rivers (India). *The Science of the Total Environment*, 89-105.

- Dekov, V., Araujo, F., Van Grieken, R., & Subramanian, V. (1998). Chemical composition of sediments and suspended matter from the Cauvery and Brahmaputra rivers. *The science of the total environment*, 89-105.
- Delgadillo López, A. E., González Ramírez, C. A., Prieto Garcia, F., Villagómez Ibarra, J. R., & Acevedo Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems XIV(1)*, 597-612.
- Delgado Rodriguez, J. M. (2012). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca baja del rio Guadiana. *Geología IV (3)*, 50-62.
- Diez Lazaro, F. J. (2008). *Fitocorrección de Suelos: Evaluación de Plantas Tolerantes y Optimización*.
- Felder, R., & Moser., M. B. (1985). *People of the desert and sea: ethnobotany of the Seri Indians*. Tucson: University of Arizona Press.
- Fernandez, J., Ruiz, F., & Galan, E. (1997). Clay mineral and heavy metal distributions in the lower estuary of Huelva and Atlantic shelf, SW Spain. *The Science of the Total Environment 198*, 181-200.
- Forstner, U. (1983). *Assessment of metal pollution in rivers and estuaries*. London: Academic Press.
- Forstner, U., & Wittmann, G. (1981). *Heavy metal pollution in the aquatic environment*. New York: Springer-Verlag .
- Forstner, U., Ahlf, W., Calmano, W., & Kersten, M. (1990). Sediment criteria development. In: Heling D, Rothe P, Forstner U, and Stoffers (Eds), *Sediment and environmental Geochemistry*. Berlin:Springer-Verlag, 311-338.
- Garbarino, J., Hayes, H., Roth, D., Antweider, R., Brinton, T., & Taylor, H. (1995). *Contaminants in the Mississippi River, U.S. Mississippi : Geological*.
- Garbisu, C., Epelde, L., & Becerril, J. M. (2008). Fitorremediación. *El Ecologista n° 57*, 57.
- García Rico, L., Robles Burgueño, M., & Valenzuela Soto, E. M. (1999). Las matalotioneinas y su relacion con la toxicidad del Cadmio en los mamiferos. *Rev. Int. Contam. Ambient XV (2)*, 113-120.
- Geesey, G., Borstad, L., & Chapman, P. (1984). Influence of flow-related events on concentration and phase distribution of metals in the lower Fraser River and a small tributary stream in British Columbia, Canada. *Water Resuors*, 233-238.

- Guadarrama Brito, M., & Galván Fernández, A. (2015). Impacto del uso de agua residual en la agricultura . *Revista Iberoamericana de las ciencias Biológicas y Agropecuarias*, IV, 7.
- Habashi, F. (1992). Progress and Problems, Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production. *Environmental Issues in the Metallurgical Industry*, 1143-1153.
- Hickman, J. C. (1993). *Higher Pl.* Berkeley : University of California Press.
- Kabata, P. (2000). *Trace elements in soils and plants*. USA: CRC Press Inc .
- Kantor, D. (2006). The Medical Encyclopedia, National Library of Medicine and National Institute of Health. *Guillain Barre*, 89.
- Kidd, P., Becerra Castro, C., & Garcia Lestón, M. (2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. *Revista Ecosistemas XVI(2)*, 26-43.
- Koivusalo, M., & Vartiainen, T. (1997). Drinking water chlorination by-products and cancer. *Environ Health*, 81-90.
- Lázaro, R., Herrera, A., Ariño, A., Conchello, M., & Bayarri, S. (1996). Organochlorine pesticide residues in total diet samples from Aragon (Northeastern Spain). *J Agric Food Chem*, 42-47.
- Lenntech, B. (2015). *Lenntech*, Recuperado el 2 de julio del 2016, de <http://www.lenntech.es>.
- León Morale, J., & Sepúlveda Jiménez, G. (2012). El daño por oxidación causado por cobre y la respuesta antioxidante de las plantas. *Interciencia XXXVIII (11)* , 805-811.
- Llugany, M., Tolra, R., Poschnrieder, C., & Barceló, J. (2007). Hiperacumulacion de metales: ¿ una ventaja para la planta y para el hombre ? *Revista ecosistemas, XV1(2)*, 4-9.
- Lucho, C. A. (2005). *A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater*. Mexico: Environmental International.
- Manahan, S. (2005). Introducción a la Química Ambiental. *España*, 698.
- Mancilla Villa, Ó., Ortega Escobar, H., Ramírez Ayala, C., Uscanga Mortera, E., Ramos Bello, R., & Reyes Ortigonza, A. (2012). Metales pesados totales y arsenico en el agua para riego de Puebla y Veracruz . *Rev. Int. Contam. Ambie.*, XXVIII(1), 39-48.
- Marín Guirao, L. (2007). Aproximación ecotoxicológica a la contaminación por metales pesados en la laguna contera del Mar Menor. *Biología III (2)*, 2.

- Marmioli, N., & Monciardini, P. (1999). Thematic network devoted to scientific, economical, environmental and social aspects of phytoremediation. *Phytonet*, 125-138.
- Martí, L., Filippini, M. F., Salcedo, C., Drovandi, A., Trolio, S., & Valdés, A. (2011). Evaluación de metales pesados en suelos de los oasis irrigados de la Provincia de Mendoza: Concentraciones totales de Zn, Pb, Cd y Cu. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, XLIII (11), 203-221.
- Martínez, F. d. (2011). *Fitorremediación de suelos de suelos contaminados con metales pesados*. Turreon.
- Mead, M. N. (2011). Confusión por el Cadmio ¿Los consumidores necesitan protección? *Salud Pública de México*, 178-186.
- Meybeck, M. (1982). Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *Journal Science*, 401-450.
- Moalla, S., Awadallah, R., Rashed, M., & Soltan, M. (1998). Distribution and chemical fractionation of some heavy metals in bottom sediments of Lake Nasser. *Hydrobiologia* 364, 31-40.
- Murray, C., & Spiegel, S. (1983). Bioaccumulation and toxicity of heavy metals and related trace elements. *J Water Control Fed*, 816-822.
- Nakeno, V., & Avila Campo, M. J. (2006). *Metales Pesados: Un Peligro Eminente*. Sap Paulo: Departamento de Microbiologia Universidad de San Paulo.
- Nasreddine, L., & Parent-Massin, D. (2002). Food contamination by metals and pesticides in the European Union. *Should we worry ?*, 29-41.
- NOM-127-SSA1-1994. (s.f.). *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, limites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. (s.f.). *Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y/o Vanalio*.
- NOM-185-SSA1-2002. (s.f.). *Productos y servicios, mantequilla, cremas, producto lácteo condensado azucarado, productos lácteos fermentados y acidificados, dulces a base de leche. Especificaciones sanitarias*.
- NOM-243-SSA1-2010. (s.f.). *Productos y servicios. Leche, fórmula láctea, productos combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Metodos de prueba*.

- NOM-247-SSA1-2008. (s.f.). *Esta Norma Oficial Mexicana establece las disposiciones y especificaciones sanitarias que deben cumplir el transporte y almacenamiento de cereales destinados para consumo humano, así como el proceso de las harinas de cereales, sémolas o semolinas, aliment.*
- Ortega Garcia, J., Feris Tortajada, J., López Andreu, J., Garcia Castell, J., Canovas Conesa, A., & Berbel Tornero, O. (2001). El pediatra y la incineración de residuos sólidos. Conceptos Basicos y efectos adversos en la salud humana. *Esp Pediatra* , 473-490.
- Peplow, D. (1999). *Environmental Impacts of Mining in Eastern Washington, Center for Water and Watersshed Studies Fact Sheet.* Washington: Seattle.
- Pernía, B., de Sousa, A., Reyes, R., & Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por Cadmio en las plantas. *Interciencia XXXIII (2)*, 112-119.
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C., Román Gutiérrez, A., & Prieto Garcia, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 29-44.
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., & Prieto Garcia, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, X (1), 29-44.
- PROCOBRE. (2010). *Cobre: Salud, medio ambiente y nuevas tecnologías* . Santiago de Chile: Cooper Cunnects Life.
- Purves, D. (1985). Trace element contamination of the environment . *Elsevier*, 260.
- Rajkumar, M., Ae, N., Vara, M., & Freitas, H. (2010). *Potential of siderophore producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction.* Trends in Biotechnology.
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del Cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina LXIII (1)*, 51-64.
- Raymond, M., Janice, B., & Tony, B. (1995). *Sonoran desert planst: an ecological atlas.* Tucson: University of Arizona.
- Rodríguez Serrano, M., Martínez de la Casa, N., Romero Puertas, M., del Rio, L., & Sandalio, L. (2008). Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Revista Ecosistemas XVII (3)*, 139-146.
- Rovira, J. (1993). Estudio de la contaminación por metales pesados del Rio Jarama. *Tesis Doctoral*, 360.

- Salomons, W., & Forstner, U. (1995). Heavy metals. Problems and solution . *Spring-Verlag Berlin Heideiberg*, 412.
- Salt, D., Smith, R., & Raskin, I. (1998). Phytoremediation . *Plant Physiol*, 49.
- SEMARNAT. (2010). *Programa para mejorar la calidad del aire en la región de la Comarca Lagunera 2010-2015*. desde:
<http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/Calidad%20del%20aire/Proaires/ProAires_Vigentes/9_ProAire%20Comarca%20Lagunera%202010-2015.pdf> [Consulta 15 de enero del 2017].
- Sharapin, N. (2000). Fundamentos de la tecnología de productos fitoterapeúticos. *Colombia*, 251.
- Sun, Z., Lu, P., Gail, M., Pee, D., Zhang, Q., & Ming, L. (1999). Increased risk of hepatocellular carcinoma in male hepatitis B surface antigen carriers with chronic hepatitis who have detectable urinary aflatoxin metabolite M1. *Hepatology*, 379-383.
- Tamariz, J. (1996). *Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el municipio de Atlixco, Puebla*. Estado de Mexico: Mexico.
- Trueby, P. (2003). *Impact of Heavy Metals On Forest Trees From Mining Areas*. Ontario, Canada: Sudbury.
- Turner, E., & Burgess., T. L. (1995). *Sonoran desert plants: an ecological atlas*. Tucson: University of Arizona Press.
- Vanek, T., & Schwitzguebel, J. (2003). *Plant biotechnology for the removal of organic pollutants and toxic metals from wastewaters and contaminated soils*. Praga.
- Vink, R., Behrendt, H., & Salomons, W. (1999). Development of the heavy metal pollution trends in several European rivers: an analysis of point diffuse sources. *Water Science Technology*, 215-223.
- Vogel, k., Simcic, J., Pelicon, P., Budnar, M., Kump, P., Necemer, M., . . . Regvar, M. (2008). *Comparasion of essential and nonessential element distribution in leaves of the Cd/Zn hyperaccumulator Thlaspi praecox as revealed by micro-PIXE*. Cell and Environment.
- Vullo, D. (2003). Microorganismos y metales pesados; Una interacción en beneficio del medio ambiente. *Quimica Viva*, II (3).
- Wendy, S. G., Ronald, F. C., & Dora, T. A. (2016). Tolerancia y Capacidad de Fitorremediación de Combustelo . *Rev. Int. Contam. Ambient.* 22 (2), 63-73.

Zavala, L. A. (2008). *Fitorremediación de suelo contaminado por Pb y Zn mediante la especie vegetal Nicotiana glauca G. Torreon* .

Zuñiga, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Merida: UADY.