

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAL DEL SUELO



Fitoextracción de cadmio y plomo utilizando quelite (*Amaranthus hybridus L.*) y cinco agentes quelatantes

Por:

KARINA GUERRERO MATA

TESIS:

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Fitoextracción de cadmio y plomo utilizando quelite (*Amaranthus hybridus L.*) y cinco agentes quelatantes

Por:

KARINA GUERRERO MATA

TESIS:

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito para obtener el título de:

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

Aprobado por:

Idalia HdzT.

MC. Idalia María Hernández Torres
Coasesor

Edmundo Peña C.

Dr. Edmundo Peña Cervantes
Asesor Principal

Fidel Maximiano Peña Ramos

MC. Fidel Maximiano Peña Ramos
Coasesor

Rubén López Cervantes

Dr. Rubén López Cervantes
Coasesor suplente

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"

Luis Samaniego Moreno

Dr. Luis Samaniego Moreno
Coordinador de División de Ingeniería



Coordinación de
Ingeniería
Noviembre 2015

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México

INDICE

INDICE	i
INDICE DE FIGURAS	ii
INDICE DE CUADROS	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA.....	iv
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVO	4
HIPOTESIS	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Contaminación de suelos.....	4
Metales pesados.....	6
Contaminación de suelos por metales pesados	6
Contaminación por Cd	9
Contaminación por Pb	10
Fitorremediación	10
Fitoextracción	14
Fitoextracción de metales pesados	16
Quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i>	17
Quelatos	20
MATERIALES Y METODOS.....	21
Establecimiento del experimento	21
Metodología	22
Diseño experimental	24
RESULTADOS.....	24
Primer corte	27
Segundo corte	31
Tercer corte	36
Comparación con tres métodos para las medias. para cadmio y plomo en los cortes uno y dos.	40

CONCLUSIÓN	46
BIBLIOGRAFIA	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999 (PROFEPA, 2002).	5
Figura 2. Mecanismos de fitorremediación.	12
Figura 3. Mecanismo de la fitoextracción	15
Figura 4. Fisiología de la especie <i>Amaranthus hybridus L.</i>	19
Figura 5. Localización del área del experimento	22
Figura 6. Fitoextracción de plomo con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	27
Figura 7. Fitoextracción de cadmio con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	28
Figura 8. Contenido de cobre en la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	29
Figura 9. Contenido de fierro en la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	30
Figura 10. Contenido de zinc en la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	31
Figura 11. Contenido de plomo de la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	32
Figura 12. Contenido de cadmio en la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	33
Figura 13. Contenido de cobre en la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agente quelatantes.....	34
Figura 14. Contenido de fierro en la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	35
Figura 15. Contenido de zinc en la fitoextracción con quelite <i>Amaranthus hybridus L.</i> y cinco agentes quelatantes.....	36

Figura 16. Contenido de Plomo en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes.....	37
Figura 17. Contenido de Cadmio en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes.....	38
Figura 18. Contenido de cobre en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes.....	38
Figura 19. Contenido de fierro en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes.....	39
Figura 20. Contenido de zinc en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes.....	40
Figura 21. Comparación de medias para plomo con los métodos DMS, Duncan y Tukey	43
Figura 22. Comparación de medias para cadmio con los métodos DMS, Duncan y Tukey	44
Figura 23. Comparación de medias para plomo con los métodos DMS, Duncan y Tukey	45
Figura 24. Comparación de medias para cadmio con los métodos DMS, Duncan y Tukey	45

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límite máximos permisibles de diferentes elementos contaminantes en el suelo (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)	9
Cuadro 2. Características del suelo utilizado	22
Cuadro 3. Valores promedios de fitoextracción de Pb, Cd, Cu, Fe y Zn por quelite y un pasto	25

AGRADECIMIENTO

En este presente trabajo principalmente agradezco a **Dios**, te estoy muy agradecida por la vida y las bendiciones que me otorgas a mí y a mi familia, por haberme permitido lograr este gran sueño, por bendecirme con tantas cosas y por haberme puesto en el camino de tantas personas tan especiales.

A mi **Alma Mater** por brindarme la oportunidad de crecer como profesional, por esta gran casa de estudios que ha formado a muchas personas, y nos ha dado las herramientas para ser cada día mejores. Buitres por siempre.

A mi asesor el **Dr. Edmundo Peña Cervantes**, le agradezco su apoyo en este proyecto, por las aportaciones tan valiosas que hizo en mi trabajo, y por estar ahí en todo momento.

A la **MC. Idalia María Hernández Torres**, por su interés en mi trabajo, y por formar parte de este proyecto.

Al **MC. Fidel Maximiano Peña Ramos**, por su gran apoyo en mi proyecto, por el tiempo dedicado y las aportaciones tan valiosas para mi trabajo.

A la **MC. Alejandra Escobar Sánchez**, por tanto apoyo que me ofreció durante toda la carrera y por ser como una amiga.

Al **Dr. José de Jesús Rodríguez Sahagún**, por el apoyo que me brindo, por estar siempre al pendiente, y por sus consejos.

A mis compañeros y a los amigos que encontré en algunos de ellos, por compartir conmigo la gran experiencia de ser parte de esta gran casa de estudios.

DEDICATORIA

Nuevamente a ti **Dios**, por siempre bendecirme, te dedico y comparto este logro.

A ti **Madre**, por el apoyo incondicional, que siempre me has dado, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, por haberme formado como una mujer de bien, sabiendo que no existiría una forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, te dedico este gran logro, sin tu apoyo no lo hubiese logrado, no me alcanzarán las palabras para agradecerte.

A mis hermanos; **Ale**, que siempre me estuvo apoyando, me permitió compartir con él este sueño, y nunca me dejó de apoyar por ninguna circunstancia, a **Checo**, que muy a nuestra manera, estaremos apoyándonos y dándonos consejos.

Porque hay ángeles que llegan a nuestras vidas para quedarse, a la familia **Jacobo Morales** por el cariño y apoyo incondicional que me brindaron, y además por los grandes amigos que encontré en ellos. Les agradezco y dedico esta parte de mi vida.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la capacidad hiperacumuladora del quelite *Amaranthus hybridus L.* para la fitoextracción de metales pesados y se aplicaron 5 g diluido en 100 ml de agua de los quelatos; Ácido Fúlvico, CuEDTA, EDTA, FeEDDHA, ZnEDTA y un testigo absoluto que solo se le aplicó agua, en la fitoextracción de los metales cadmio y plomo de un suelo contaminado. La fitoextracción, es una tecnología biológica utilizada para la restauración de los suelos contaminados con metales pesados mediante el uso de especies de un grupo de plantas denominadas como “plantas hiperacumuladoras”. Para este proyecto se contaminó el suelo con 100 mg kg⁻¹ de cadmio y el suelo ya estaba contaminado con plomo 1200 mg kg⁻¹. La Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, establece los límites para plomo 400 mg kg⁻¹ para uso agrícola, residencial o comercial, y cadmio 37 mg kg⁻¹ para uso agrícola, residencial o comercial. Se utilizó un suelo con un pH de 7.5, su textura es migajón arcilloso y el contenido de Materia orgánica del cinco por ciento. El suelo se colocó en contenedores de polietileno de 5 kilogramos bajo condiciones de invernadero.

Se realizaron dos evaluaciones de la parte foliar de la planta, en la primera evaluación el mejor resultado fue del tratamiento EDTA para los dos metales, cadmio con 121.2 mg kg⁻¹ y plomo con 306.25 mg kg⁻¹ y en la segunda evaluación los tratamientos más efectivos fueron, del ZnEDTA para cadmio con 92.5 mg kg⁻¹ y el testigo para el plomo con 92.5 mg kg⁻¹. Para la digestión de la muestra, se empleó un digestor a base de microondas MARS 6 ONE TOUCH y para determinar su concentración de los elementos químicos, un espectrofotómetro de absorción atómica SpectrAA VARIAN 5.

Palabras clave: Fitoextracción, *Amaranthus hybridus L.*, metales pesados, quelato

Correo Electronico; Karina Guerrero Mata, guerrero.mata@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En México existe actualmente una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos. (Volke 2002).

Los metales pesados como arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo, 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. Además, la inadecuada disposición de residuos metálicos también ha ocasionado la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea y de ambientes acuáticos. (SEMARNAT, 2009)

El impacto ambiental causado por la contaminación por metales, depende de la capacidad de acomplejamiento de estos con el suelo y agua, así como de las condiciones fisicoquímicas y biológicas del entorno, los cuales pueden cambiar el estado de oxidación de los metales. El cambio de estado de oxidación y el pH pueden incrementar o disminuir el riesgo potencial de biodisponibilidad de un metal en el suelo. En el caso particular de los suelos, si los metales se encuentran biodisponibles, pueden afectar la fertilidad y/o uso posterior de los mismos, mientras que en el caso de cuerpos de agua, pueden afectar seriamente el uso para el consumo humano (USEPA, 2001).

Para limpiar suelos contaminados hay tecnologías costosas como la excavación, la biorremediación, la incineración y el lavado. La fitorremediación es parte de la biotecnología de biorremediación, esta es una alternativa donde se usa plantas y la asociación microorganismo-raíz para remover o contener contaminantes en el suelo (Cunningham et al., 1996). En suelos moderadamente contaminados, la fitorremediación tiene bajo costo en comparación con técnicas físicas y químicas.

Clemente et al., (2005) señalan que la fitorrecuperación es una técnica emergente que utiliza la capacidad de ciertas especies vegetales para sobrevivir en ambientes contaminados con metales pesados y sustancias orgánicas y a la vez extraer, acumular, inmovilizar o transformar estos contaminantes del suelo. Las plantas utilizadas en la fitorrecuperación presentan mecanismos constitutivos y adaptados para tolerar o acumular un elevado contenido de metales en su rizosfera y en sus tejidos. El éxito de este tratamiento está controlado por la selección de las especies vegetales adecuadas para recuperar un suelo determinado, así como de la cuidada selección de enmiendas (materia orgánica, agentes quelatantes, cal, etc.) que permitan mejorar las propiedades del suelo y fomenten la supervivencia y el crecimiento de las plantas.

Esta tecnología, es un procedimiento que no perturba en gran medida el suelo o el paisaje, de bajo costo y fácil aplicación, aunque presenta inconvenientes como que es un proceso lento, está limitado a suelos poco profundos, en ocasiones las elevadas concentraciones de contaminantes pueden ser tóxicas para las plantas y requiere una buena gestión de la biomasa resultante para impedir que los contaminantes entren en la cadena trófica (Ortiz, et al. 2007).

La fitorrecuperación es un tratamiento natural, limpio y económico, alternativo a otros procesos físicos y químicos más invasivos. De acuerdo con Wenzel et al. (1999), se pueden distinguir cinco procesos básicos de contención (fitoestabilización o fitoinmovilización) o eliminación (fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y rizofiltración) de contaminantes por los que las plantas pueden ser empleadas en la recuperación de suelos y aguas contaminadas.

En el presente trabajo se decidió evaluar el proceso de fitoextracción de metales pesados utilizando una planta nativa, considerada en muchos casos como maleza, (*Amaranthus hybridus L.*), utilizando como agentes quelatantes el EDTA, FeEDDHA, CuEDTA, ZnEDTA y el Ácido fúlvico.

OBJETIVO

Evaluar la capacidad del quelite *Amaranthus hybridus L.* en la fitoextracción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) con la ayuda de cinco agentes quelatantes.

Evaluar los quelatos aplicados, para definir cuál es el que tiene mejores resultados en la fitoextracción de los metales.

HIPOTESIS

La planta de quelite *Amaranthus hybridus L.* tiene propiedades extractoras de los metales cadmio y plomo y al menos un agente quelatante, tiene efectos positivo en la fitoextracción.

REVISIÓN DE LITERATURA

Contaminación de suelos

La presencia en los suelos de concentraciones nocivas de algunos elementos químicos y compuestos se les denomina contaminación. Un contaminante químico se encuentra en una determinada concentración y esta biodisponible, siendo capaz de producir efectos adversos a corto y/o largo plazo para los seres vivos expuestos; sus características principales están asociadas con su concentración, persistencia y duración a la exposición. Entre los principales grupos contaminantes están los metales pesados o elementos potencialmente tóxicos, biosidas, hidrocarburos y contaminantes orgánicos, entre otros (Pérez, 2014).

González (2006), menciona que se entiende por suelo contaminado una porción delimitada de terreno (superficial o subterráneo) cuyas cualidades originales han sido modificadas por la acción humana al incorporarse algún factor que según la clasificación de agentes contaminantes podría ser: Contaminación física: Con variaciones en parámetros como temperatura y radiactividad. Contaminación biológica: Al incluir putrefacción de especies o cepos patógenos. Contaminación

química: Por la adición de elementos o compuestos en concentraciones que alteran la composición originaria del suelo.

El INE (2007) publica que todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el medio ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en las emergencias ambientales, se encuentra el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diésel), agroquímicos, gas LP y natural, entre otros (Figura 1).

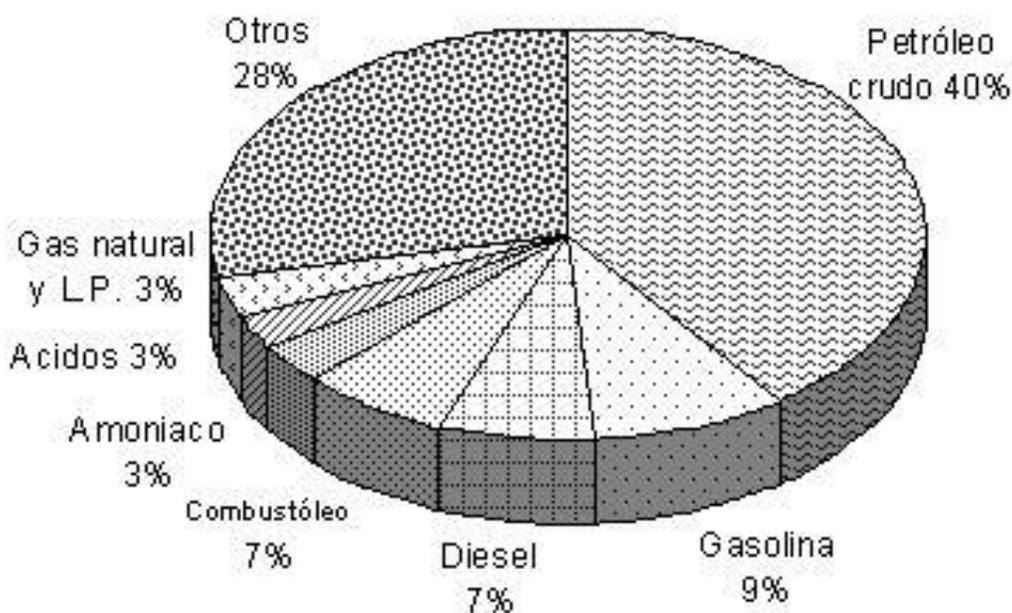


Figura 1. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999 (PROFEPA, 2002).

El criterio para establecer el umbral máximo de concentración para posibles agentes contaminantes de los suelos debe ser su capacidad para degradar la calidad

del mismo al perder características originales generándose por tanto un riesgo o daño al medio ambiente.

Metales pesados

Los metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Los más importantes son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn). Metales tóxicos son aquellos cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas. Los términos metales pesados y metales tóxicos se usan como sinónimos pero sólo algunos de ellos pertenecen a ambos grupos.

Contaminación de suelos por metales pesados

Los metales pesados están conformados por 38 elementos, pero generalmente son 12 los utilizados más comúnmente y descargados, como parte de una serie de residuos, al medio ambiente: Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn y Zn (US EPA, 1997). Dos de los encontrados con más frecuencia en las zonas mineras del país son el arsénico y junto con el cadmio en algunas de ellas (SEMARNAP, 2000).

Galán y Romero (2008) comentan que los metales pesados, y en general los elementos traza, están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg kg^{-1}) en la corteza terrestre, los suelos y las plantas. La presencia de concentraciones nocivas (anomalías) en los suelos es una degradación especial denominada contaminación. Los elementos traza en los suelos pueden ser de origen geogénico o antropogénico. Los elementos de origen geogénico proceden de la roca madre, de

actividad volcánica, o de la lixiviación de mineralizaciones. Los metales pesados antropogénicos derivan de residuos peligrosos, procedentes de actividades industriales, minería e industria agrícola, y residuos sólidos urbanos. La contaminación del suelo es hoy en día una de los temas ambientales más importantes para la Sociedad y la Administración. La caracterización, evaluación y remediación de un suelo contaminado es uno de los principales retos ambientales por abordar en los próximos años. La peligrosidad de los contaminantes en los suelos viene dada no sólo por su concentración total, sino especialmente por su disponibilidad. La movilidad de los elementos traza depende de su especiación, y también está afectada por diversos parámetros geoedáficos. La biodisponibilidad de los metales desde los suelos a las plantas y otros organismos y el riesgo para la salud siguen siendo cuestiones por resolver.

La mayor atención a este tipo de contaminación se ha dirigido al sector agrícola, donde la contaminación por metales pesados, es provocada por una mala gestión agrícola, vertidos industriales, tráfico pesado, entre otras causas. La valoración de la contaminación del suelo por metales pesados junto con la adopción de valores estándar, es fundamental para mantener las funciones agrícolas y ecológicas de los suelos, llegando a constituirse un indicador de la calidad del suelo, decisivo en relación con los riesgos de toxicidad (Brizuela, 2012).

Trejo (1998) señala que la actividad agrícola, el desarrollo industrial y el crecimiento de la población en zonas urbanas favorecen la acumulación de metales pesados en el medio ambiente. El uso de fertilizantes, la deposición aérea y el riego con aguas de mala calidad pueden incrementar el contenido de metales pesados en los suelos que al no ser degradados química ni biológicamente por la naturaleza, persisten en el medio y pueden acumularse a lo largo de la cadena trófica y, por lo tanto en los cultivos, provocando con ello que la contaminación ambiental se vuelva más grave cada día, teniendo como consecuencia la paulatina degradación química del suelo. Los contenidos de metales pesados en el suelo están relacionados con el

material original y los parámetros edáficos (pH, CaCO_3 , materia orgánica, textura del suelo y la naturaleza de los minerales de las arcillas).

Es importante considerar la contaminación del suelo por metales pesados debido a que la infiltración de los contaminantes puede dirigirse hacia el acuífero y contaminar el agua, así como por los posibles daños que pueden ocasionar a la vegetación del lugar y porque la toxicidad de algunos de ellos puede causar efectos nocivos a la salud. Los suelos contaminados se han visto en incremento en las áreas urbanas en comparación con las rurales, incluso en áreas alejadas a fuentes de contaminación puede existir la probabilidad de ingesta diaria de metales pesados en exceso en niños. (Gonzales *et al.*, 2012)

La Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que 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 vanadio, en el Diario Oficial de la Federación. Determina que los límites para plomo en suelos deben ser, 400 mg kg^{-1} para uso agrícola, residencial o comercial, 800 mg kg^{-1} para uso industrial y cadmio 37 mg kg^{-1} para uso agrícola, residencial o comercial, 450 mg kg^{-1} para uso industrial (Cuadro1).

En concreto, la posibilidad de que un elemento (contaminante o no) quede libre y pase a disolución en un suelo se llama disponibilidad. La biodisponibilidad sería el grado de libertad en que se encuentra un elemento o compuesto de una fuente potencial para ser capturado por un organismo ya sea ingerido o adsorbido (Galán, 2008).

Cuadro 1. Limite máximos permisibles de diferentes elementos contaminantes en el suelo

Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial (mg kg ⁻¹)	Uso industrial (mg kg ⁻¹)
Arsénico	22	260
Bario	5400	67000
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1600	20000
Plata	390	5100
Plomo	400	800
Selenio	390	5100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1000

(NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)

Contaminación por Cd

Una entrada importante de cadmio proviene de la aplicación de fertilizantes de fosfato en el suelo. Doménech (2006) reporta que el cadmio en el suelo es absorbido por las plantas, debido a su semejanza con el zinc, y así ejerce su acción toxica. Cuando entra en el suelo, el cadmio se muestra bastante móvil y se distribuye uniformemente a lo largo del perfil del suelo. Se puede encontrar a distintas profundidades y en distinta forma molecular; a) ocupando sitios de intercambio

catiónico en la fracción arcillosa (silicatos laminares, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, etc.) y húmica, *b*) adsorbido o coprecipitado junto con óxidos e hidróxidos, *c*) precipitado como carbonato en suelos a pH superior a 7, *d*) precipitado como sulfuro en suelos reductores, *e*) adsorbido específicamente al material húmico formando quelatos estables, y, finalmente *f*) en la disolución del suelo en medios neutros-ácidos, formando acuocomplejos o complejos de coordinación con otros aniones, como el ión Cl^- .

Contaminación por Pb

El plomo es un contaminante que se encuentra en distintos medios: la atmósfera, la hidrosfera y los suelos. Aunque el suelo pueda inmovilizarlo en la materia orgánica y la arcilla, si el suelo es ácido puede ser movilizado y pasar a las plantas y de aquí a los humanos. El plomo de los suelos contaminados puede entrar al interior de un organismo por la ingesta directa del suelo, por inhalación de polvo o por las rutas de las cadenas alimentarias. (Escolástico, 2013).

Reportes de la OMS (2015) mencionan que el plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública.

Fitorremediación

La EPA (2010) señala que la fitorremediación es el proceso de utilización de las plantas para la limpieza de contaminación. El Registro de Decisión (ROD por sus siglas en inglés) indica que se usará fitorremediación para la limpieza de zonas de bajos niveles de contaminación. La Explicación de Diferencias Significativas (ESD por sus siglas en inglés) propuesta cambia lo anterior al suprimir el uso de fitorremediación en el sitio. El suelo que tenga una concentración superior a los niveles de limpieza será removido, tratado y tapado en el sitio. Las áreas de donde se extrajo el suelo se llenarán con tierra o relleno limpio. Dado que no se conocen

zonas de suelos, que tengan concentraciones superiores a los niveles de limpieza por encima de 2 pies de profundidad, no será necesario el uso de fitorremediación.

La fitorremediación es el uso de las plantas para eliminar, contener o convertir a no dañinos los contaminantes ambientales. Esta definición aplica a todos los procesos físicos, químicos y biológicos que están influenciados por las plantas y que ayudan en la limpieza de sustancias contaminantes. Las plantas pueden usarse en el sitio de remediación, para mineralizar e inmovilizar los compuestos orgánicos tóxicos en la zona de la raíz y para acumular y concentrar metales y otros compuestos inorgánicos del suelo en los retoños sobre la tierra. (Villas *et al.*, 2004)

Esta tecnología, no solo es usada para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados, sino también en aguas contaminadas.

El término fitorremediación se refiere a una tecnología innovadora que utiliza plantas vivas y los microorganismos asociados a su rizosfera para la remediación *in situ* y *ex situ* de suelos, lodos, sedimentos y aguas contaminados a través de la remoción, degradación o estabilización de los contaminantes. La principal motivación para el desarrollo de este tipo de tecnología es el gran potencial para la remediación de sitios contaminados a bajo costo. (Volke y Trejo, 2005). Esta técnica incluye, básicamente, tres mecanismos: la fitoextracción o fitoacumulación, la fitoestabilización y la fitovolatilización (Figura 2).

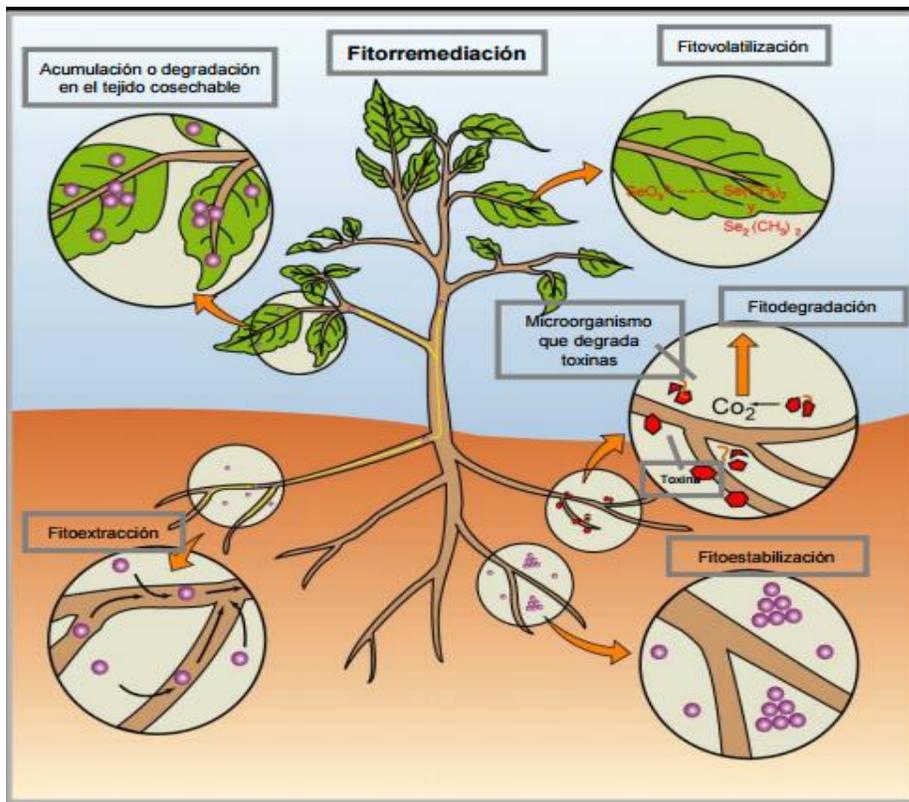


Figura 2. Mecanismos de fitorremediación.

La Fitoestabilización consiste en la reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la revegetación con especies vegetales tolerantes a la toxicidad que inactiven los contaminantes. Por su parte, la Fitoimmobilización provoca la inmovilización y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz que inactiven las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción/adsorción o precipitación.

La Fitoextracción, también llamada fitoacumulación, emplea la capacidad de las plantas para extraer el contaminante, principalmente metales, y acumularlo en sus raíces, tallos u hojas. Una vez terminado el proceso, las plantas son retiradas junto con el contaminante y destruidas o recicladas.

La Fitodegradación consiste en la degradación de los contaminantes por la acción de las plantas y de los microorganismos asociados a ellas. Los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas, como la dehalogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación.

La Fitovolatilización, en la que la planta da lugar a la volatilización de los contaminantes del suelo.

La Rizofiltración, que produce la absorción de metales en aguas contaminadas a través de las raíces de las plantas.

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.

Cortés *et al.* (2006) definen el conjunto de tecnologías que utilizan a las plantas para inmovilizar, destruir o extraer contaminantes, al aprovechar los procesos metabólicos e hidráulicos que, de forma natural, tienen lugar en las plantas superiores.

Mentaberry (2011) menciona que este proceso se basa en los procesos que ocurren naturalmente por los cuales las plantas y los microorganismos rizosféricos degradan y secuestran contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Velasco *et al.* (2009) Señalan que este proceso consiste en cultivar plantas capaces de eliminar tóxicos como metales pesados, plaguicidas, disolventes, derrames de hidrocarburos o lixiviados de vertederos. Las fitotecnologías en la remediación edáfica muestran ciertas limitaciones, como que la concentración de contaminantes sea tolerada por la especie de planta elegida o que solo llega a la profundidad de las raíces de la misma.

Ventajas de la Fitoextracción

- Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas (costo 7-10 veces menor respecto de los métodos tradicionales).

- Las plantas emplean energía solar.
- El tratamiento es in situ.
- Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.
- Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.
- Es una metodología con buena aceptación pública.
- Se generan menos residuos secundarios.

Limitaciones

- El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces.
- La fitotoxicidad es un limitante en áreas fuertemente contaminadas.
- Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.
- La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación.
- Deben considerarse contaminaciones potenciales de la cadena alimentaria y napas de agua.
- Se requiere comprender mejor la naturaleza de los productos de degradación (fitodegradación).

Fitoextracción

Basada en la absorción de contaminantes por las raíces y su posterior translocación al interior de la planta (Figura 3). Actualmente son dos estrategias básicas de fitoextracción que se hayan en estado de desarrollo: la *fitoextracción*

inducida basada en el uso de sustancias quelatantes para facilitar la movilización y posterior absorción, y la *fitoextracción continua* basada en la utilización de plantas hiperacumuladoras y que resulta eficaz en la eliminación de metales. La selección de las plantas se realiza en función de la profundidad que alcanza su zona radicular. Algunas plantas pueden ver ampliado su campo de acción si los exudados radiculares tienen la posibilidad de migrar a horizontes más profundos del suelo. (Elías, 2009)

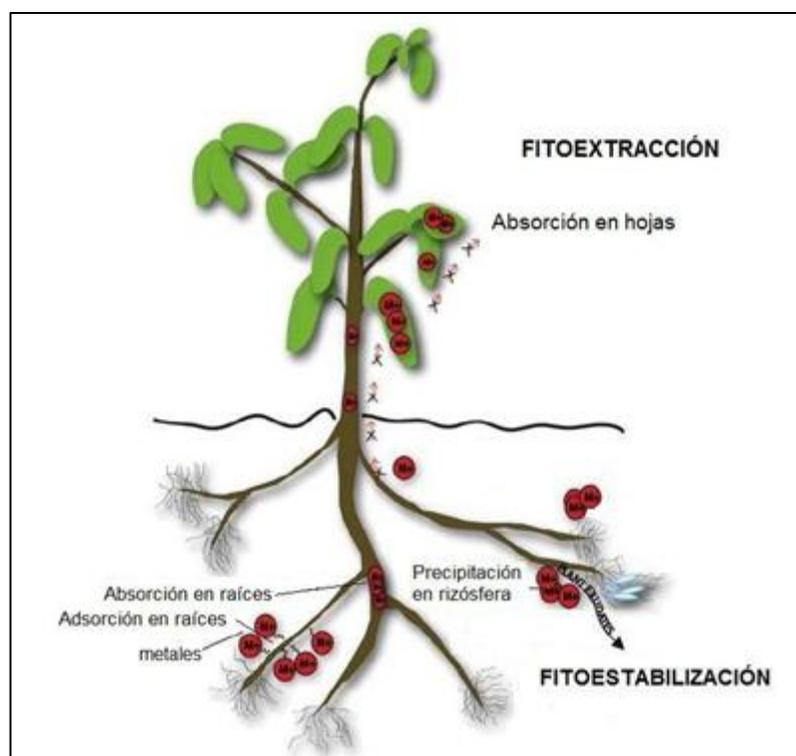


Figura 3. Mecanismo de la fitoextracción

Captación por las raíces: Mentaberry (2011)

- Movilización de los metales
 - Quelatación mediante fitosideróforos
 - Unión a proteínas quelatantes (fitoquelatinas)
 - Acidificación por exudado de H^+

- Captación por la raíz
 - Via apoplástica
 - Vía simplástica

Transporte:

- Almacenamiento en raíz o exportación al tallo por xilema
- Transporte por xilema o redistribución por floema
- Almacenamiento en vacuolas

Mecanismos de evasión o tolerancia:

- Captación celular limitada (evasión)
- Metabolismo tolerante a metales pesados
- Detoxificación por quelatación, compartimentalización o precipitación

Fitoextracción de metales pesados

Los metales en el suelo pueden estar de distintas formas: como iones o complejos insolubles, adsorbidos a constituyentes inorgánicos del suelo o unidos a sitios de intercambio, unidos a moléculas orgánicas, como compuestos o precipitados insolubles (óxidos, carbonatos, hidróxidos), integrados a la estructura de los silicatos (Mentaberry, 2011).

Volke *et al* (2005) reportan que durante este proceso, el contaminante debe encontrarse biodisponible para que la absorción por la raíz pueda ocurrir. La traslocación (movimiento) del contaminante desde la raíz a los brotes de la planta, hace que el tejido pueda cultivarse fácilmente y disminuye la exposición de las personas.

Las plantas a utilizar pueden ser plantas hiperacumuladoras, capaces de acumular como mínimo 1000 mg kg^{-1} (en peso seco) del metal o metaloide; plantas que den una gran producción de biomasa, por encima de las 3 toneladas de materia

seca por hectárea y año y que sean fácilmente cosechables; y plantas halófilas, capaces de tolerar y acumular concentraciones importantes de sales, como cloruros de sodio, calcio y/o magnesio. (Cortés *et al.*, 2006)

Las raíces de algunas plantas son capaces de actuar como barreras frente a los metales pesados. En estos casos se produce una acumulación del metal pesado en la corteza de la raíz, puesto que éstos son arrastrados junto con el agua hasta ésta, y ahí quedan detenidos y acumulados. También pueden favorecer reacciones de transformación del contaminante en sustancias químicas menos dañinas, mediante la acción de los organismos o bacterias que viven en las raíces de las plantas.

Villas *et al.* (2004) enfatizan que en la planta, la asimilación de metales ocurre principalmente a través del sistema de raíces, en las cuales se encuentra la mayoría de los mecanismos para prevenir la toxicidad de los metales. El sistema de raíces provee una enorme área superficial que absorbe y acumula el agua y los nutrimentos esenciales para el crecimiento.

Quelite *Amaranthus hybridus* L.

El quintonil es una de las malezas mexicanas más comunes y útiles, también es conocida con diferentes nombres como: bleado (Yucatán); quelite, quelite blanco y quelite de cochino (Coahuila), quiltonil (Hidalgo y México), queltonil, chichimeca, chongo, lepo, mercolina, ses, huisquilite, quelite morado, quelite de puerco (Conabio, 2009).

Lorda (2013) menciona que es una planta naturalizada sobre terrenos nitrogenados, removidos, sobre suelos frescos de huertas y graveras fluviales. Es de origen americano. Es una planta anual de 15-100 cm, erecta. Tallo pubescente en la parte superior. Hojas ovadas, elípticas o romboidales, emarginadas y con un mucrón en el ápice. Flores agrupadas en una inflorescencia terminal densa, verdosa, con el

espicastró terminal similar en longitud a los laterales. Flores con tépalos espatulados, con el ápice obtuso o emarginado; suelen ser mucronados y son más largos que el fruto, que es de tipo pixidio.

Carmona y Orsini (2010), reportan que es una hierba erecta anual de 0,5-1,6 m de alto. Tallo verde o con tonalidades rojizas, esparcidamente viloso a glabro, muy ramificado, estriado. Hojas ovadas, rómbicas a ovado-elípticas, 1-9 cm de largo, 0,6-6 cm de ancho, con tonalidades rojizas o amarillentas, cartáceas, algo coriáceas, esparcidamente vilosas a glabras; pecíolos de 1-7 cm de largo; base obtusa; margen entero a ligeramente crenado; ápice angostamente corto-acuminado. Inflorescencias en espigas terminales y axilares, panículas y glómérulos axilares cortos, verdes, con tonalidades rojizas o totalmente rojas; brácteas ovado-lanceoladas, 2,5-3,5 mm de largo, mayores al tamaño de los sépalos, carinadas, esparcidamente vilosas a glabras, ápice apiculado a pungente y terminando en una arista espinescente con una vena central. Flores masculinas con perianto foliáceo, algo cartáceo, compuesto por 5 sépalos de 1,6-3,1 mm de largo, 0,4-0,9 mm de ancho, desiguales, ovado-espatulados a ovadoacuminados, glabros; ápice aristado. Estambres 5, libres entre sí, en una serie; filamentos homodínamos de 1,2-2,2 mm de largo; anteras paralelas, dehiscencia longitudinal extrorsa. Flores femeninas con perianto escarioso compuesto por 5 sépalos de 2-2,5 mm de largo, 0,5-0,9 mm de ancho, desiguales, ovado-espatulados a lanceolado-elípticos, glabros; ápice agudo a mucronado. Estigmas 3; estilos terminales de 0,4-0,7 mm de largo, separados en la base. Fruto un utrículo subgloboso, 1,5-2 mm de largo, 0,8-1,1 mm de ancho, rugoso, tridentado, corrugado a esponjoso. Semillas de 1-1,3 mm de diámetro, lenticulares en sección transversal, brillantes, marrón a vinotinto (Figura 4).

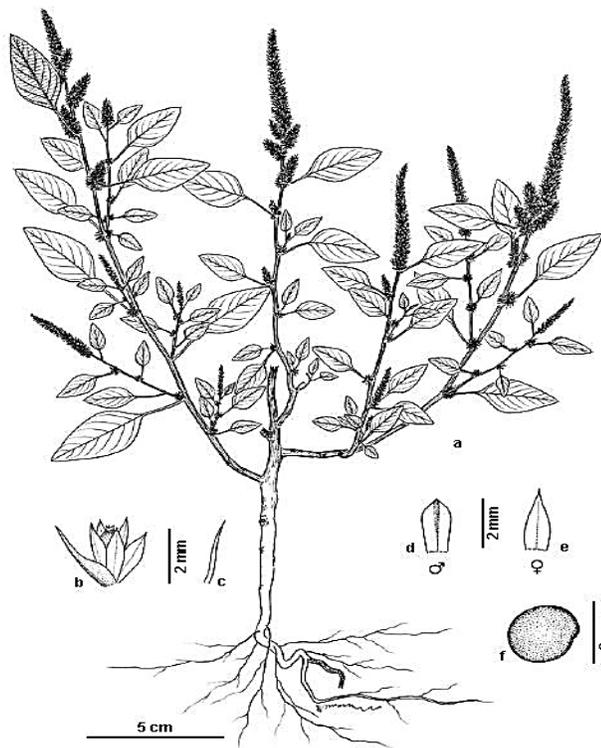


Figura 4. Fisiología de la especie *Amaranthus hybridus* L.

Zhang *et al.* (2010) reportan en su experimento que *A. hybridus* tiene capacidad de fitorremediación potencial en suelos contaminados por metales pesados, realizando el experimento en suelo y en un sistema hidropónico.

Hussein *et al.* (2013), enfatizan en su estudio realizado la capacidad extractora de *A. hybridus* tras el estudio que realizó en la fitorremediación y la acumulación de dieciséis elementos y metales pesados. La comparación de los contenidos de metales en diferentes órganos de la planta que crece en el suelo contaminado mostró valores relativamente más altos en comparación con los que crecen en un suelo no contaminado. Como un ejemplo, el plomo (Pb) concentraciones de las muestras no contaminada *A. hybridus* fueron 12.71, 11.34 y 2.53 (mg kg^{-1}) para la raíz, tallo y hojas; respectivamente, y estos valores cambiaron enormemente con un aumento a 93.9, 96.76 y 64.11 (mg kg^{-1}) para los mismos órganos de la planta, pero que crece en suelo contaminado.

Quelatos

Molina (2003) menciona que los quelatos son sustancias que forman parte de muchos procesos biológicos esenciales en la fisiología de las plantas, como por ejemplo en el transporte de oxígeno y en la fotosíntesis. Muchas enzimas catalizadoras de reacciones químicas son quelatos. Un quelato es un compuesto orgánico de origen natural o sintético, que puede combinarse con un catión metálico y lo acompleja, formando una estructura heterocíclica. Los cationes metálicos son ligados en el centro de la molécula, perdiendo sus características iónicas. El quelato protege al catión de otras reacciones químicas como oxidación-reducción, inmovilización, precipitación, etc. El proceso de quelatación de un catión neutraliza la carga positiva de los metales permitiendo que el complejo formado quede prácticamente de carga 0.

Los quelatos sin catión metálico (es decir, en su forma fundamental) pueden tener un efecto fertilizante del suelo. Forman complejos con metales pesados procedentes de la fracción de reserva, los cuales solo difícilmente pueden ser movilizados por el suelo y las plantas. Los quelatos metálicos son complejos organometálicos, en los que el catión metálico se encuentra unido por varios lados por agentes quelatantes (ligados). Los quelatos metálicos se utilizan como abonos con el objetivo de proteger a los cationes de metales pesados de ser fijados en el suelo, o para facilitar su absorción por las hojas. Las plantas son capaces de absorber los quelatos como moléculas completas y utilizar después el metal en el intercambio químico (Finck, 1988).

Los agentes quelatantes más empleados son los del ácido etilendiaminotetracético (EDTA), siendo muy comunes los quelatos de hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn). El quelato de ion férrico con EDTA es muy estable en soluciones moderadamente ácidas, en soluciones alcalinas es hidrolizado fácilmente a hidróxido férrico y a la sal de EDTA por lo que es inefectivo en suelos calcáreos. Por tanto, se puede emplear si el pH está comprendido entre 1 y 7. El ácido etilendiamino-di(o-hidroxifenil-acético) (EDDHA) es poco efectivo como fuente de

hierro en suelos ácidos, pero es uno de los quelatos más efectivos en suelos calcáreos.

El plomo se encuentra en el suelo principalmente en forma de sales insolubles o fuertemente enlazado a las arcillas, y las plantas no pueden disponer de él fácilmente. Si se añade EDTA al suelo el plomo se solubiliza como Pb(EDTA)^{2-} y puede llegar a las raíces de las plantas. Una desventaja de este método es que si llueve después del tratamiento, el Pb(EDTA)^{2-} puede migrar por el suelo y dispersarse aún más. (Harris, 2007).

Perea *et al* (2010) señalan que la eficacia de un quelato dependerá de la capacidad que tenga de incrementar la solubilización del metal y transportarlo hacia la raíz u hoja de la planta, además de ceder el metal (Fe, Zn, Mn) y de resistir a los factores contrarios como el alto pH, bicarbonato, competencia por otros metales, adsorción sobre los materiales del suelo y resistencia a la degradación de la molécula orgánica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento del experimento

El presente trabajo se realizó en un invernadero del Departamento de Ciencias del Suelo, localizado en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, con las siguientes coordenadas geográficas, 25° 21' 12" de Latitud Norte; 101° 02' 03" de Longitud Oeste y una altitud de 1777 m.s.n.m. Figura 5.



Figura 5. Localización del área del experimento

Metodología

Para este experimento se utilizó la especie vegetal del *Amaranthus hybridus L.* vulgarmente llamado “quintonil” o “quelite de puerco” la recolecta de la semilla se hizo en Doctor Mora, Guanajuato, donde crece entre los cultivos de maíz de temporal (en parcelas de pequeños productores principalmente) en el mes de julio del 2014, se almaceno en bolsas de plástico, para posteriormente sembrarlo. Se utilizó un andosol del estado de Michoacán, las características del suelo se presentan en al cuadro 2, y los tratamientos de: EDTA reactivo puro de laboratorio al 99 %, FeEDDHA al 6.0%, CuEDTA al 14 %, ZnEDTA al 14 % y Acido Fúlvico.

Cuadro 2. Características del suelo utilizado

Parámetro	Resultado	Interpretación
Fierro	36255 mg kg ⁻¹	Contaminado
Zinc	45 mg kg ⁻¹	Contaminado
Conductividad eléctrica	450 μ S ⁻¹	No salino

Materia orgánica	4.4 %	Muy alto
Potencial de hidrogeno pH	6.7	Ligeramente ácido
Plomo	1200 mg kg ⁻¹	Contaminado
Cadmio	100 mg kg ⁻¹	Contaminado
Textura	16% arcilla, 28% limo y 56% arena	Migajón arenoso

De cada uno de los tratamiento y un testigo (solo se aplicó agua) se hicieron cuatro repeticiones teniendo así 24 contenedores de polietileno con aproximadamente cinco kilogramos de suelo cada uno, donde posteriormente se realizó la contaminación del suelo con 100 mg kg⁻¹ de cadmio Cd (NO₃)₂ • 4 H₂O y el suelo ya se encontraba contaminado con plomo 1200 mg kg⁻¹, de acuerdo a la referencia de la Nom.147-Semarnat/ssa1-2004, para la regulación de sitios contaminados este suelo no pueden tener uso agrícola o industrial.

Posteriormente se realizó la siembra del quelite depositando dos semillas por contenedor, a los 51 días de la siembra se aplicaron los quelatos en una solución, disolviendo, 5 g de quelato en 100 ml de agua, aplicando dos veces de 50 ml cada una, la cantidad de quelato que corresponde a una concentración es de 1000 mg kg⁻¹.

Se hicieron dos cortes, el primero a los 107 días después de la siembra, se cortó toda la parte aérea de la planta, después se volvió a sembrar el quelite y se hizo un segundo corte a los 128 días después de la siembra, en esta segunda evaluación, también se cortó la parte aérea de la planta.

Después del segundo corte, se dejaron los contenedores sin eliminar el suelo y se observó el desarrollo en todos los contenedores el pasto Kentucky y con base a esto se tomó una muestra de cada contenedor para analizar los contenidos de cadmio y plomo que pudiera tener con base a las propiedades de extracción del

pasto, esto último se realizó como algo extraordinario y fuera de los objetivos del experimento.

Las variables realizadas fueron el contenido de plomo y cadmio, en el tejido vegetal del follaje, para la elaboración del extracto, se empleó la técnica de digestión vía húmeda para lo cual se pesó 0.5 g de materia seca, se le adicionaron 10 ml de ácido nítrico concentrado y esto se pasó a un digestor de microondas MARS 6 ONE TOUCH y para determinar la cantidad de los elementos químicos, un espectrofotómetro de absorción atómica SpectrAA VARIAN 5.

Diseño experimental

El experimento se estableció con un diseño completamente al azar, seis tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento, a las variables de Pb, Cd, Cu, Fe, Zn se les efectuó análisis de varianza y la prueba de medias con el método de Tukey ($p=0.05$)

A los datos obtenidos se les hizo el análisis de varianza (ANVA) y la comparación de medias, mediante Tukey ($P \leq 0.05$); es decir, al 95 por ciento de confianza; para ello, se empleó el paquete estadístico R. en el corte uno y en la variable fierro del corte tres, la distribución de los datos fue anormal, por lo que se realizaron transformaciones, esto se llevó a cabo, mediante el método de Box-Cox Transformations for Linear Models, los resultados de esta transformación se muestran en el cuadro 3.

RESULTADOS

Enseguida se presentan los resultados obtenidos en el experimento, el cual consistió en evaluar la capacidad de extracción de cadmio y plomo que tiene el quelite *Amaranthus hybridus L.*, con la ayuda de cinco agentes quelatantes.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) en corte 1 mostraron para las variables Pb, Cd y Cu una diferencia significativa ($p<0.05$) entre tratamientos, en

Cuadro 3. Valores promedios de fitoextracción de Pb, Cd, Cu, Fe y Zn por quelite y un pasto

cuanto a Fe y Zn no se presentó diferencia ($p>0.05$), aunque numéricamente el testigo y el tratamiento ZnEDTA presentaron mayor extracción de Fe y Zn.

El ANVA de la variable Zn en el corte 2 presentó diferencia significativa ($p<0.05$) entre tratamientos, sin embargo las variables Pb, Cd, Cu y Fe no mostraron diferencia ($p>0.05$) entre tratamientos. En cuanto al corte 3 el ANVA fue estadísticamente similar al corte 2.

La prueba de media con el método de tukey ($p=0.05$) mostró que estadísticamente el tratamiento EDTA extrajo mayor cantidad de Pb, Cd, Fe y Zn. Sin embargo no fue así para la extracción de Cu en el corte 1 (Cuadro 3). En el corte 2 los tratamientos que aventajaron estadísticamente la extracción de Pb, Cd, Cu, Fe y Zn fueron, EDTA y ZnEDTA. El tratamiento EDTA presentó los valores mayores de extracción de Pb y Cu, mientras que el tratamiento ZnEDTA mostró mayores valores de extracción de Cd y Fe por el cultivo. En el corte 3 el efecto de tratamientos fue estadísticamente similar al corte 2, aunque los valores mayores de extracción de Cd, Fe, Zn y Pb, Fe se obtuvieron con los tratamientos ZnEDTA y FeEDDHA, respectivamente.

En base a los resultados obtenidos los tratamientos testigo, Ac. Fúlvico, EDTA, CuEDTA, ZnEDTA, FeEDDHA, mostraron efectos significativos, siendo los más evidentes EDTA, ZnEDTA y FeEDDHA (Cuadro 3).

Tratamiento	Variable mg kg ⁻¹										
	Pb		Cd		Cu		Fe		Zn		
Corte 1	Testigo	76.25	b	36.25	ab	13.375	b	578.75	a	51.25	a
	Ac. Fúlvico	14.165	b	13.32	b	9.415	b	287.5	a	49.165	a
	FeEDDHA	27.5	b	10	b	12.75	b	380	a	45	a
	ZnEDTA	100	b	62.5	ab	13	b	227.5	a	150	a
	CuEDTA	47.5	b	52.5	ab	89.75	a	162.5	a	45	a
	EDTA	306.25	a	121.2	a	13.875	b	376.25	a	68.75	a
	CV	8.03		5.37		32.13		44.96		32.43	
Corte 2	Testigo	92.5	a	22.5	a	10	a	825	a	67.5	ab
	Ac. Fúlvico	90	a	22.5	a	10	a	975	a	65	b
	FeEDDHA	67.5	a	15	a	15	a	725	a	65	b
	ZnEDTA	80	a	37.5	a	12	a	650	a	82.5	a
	CuEDTA	67.5	a	20	a	20	a	500	a	70	ab
	EDTA	85	a	35	a	20	a	625	a	82.5	a
	CV	22.56		47.51		38.75		43.13		10.46	
Corte 3	Testigo	72.5	a	20	a	0	b	700	a	75	ab
	Ac. Fúlvico	62.5	a	10	a	10	a	425	a	80	ab
	FeEDDHA	90	a	17.5	a	10	a	875	a	77.5	ab
	ZnEDTA	80	a	22.5	a	10	a	750	a	102.5	a
	CuEDTA	60	a	12.5	a	12.5	a	425	a	65	b
	EDTA	52.5	a	12.5	a	10	a	350	a	75	ab
	CV	47.45		57.65		28.84		23.32		15.90	

Primer corte

En la Figura 6, se muestra gráficamente los resultados del primer corte para la determinación del contenido de plomo en la planta, esto nos indica que el tratamiento de EDTA con $306.25 \text{ mg kg}^{-1}$, fue el más efectivo para la fitoextracción del metal. Harris (2007), menciona que el plomo se encuentra en el suelo principalmente en forma de sales insolubles o fuertemente enlazado a las arcillas, y las plantas no pueden disponer de él fácilmente. Si se añade EDTA al suelo el plomo se solubiliza como $\text{Pb}(\text{EDTA})^{2-}$ y puede llegar a las raíces de las plantas. Una desventaja de este método es que si llueve después del tratamiento, el $\text{Pb}(\text{EDTA})^{2-}$ puede migrar por el suelo y dispersarse aún más.

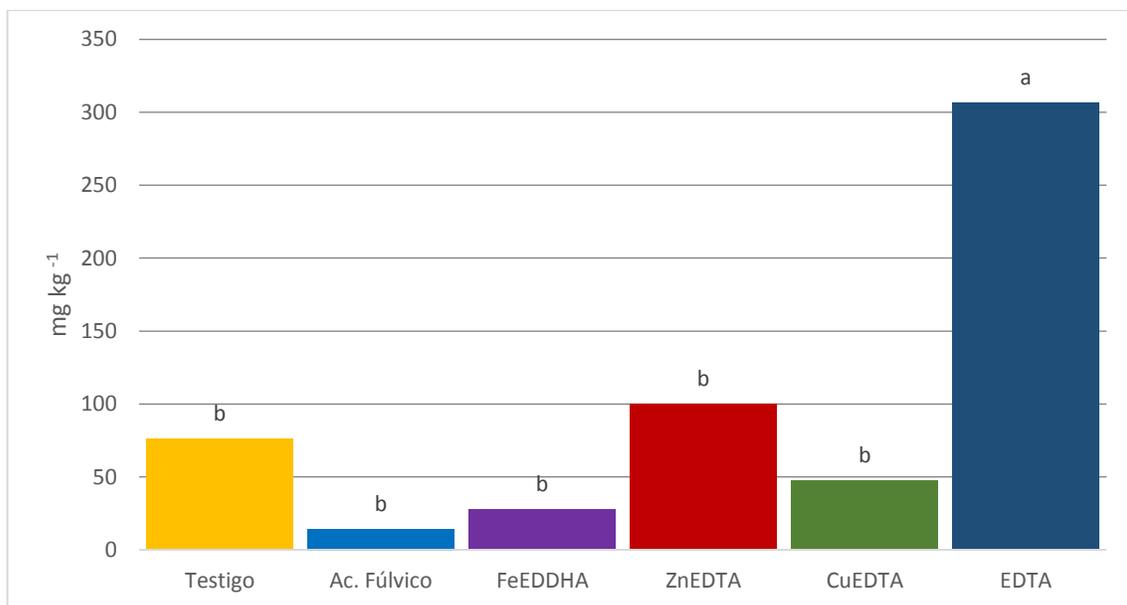


Figura 6. Fitoextracción de plomo con quelite *Amaranthus hybridus L.* y cinco agentes quelatantes

En la fitoextracción de cadmio al igual que en el plomo, el quelato EDTA ha mostrado los mejores resultados entre los tratamientos, con un contenido de 121.2 mg kg^{-1} y la clasificación “a” (Figura 7) en el quelite, ZnEDTA con 62.5 mg kg^{-1} , CuEDTA 52.5 mg kg^{-1} , testigo 36.25 mg kg^{-1} , Ácido fúlvico 13.32 mg kg^{-1} , y el más bajo del FeEDDHA con 10 mg kg^{-1} .

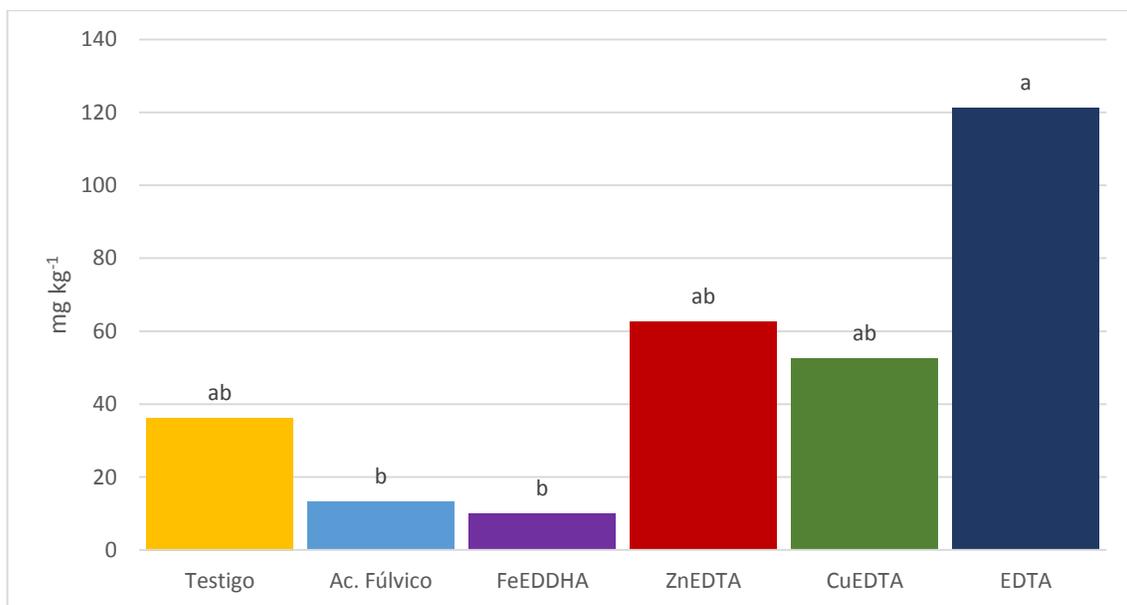


Figura 7. Fitoextracción de cadmio con quelite *Amaranthus hybridus L.* y cinco agentes quelatantes

En la Figura 8, se grafican las diferencias entre las medias, donde, sobre sale el contenido de cobre en el tratamiento CuEDTA con 89.75 mg kg^{-1} , esto nos puede indicar que el suelo no contenía el cobre, y donde se aplicó este elemento obviamente hay más contenido.

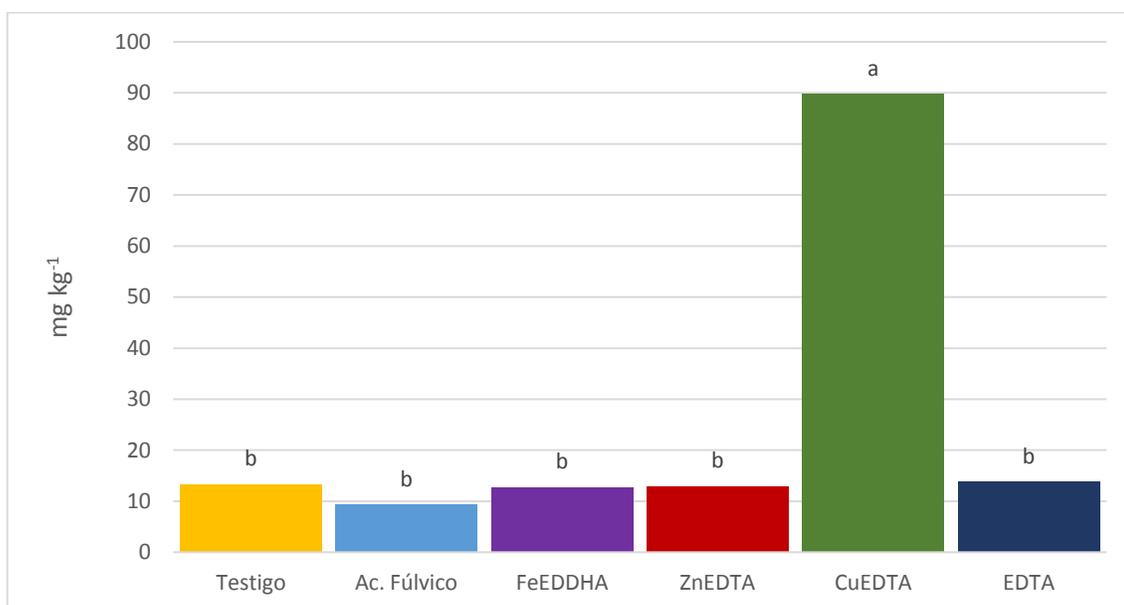


Figura 8. Contenido de cobre en la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L.* y cinco agentes quelatantes

En la Figura 9, se muestra el contenido de hierro en el quelite, donde la mayor concentración de este metal se encuentra en el testigo con $578.75 \text{ mg kg}^{-1}$, el FeEDDHA con 380 mg kg^{-1} , EDTA $376.25 \text{ mg kg}^{-1}$, Ácido fúlvico con 287.5 mg kg^{-1} y ZnEDTA con 227.5 mg kg^{-1} . Cuando una sal de Fe, cualquiera que sea, se encuentra en contacto con el oxígeno del aire, tiende a oxidarse a Fe^{+3} , y al contacto con un medio de pH neutro tiende a precipitarse como hidróxido férrico extremadamente insoluble (Perea et al., 2010).

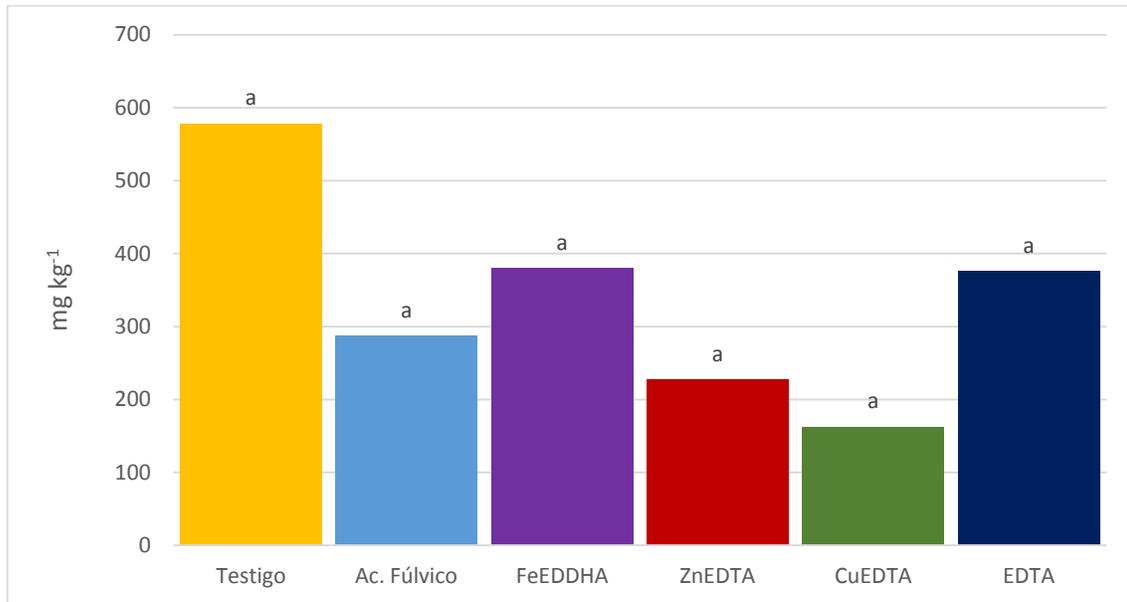


Figura 9. Contenido de fierro en la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L.* y cinco agentes quelatantes

La comparación del contenido de zinc entre medias, como se muestra en la Figura 10, nos indica evidentemente que si hay significancia, aunque la agrupación por el método nos indique lo contrario, el ZnEDTA es el mayor con 150 mg kg⁻¹, comparado con las demás variables EDTA 58.75 mg kg⁻¹, Testigo 51.25 mg kg⁻¹, Ácido Fúlvico 49.16 mg kg⁻¹, CuEDTA y FeEDDHA con 45 mg kg⁻¹.

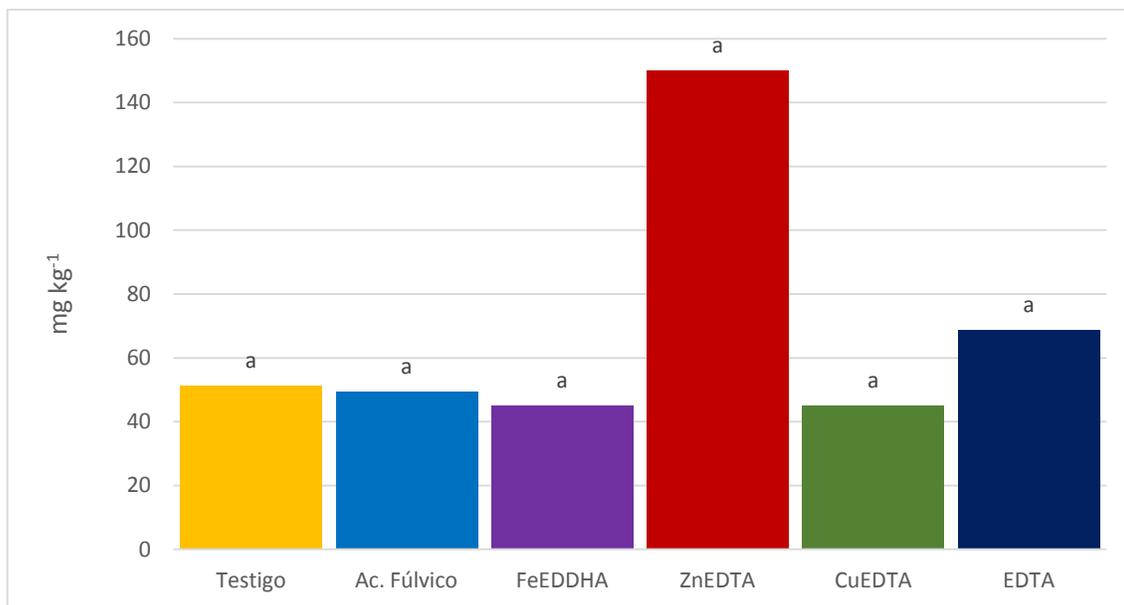


Figura 10. Contenido de zinc en la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L.* y cinco agentes quelatantes

Segundo corte

En la Figura 11, se grafica el contenido de plomo en la planta, en la agrupación muestra que no hay diferencia entre tratamientos, la más alta la tiene el testigo con 92.5 mg kg⁻¹, y las más baja de CuEDTA y FeEDDHA con 67.5 mg kg⁻¹, esto nos indica que la absorción del plomo por el quelite fue más efectiva sin un tratamiento, comparando con el primer corte, en general todos tratamientos aumentan la cantidad extraída, en comparación con el EDTA que disminuye, en la literatura se encuentra que la efectividad de este quelato disminuye a corto plazo, a esto se le puede atribuir que disminuya el contenido de los metales en la planta para esta segunda evaluación.

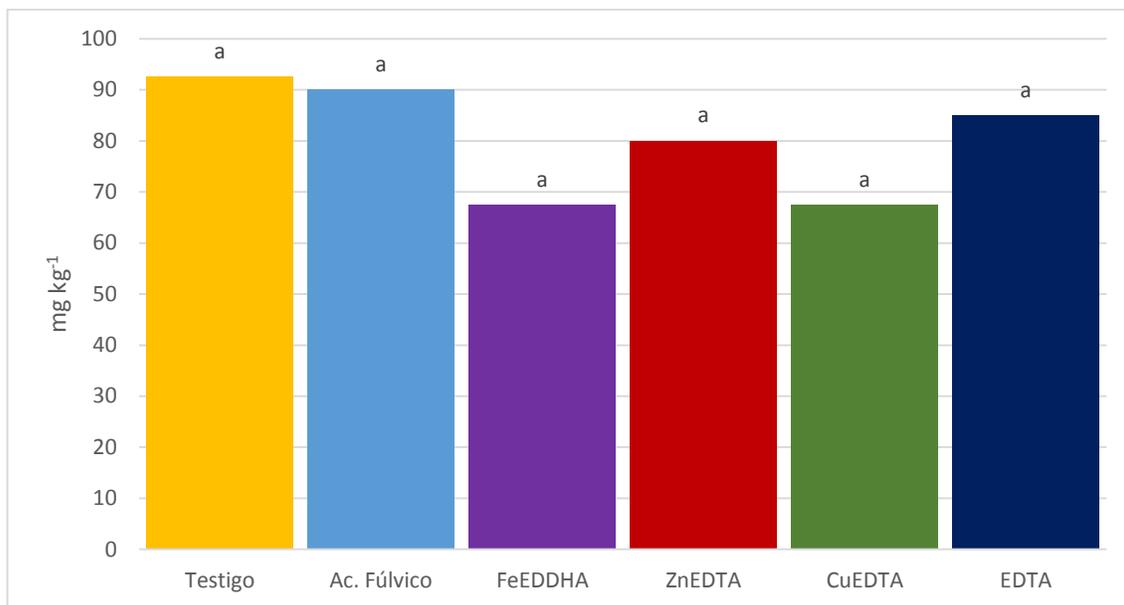


Figura 11. Contenido de plomo de la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L.* y cinco agentes quelatantes

Respecto al contenido de cadmio en la planta la comparación de medias (Figura 12) muestran que no hay diferencia significativa entre los tratamientos, sin embargo los efectos más altos son del ZnEDTA que tiene un valor de 37.5 mg kg⁻¹ y el EDTA 35 mg kg⁻¹, pero el valor más bajo es del FeEDDHA con 15 mg kg⁻¹, aunque los grupos indiquen que no hay diferencia, es notable que el valor más alto es superior por más de la mitad al más bajo.

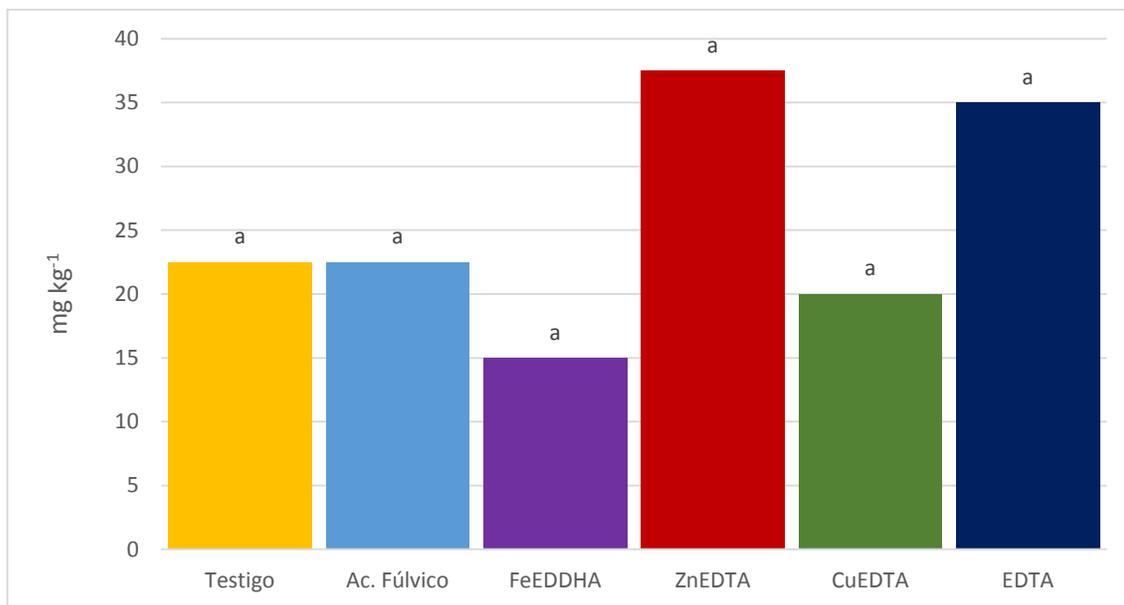


Figura 12. Contenido de cadmio en la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L.* y cinco agentes quelatantes

Para el contenido de cobre en la planta (Figura 13), se muestra que la diferencia entre tratamientos según los grupos es nula, los valores comparados con el primer corte son casi iguales con excepción del CuEDTA que bajo su valor en este corte, sin embargo el valor más alto aun lo tienen el CuEDTA y el EDTA con 20 mg kg⁻¹, FeEDDHA con 15 mg kg⁻¹, ZnEDTA con 12 mg kg⁻¹ y el Ácido Fúlvico y el testigo con 10 mg kg⁻¹.

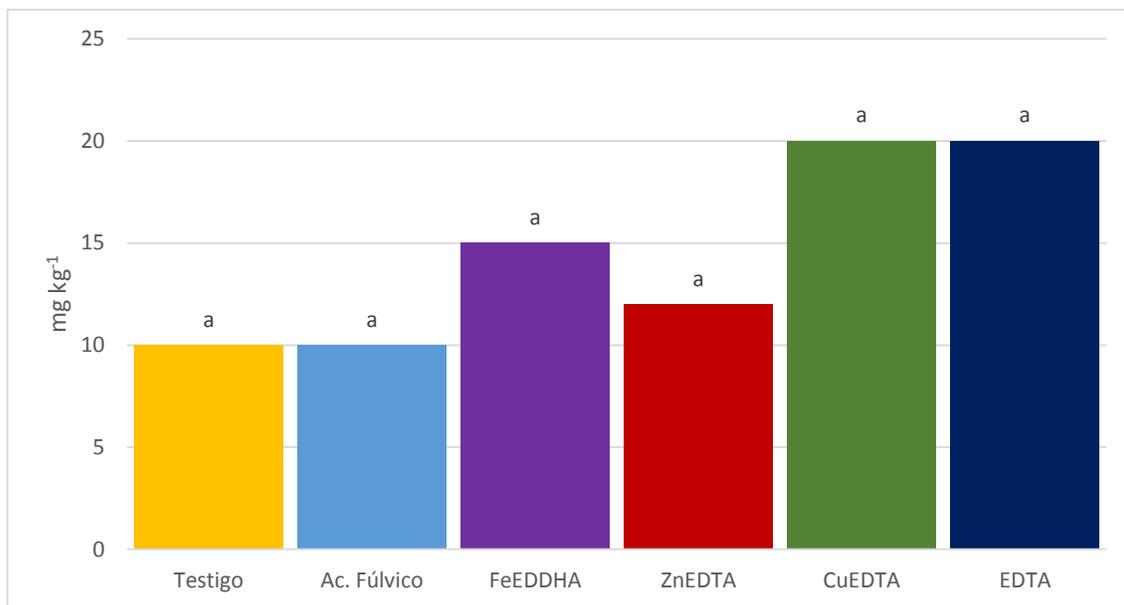


Figura 13. Contenido de cobre en la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L* y cinco agente quelatantes

En la Figura 14, muestra que el tratamiento con mayor cantidad de fierro es el Ácido Fúlvico con 975 mg kg⁻¹, testigo 825 mg kg⁻¹, el FeEDDHA con 725 mg kg⁻¹, ZnEDTA con 650 mg kg⁻¹, EDTA con 625 mg kg⁻¹ y con el valor más bajo el CuEDTA con 500 mg kg⁻¹. Morin (1980), señala que el FeEDDHA generalmente se absorbe en suelos calcáreos, pero la corta duración de su efectividad o las grandes cantidades requeridas, pueden hacer tales tratamientos de difícil valor económico.

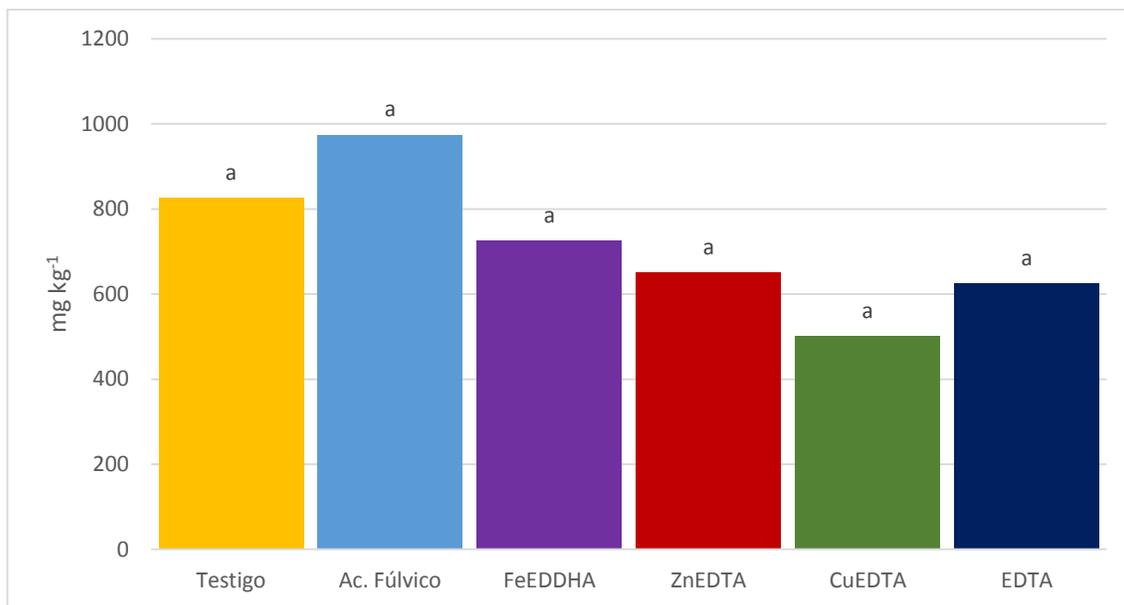


Figura 14. Contenido de hierro en la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L* y cinco agentes quelatantes

En el caso de la concentración de zinc en la planta (Figura 15), los valores más altos los tiene el EDTA y el ZnEDTA con 82 mg kg⁻¹, el CuEDTA con 70 mg kg⁻¹, testigo con 67 mg kg⁻¹ y el valor más bajo es del Ácido Fúlvico y el FeEDDHA con 65 mg kg⁻¹, de acuerdo a la agrupación no hay diferencia entre los tratamientos de cobre, testigo, EDTA, y zinc, pero si la hay con el hierro y el ácido fúlvico.

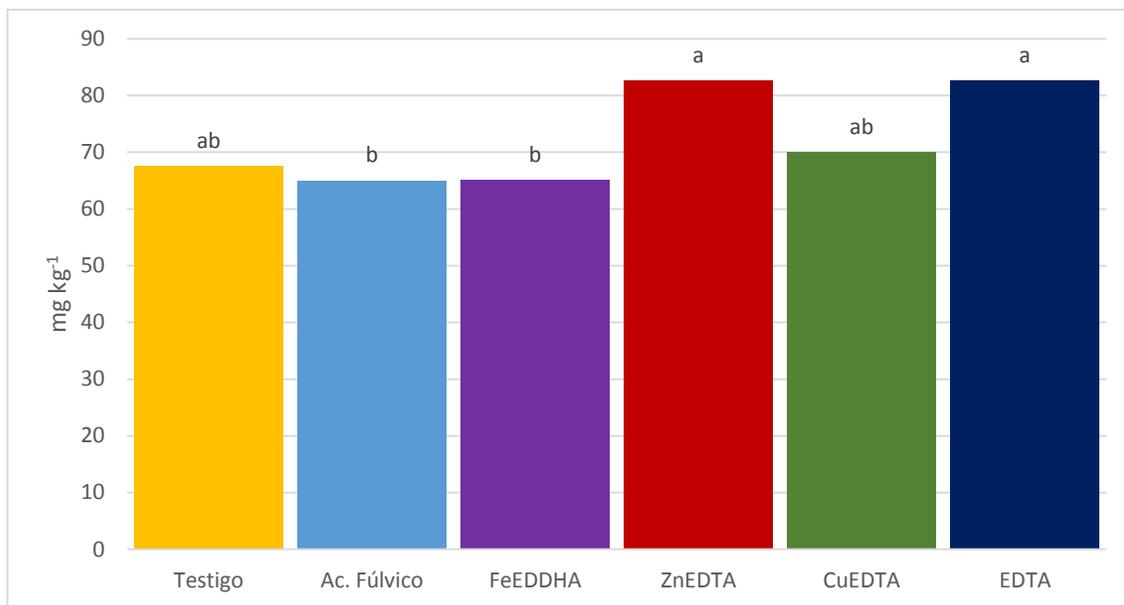


Figura 15. Contenido de zinc en la fitoextracción con quelite *Amaranthus hybridus L* y cinco agentes quelatantes

Tercer corte

Este tercer corte pertenece a la especie de pasto Kentucky, al realizar el segundo corte del quelite, se determinó que había un desarrollo generalizado del pasto, para esto se optó por aprovechar esta situación y hacer el corte para tener información sobre la capacidad de extracción de metales pesados del pasto

En la Figura 16, se grafica el contenido de plomo en el pasto, donde la mayor concentración se encuentra en donde se aplicó el tratamiento de FeEDDHA con 90 mg kg⁻¹, de acuerdo al grupo en la comparación de medias no hay diferencia entre las variables, pero si se compara con el EDTA con 52.5 mg kg⁻¹, se puede ver una diferencia.

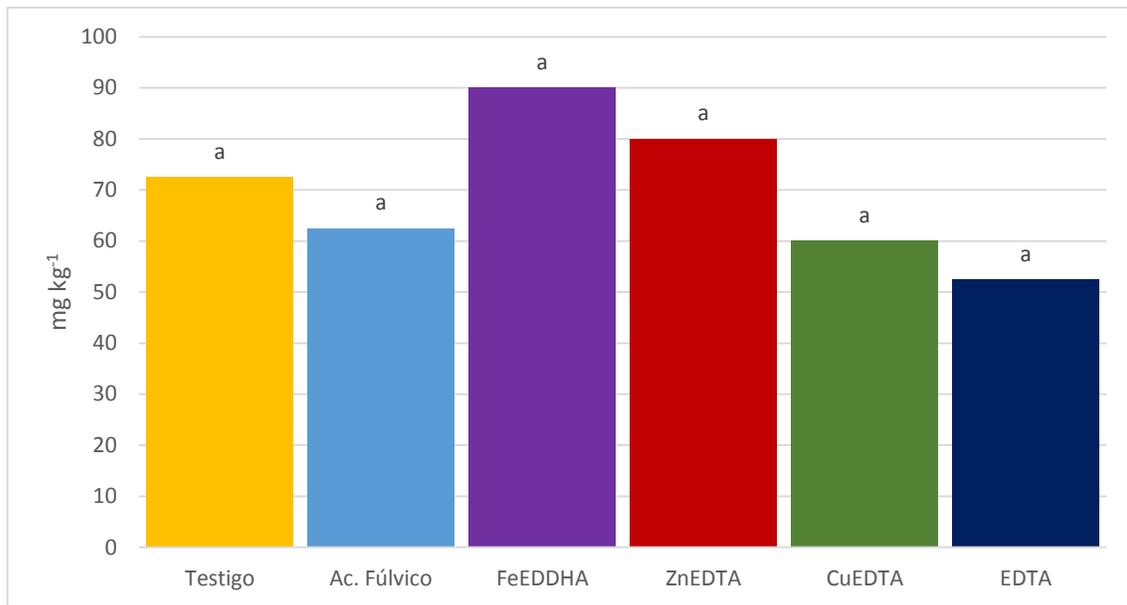


Figura 16. Contenido de plomo en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes

Por otra parte en la Figura 17, se muestra el contenido de cadmio en el pasto, donde la mayor concentración en la planta se encuentra en donde se aplicó el ZnEDTA con 22.5 mg kg⁻¹, y 20, 17.5, 12.5, 12.5 y 10 mg kg⁻¹, para testigo, FeEDDHA, CuEDTA, EDTA y Ácido Fúlvico respectivamente. Esto nos indica que la capacidad acumuladora del pasto es más baja que la del quelite.

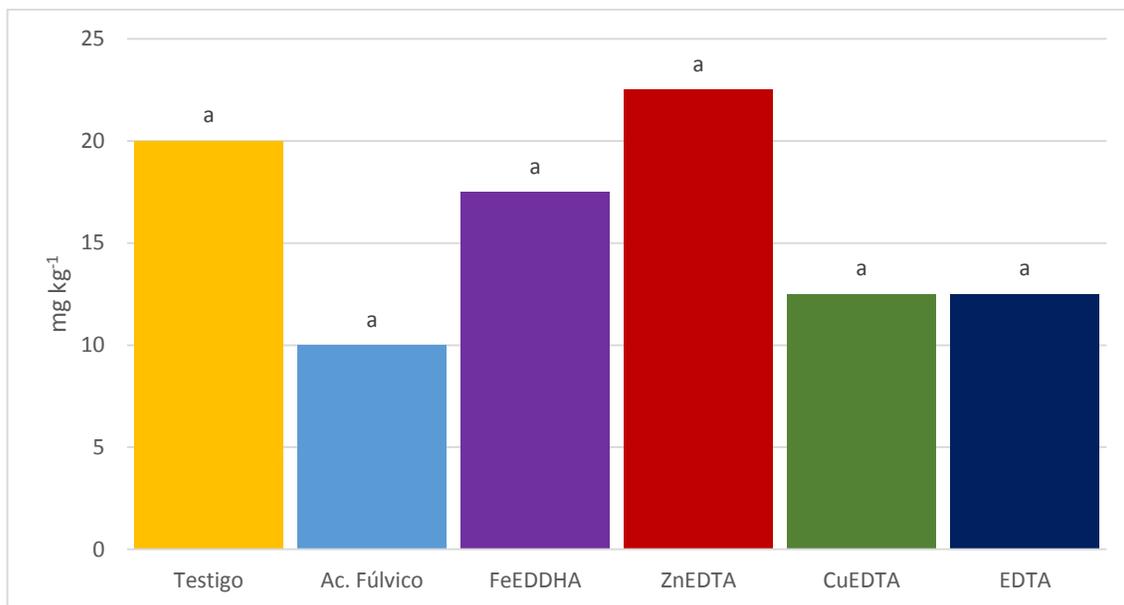


Figura 17. Contenido de Cadmio en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes

En la Figura 18, se grafica el contenido de cobre en el pasto Kentucky, y según la comparación de medias, no hay significancia entre los datos, con excepción del testigo.

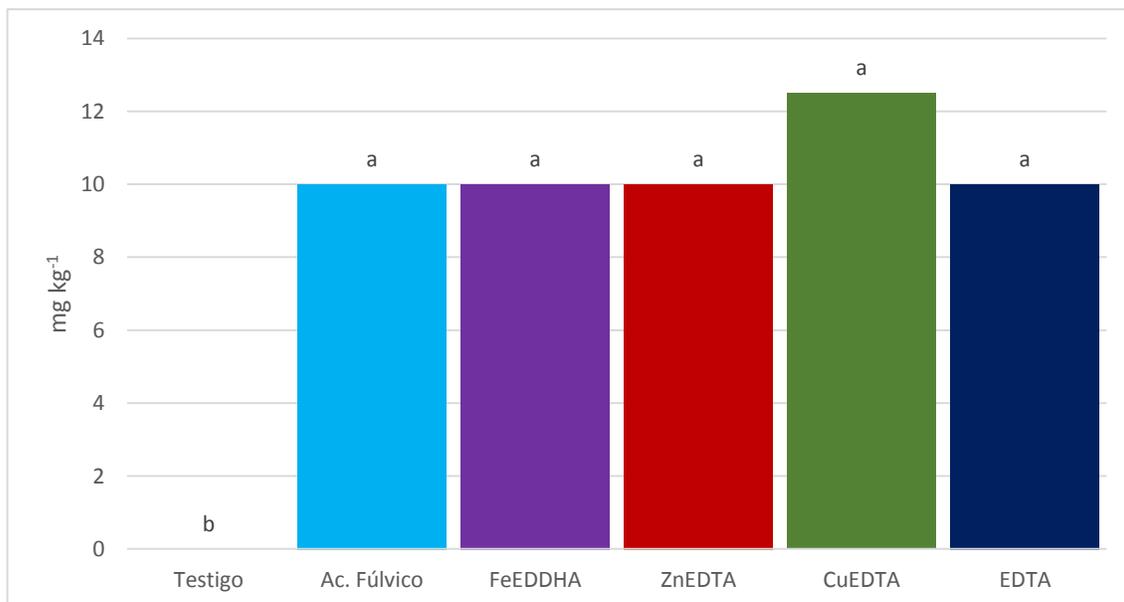


Figura 18. Contenido de cobre en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes

Para la comparación de medias del contenido de hierro en el pasto (Figura 19), el mayor es el FeEDDHA con 875 mg kg^{-1} , este valor es semejante al del segundo corte pero los dos son superiores al primero, esto nos puede indicar que en el primero se presentó una ligera toxicidad por hierro, donde fue difícil la absorción para la planta, la clasificación de los grupos, indica que no hay diferencia entre los tratamientos.

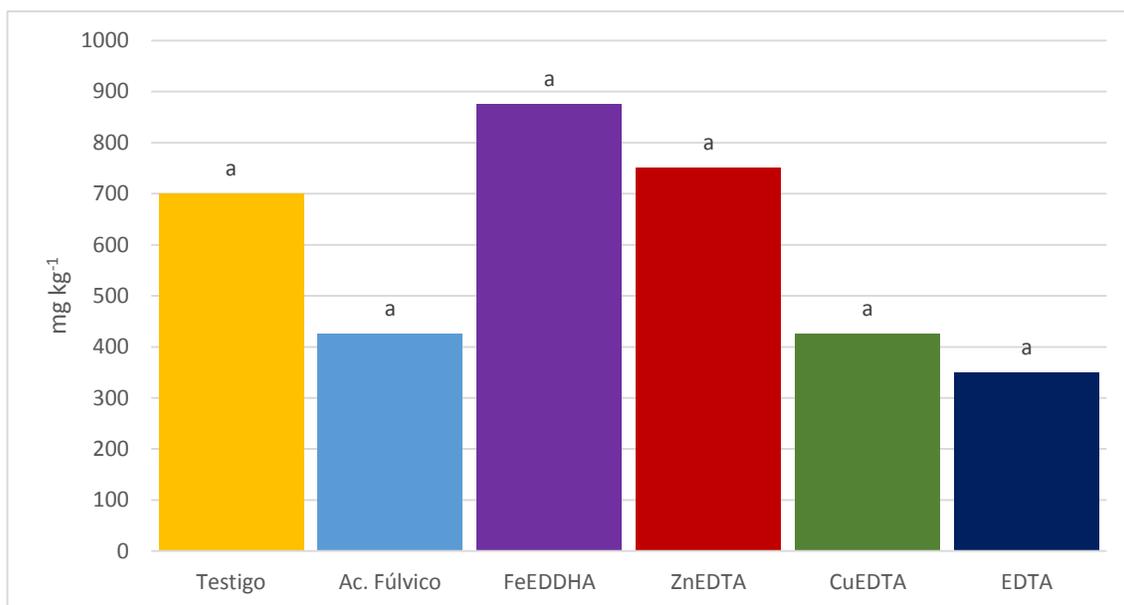


Figura 19. Contenido de hierro en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes

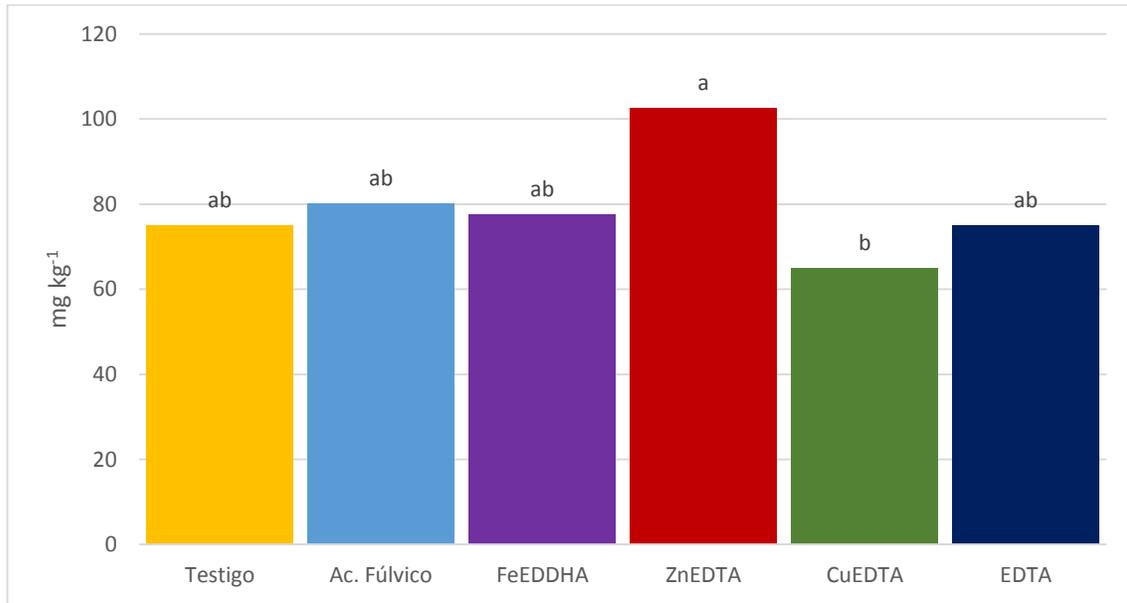


Figura 20. Contenido de zinc en la fitoextracción con pasto Kentucky y cinco agentes quelatantes

Comparación con tres métodos para las medias para cadmio y plomo en los cortes uno y dos.

Comparación de medias de cadmio y plomo con los métodos Tukey, DMS (diferencia mínima significativa) y Duncan. El método de Tukey, es el método más utilizado en los experimentos donde se utilizan tratamientos con el mismo número de repeticiones, por esta razón se optó por hacer la comparación de medias con otros métodos para observar su comportamiento. Al igual que la evaluación a la que se sometió el corte tres que es de un pasto, este estudio extra fuera de los objetivos de este trabajo.

Método de Tukey

Este procedimiento fue propuesto por Tukey en 1952 para probar la hipótesis $H_0 : \mu_j = \mu_k (j \neq k)$.

Este método es muy similar en la aplicación al de DMS, salvo por el hecho de que en lugar de utilizar las distribuciones de t como base para realizar las comparaciones, se emplea la distribución del rango estandarizado o estudentizado.

El contraste de Duncan utiliza, como el HSD de Tukey, la distribución del recorrido estudentizado. Se diferencia de ese test en que su aplicación es secuencial, en el sentido de no utilizar un único valor crítico para todas las diferencias de medias, como el de Tukey, sino un valor crítico que depende del número de medias comprendido entre las dos medias que se comparan, habiendo ordenado previamente las medias en orden creciente.

Se basa en la distribución del rango estudentizado que es la distribución que sigue la diferencia del máximo y del mínimo de las diferencias entre la media muestral y la media poblacional de t variables normales $N(0, 1)$ independientes e idénticamente distribuidas.

Método de Duncan

Esta prueba no requiere de una prueba previa de F , como sucede con la DMS o sea que aún sin ser significativa la prueba F puede llevarse a cabo.

La prueba de rango múltiple Duncan es una comparación de las medias de tratamientos todos contra todos de manera que cualquier diferencia existente entre cualesquier tratamiento contra otro se verá reflejado en este análisis. Utiliza un nivel de significancia variable que depende del número de medias que entran en cada etapa de comparación. La idea es que a medida que el número de medias aumenta, la probabilidad de que se asemejen disminuye.

Método de DMS (Diferencia Mínima Significativa)

Esta prueba determina el valor mínimo necesario para considerar diferentes dos tratamientos y lo utiliza para comparar los diferentes pares de medias que se deseen evaluar. Los pares de medias que se comparan son los que han sido planeados antes de ejecutar el experimento, por ello es una prueba para comparaciones planeadas.

La diferencia mínima significativa sólo debe emplearse para comparar medias adyacentes en un arreglo ordenado, aunque también se puede emplear para comparar las medias con un testigo o tratamiento estándar.

Primer corte

En la Figura 21, para plomo, no hay diferencia significativa entre el método de Tukey y Duncan, en cambio con DMS hay una diferencia para el tratamiento del Ácido Fúlvico y EDTA, donde hay diferencia significativa entre los métodos.

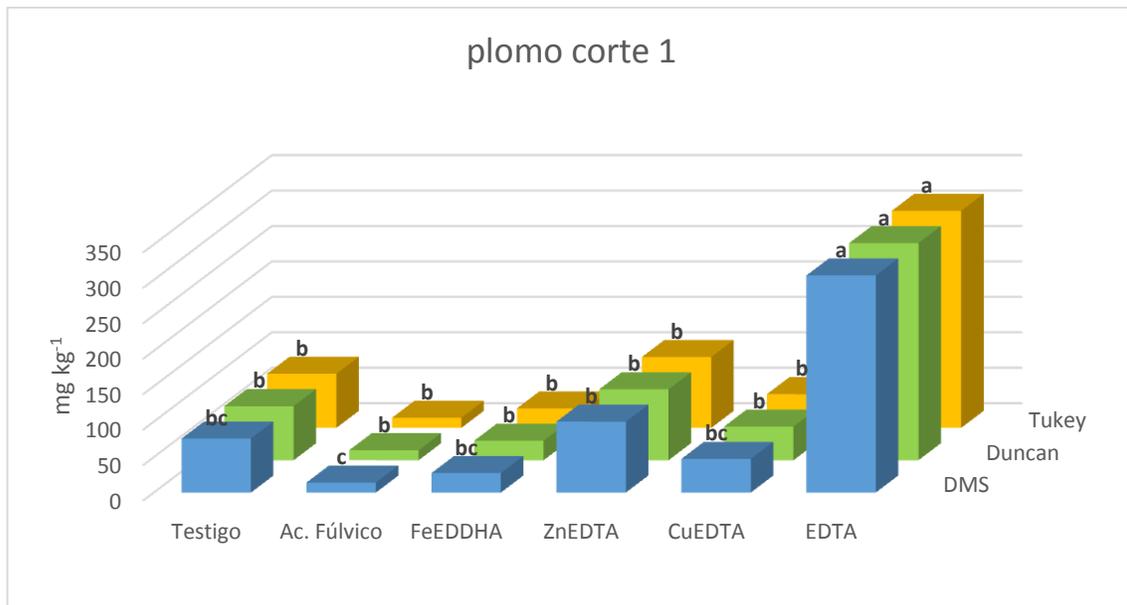


Figura 21. Comparación de medias para plomo con los métodos DMS, Duncan y Tukey

En la Figura 22, para cadmio, no existe diferencia entre los métodos, en las variables solo hay diferencia en el método de Tukey entre el Ácido Fúlvico y el FeEDDHA entre los demás tratamientos.

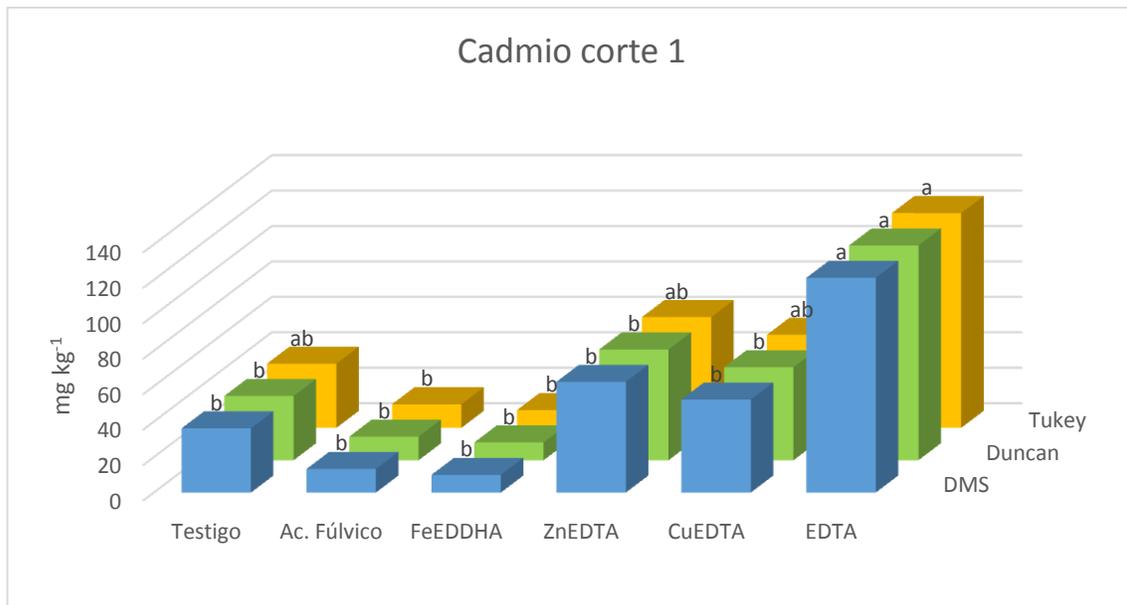


Figura 22. Comparación de medias para cadmio con los métodos DMS, Duncan y Tukey

Segundo corte

En la Figura 23, para plomo, los tres métodos dan el mismo resultado en cuanto a la comparación de medias.

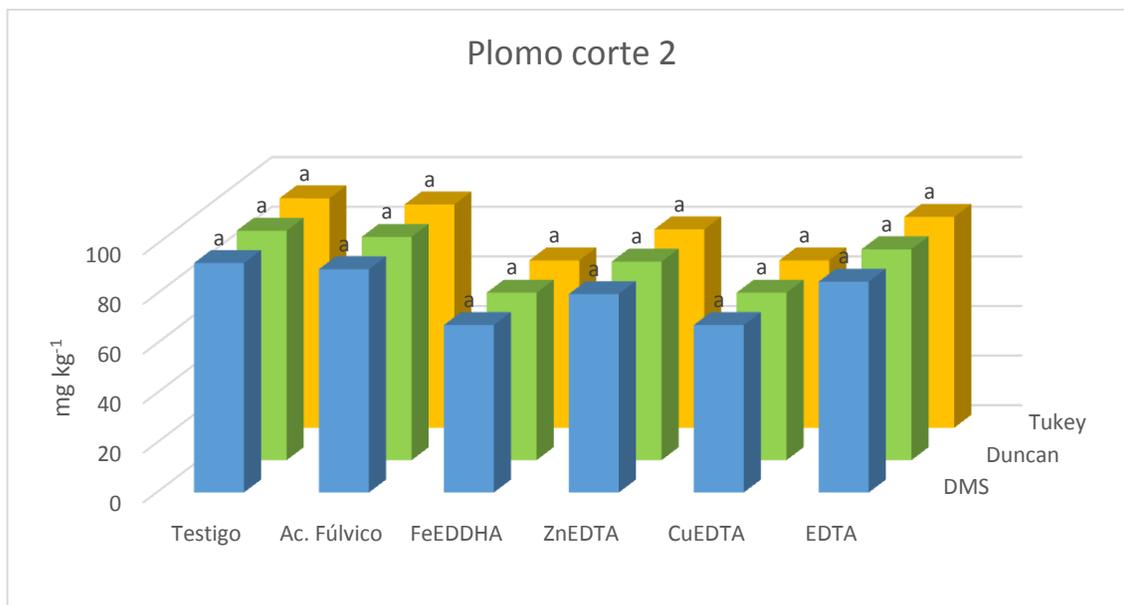


Figura 23. Comparación de medias para plomo con los métodos DMS, Duncan y Tukey

En la Figura 24, para el cadmio, no hay diferencia entre la comparación de las medias con los tres métodos, con excepción del FeEDDHA con Duncan y DMS.

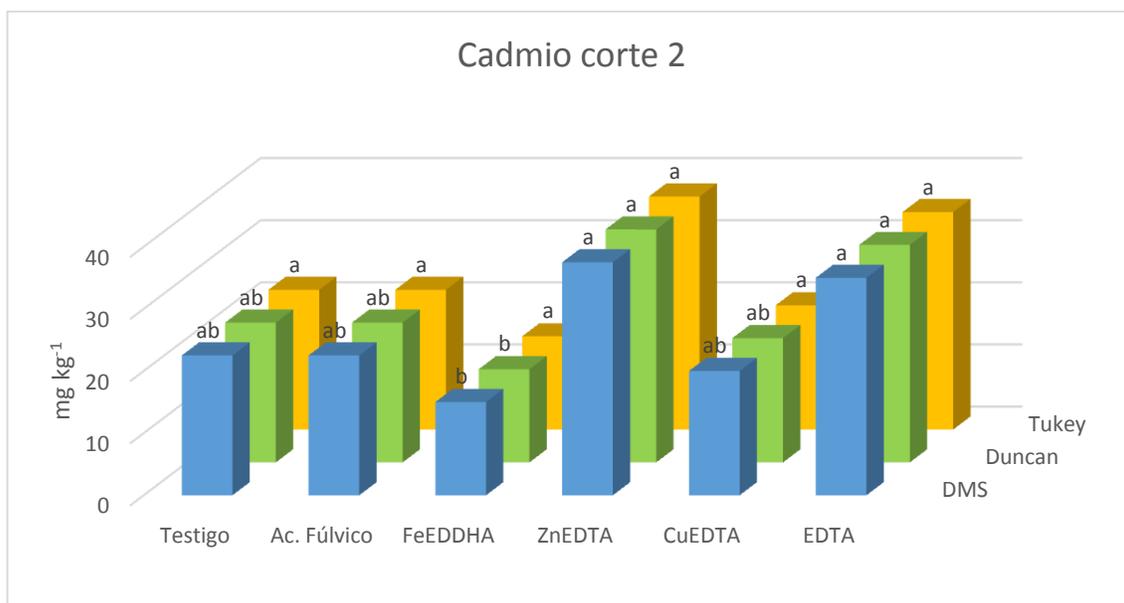


Figura 24. Comparación de medias para cadmio con los métodos DMS, Duncan y Tukey

CONCLUSIÓN

En la evaluación de la fitoextracción de plomo, respecto al primer corte, el quelato más efectivo fue el EDTA, al igual que para cadmio.

Para el segundo corte en el caso de plomo, el testigo tubo mejor resultado con 92.5 mg kg^{-1} , pero el Ácido fúlvico también estuvo elevado con 90 mg kg^{-1} , en cadmio para este segundo corte el más efectivo fue el ZnEDTA con 37.5 mg kg^{-1} y el EDTA con 35 mg kg^{-1} .

Se concluye que la capacidad de fitoextracción de metales pesados (cadmio y plomo), que se esperaba del quelite *Amaranthus hybridus*, ha sido exitosa, y se cumple la hipótesis.

BIBLIOGRAFIA

- Brizuela, J., Jiménez, Y. 2012. Metodologías aplicadas para el establecimiento de los niveles de referencia para metales pesados en la evaluación de la contaminación en suelos. Revista Avances en Química. Volumen (007): 101 p.
- Carmona, P. W., Orsini V. G. 2010. Sinopsis del subgénero *amaranthus* (*amaranthus*, *amaranthaceae*) en Venezuela. Revista SCielo. Volumen 33.
- Clemente, R., Walker, D. J., Bernal, M. P. 2005. Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): the effect of soil amendments. *Environmental Pollution*, 138: 46-58.
- Conabio. 2009. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/amaranthaceae/amaranthus-hybridus/fichas/ficha.htm> (4, agosto, 2015).
- Cortés, L. A., Rodríguez R., García, C. A. 2006 Técnicas de fitorremediación en áreas contaminadas por metales pesados. Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. Publicaciones del instituto geológico y minero de España. Seri: Medio ambiente N° 11. Pp. 533-536.
- Cunningham S. D., T. A. Anderson, P. A. Schwab, F. C. Hsu 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agron.* 56: 55-114
- Doménech, X. 2006. Química ambiental de sistemas terrestres. Editorial Reverte, S. A. España. Pp 134-135.
- Elías, X., 2009. Reciclaje de Residuos Industriales residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora. Editorial Ediciones Días de Santos S. A. 2ª Edición. Madrid, España. Pp. 1128.
- EPA. 2010. Proposed Explanation of Significant Differences and Remedial Action Construction. http://www.epa.gov/superfund/spanish/pdfs/FINAL-ENGLISH-SPANISH-ATSF_ABQ_fctsht_FEB-2010.pdf (citado 28, septiembre, 2015)

- Escolástico, L. C., Lerma, R. A., López, L. J., Alias, S. M. 2013. Medio ambiente y espacios verdes. Editorial UNED. Pp 335.
- Finck, A. 1988. Fertilizantes y fertilización. Editorial Reverté S. A. España. Pp. 272.
- Galán, H. E., Romero, B. A., 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. Revista Española de Mineralogía. Volumen (10): 48- p.
- Gonzales, A., Beltrán, M., Ayala, I., Vaca, M., Vázquez, A. 2012. Contaminación por metales pesados en un suelo urbano industrial y en la vegetación del sitio. Revista AIDIS. Volumen (5): 2 p.
- González, S. 2006. Contaminación. Escuela de Ingeniería Industrial. Instituto Universitario Politécnico "Santiago Mariño" extensión Maturín. República Bolivariana de Venezuela. 10 p.
- Harris, D. 2007. Análisis Químico Cuantitativo. Editorial Reverté, S. A. 3ª edición (sexta edición original). España. Pp 275.
- Hussein F. Farrag, Yasin M. Al-Sodany, Faleh G. Otiby. 2013. Phytoremediation and Accumulation Characteristics of Heavy Metals by Some Plants in Wadi Alargy-Wetland, Taif-KSA. World Applied Sciences Journal. Botany Department, Faculty of Science, Cairo University, Egypt.
- INE. 2007. Fuentes de contaminación en México. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/372/fuentes.html#top> (citado 21, septiembre, 2015)
- Lorda, L. M. 2013. Catálogo florístico de navarra. Primer edición. Editorial Publidisa. España. Pp 16.
- Mentaberry, A. 2011. Fitorremediación. Curso de Agrobiotecnología. Departamento de Fisiología, Biología Molecular y Celular Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires.
- Molina, E. A. 2003. Taller de abonos orgánicos. Quelatos como fertilizantes. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica.

- Morin, L. C. 1980. Cultivo de cítricos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrarias. Segunda edición. Editorial IICA. Lima Perú Pp. 343.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece Criterios para determinar las Concentraciones de Remediación de Suelos Contaminados.
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PP03/DO950.pdf>. (citado 12, septiembre, 2015).
- OMS. 2015. Intoxicación por plomo y salud.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/> (citado 30, septiembre, 2015).
- Ortiz, B. I., Sanz, G. J., Dorado, V. M., Villa, F. S. 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica. Madrid España. Pp 47-49.
- Perea, E., Ojeda, D., Hernández, T. R., Martínez J. 2010. Utilización de quelatos en la agricultura. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas/Universidad Autónoma de Chihuahua. Revista Synthesis. Vol. 53.
- Pérez, M. I. 2014. Uso de parámetros indirectos en la determinación de la contaminación de suelos por elementos potencialmente tóxicos en zonas minero-metalúrgicas. Tesis de Doctorado. ANAM. México, D.F. 45 p.
- Procuraduría General de Protección al Ambiente (PROFEPA). 2002. Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, México.
www.profepa.gob.mx
- Saval, B. S. 1995. Acciones para la Remediación de Suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- SEMARNAT. 2009. Metales pesados. www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales (citado 28, agosto, 2015)

- SEMARNAT. 2000. Identificación y Caracterización de Sitios Contaminados con Residuos Peligrosos. 19 Pág. Información proporcionada por la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. INE, México.
- Trejo, M. M. 1998. Índices de contaminación por metales pesados en suelos de cultivo del estado de Guanajuato. Tesis de Licenciatura. UNAM. 1998. México, D.F., México.
- USEPA. Environmental Protection Agency. 2001. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report. 10th Edition. Office of Solid Waste and Emergency Response. <http://www.epa.gov/TIO>.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1997. Recent developments for in situ treatment of metal contaminated soils. Office of Solid Waste and Emergency Response. Technology Innovation Office. Washington D.C.
- Velasco, J. M., Cabrera, Ma. E., Hoyos, C., Ledesma, J. L., Nieto, J. Ma., Revuelta J. L., Romero, T., Salamanca, C., Torres, Ma. D. 2009. Ciencias de la Tierra y Medioambientales. Editorial Editex, S.A. México. Pp. 168.
- Villas, B. R., Echavarría, C., Ellis, J., Maceras, D., 2004. Problemas emergenciales y soluciones APELL. Cooperación Iberoamericana. CYTED. Bolivia. Pp 326-328.
- Volke, S. T., Velasco, T. J., De la Rosa, P. D. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Primera edición. México. Pp 109-110.
- Volke, S. T., Velasco, T. J. A. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. México. P. 9.
- Wenzel, W. W., Adriano, D. C., Salt, D., Smith, R. 1999. Phytoremediation: a plant-microbe-based remediation system. In: Adriano, D. C., Bollag, J. M., Frankenberger, W. T., and Sims, R. C. (Eds.), Bioremediation of Contaminated Soils. ASA Monography nº 37. Madison, WI, USA. pp. 456-508.

Zhang X., Zhang S., Xu X., Li T., Gong G., Jia Y., Li Y., Deng L. 2010. Tolerance and accumulation characteristics of cadmium in *Amaranthus hybridus* L. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, PR China.