

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO CON LA
TÉCNICA DE ELECTORREMEDIACIÓN EN UNA CELDA CONSTRUIDA EN EL
LABORATORIO.**

POR

PAOLA GUADALPE MORENO ASCENCIO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER TITULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA

MAYO 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS DEL C. PAOLA GUADALUPE MORENO ASCENCIO, QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACION DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

REVISADA POR EL COMITÉ ASESOR:

PRESIDENTE:

DR. ANSELMO GONZÁLEZ TORRES

VOCAL:

ING. JOEL LIMONES AVITIA

VOCAL:

DR. MARIO GARCÍA CARRILLO

VOCAL:

DR. ALFREDO OGAZ

M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

MAYO DE 2017.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Disminución de la concentración de Cadmio en el suelo con la técnica de electroremediación en una celda construida en el laboratorio.

POR:

PAOLA GUADALUPE MORENO ASCENCIO

TESIS:

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

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

REVISADA POR EL COMITÉ ASESOR:

ASESOR PRINCIPAL:

DR. ANSELMO GONZALEZ TORRES

ASESOR:

ING. JOEL LIMONES AVITIA

ASESOR:

DR. MARIO GARCÍA CARRILLO

ASESOR:

DR. ALFREDO OGAZ

M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

MAYO DE 2017.



AGRADECIMIENTOS

A Dios. Por darme la oportunidad de vivir y la fuerza suficiente para salir adelante y lograr mis éxitos en la vida.

Al Dr. Anselmo. Por darme la oportunidad de trabajar con él en este proyecto y por brindarme su conocimiento y las herramientas necesarias para poder llevar a cabo este proyecto y por todo su apoyo y amistad.

Al Ing. Limones, al Dr. Mario García, el Dr. Ogaz. Por su apoyo para realizar mi tesis.

Dr. Jorge Meza Velázquez de la Facultad de Ciencias Químicas en UJED, gracias por su apoyo de brindarme el material necesario para realizar mis análisis y poder concluir este proyecto.

A Juan Carlos Mejía. Todo el apoyo incondicional que me brindó en el tiempo que trabajamos juntos, su amistad y por los consejos para ser una mejor persona y no darme por vencida ante cualquier situación difícil en mi vida.

A Silverio Álvarez. Por el apoyo que me brindo en el laboratorio cuando no sabía qué hacer, por animarme y por darme su amistad.

A mis padres. Gracias por siempre guiarme por el camino correcto, por todo su amor y confianza y por todo el apoyo incondicional que me han dado.

DEDICATORIA.

A mis padres. Carlos Moreno Escobar y Ernestina Ascencio Hernández por apoyarme incondicionalmente para obtener un logro tan grande como el de convertirme en un profesionalista.

A mis hermanos. Adriana Moreno Ascencio y Carlos Ernesto Moreno, todo el apoyo que me han dado, por su cariño y consejos para seguir adelante y no darme nunca por vencida.

A mis amigos en general. Por los momentos tan maravillosos que pasamos juntos en clase, por darme consejos y siempre apoyarme.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es determinar la disminución de la concentración de cadmio en el suelo con la técnica de electroremediación en una celda construida en el laboratorio. Se construyó una celda con una medida de 20 x 10 x 5 cm obteniendo un volumen de 1000cm³ para la remediación del suelo contaminado con Cadmio. Las condiciones para realizar los experimentos fueron aplicando una corriente de 20 y 40V y un Amperaje de 1 y 2, utilizando como solventes agua destilada y ácido acético por un tiempo de 24 horas. De los 9 experimentos, los mejores resultados se presentaron en los experimentos E, F y H, aplicando un potencial de 20 y 40 V 1 A, con un tiempo de remediación de 24 horas, utilizando los solventes agua destilada y ácido acético. YLa diferencia de concentración de Cd en los experimentos es de 119 y 308 ppm (mg/kg). La mayor diferencia entre la sección con menor concentración y la de mayor concentración fue en el experimento H, con un voltaje de 40 V y 1 Amper, utilizando como solvente ácido acético con un tiempo de 24 horas.

Palabras clave: Metales pesados, contaminación de suelo, Cadmio, electroremediación, Tecnologías de remediación.

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
INDICE.....	iv
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE TABLAS.....	vii
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
II.- OBJETIVOS.....	4
Objetivos Generales.....	4
Hipótesis.....	4
III.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1 ANTECEDENTES.....	5
3.2- SUELO.....	6
3.3- COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO.....	7
3.4- PROPIEDADES FÍSICAS.....	8
3.3.1.- Textura.....	8
3.3.2.- Color del suelo (matriz).....	8
3.3.3.- Estructura.....	9
3.3.4.- Densidad.....	9
3.3.5.- Porosidad.....	10
3.3.6.-Profundidad.....	10
3.3.7.- Permeabilidad.....	10
3.4- PROPIEDADES QUÍMICAS.....	11
3.4.1.- pH del Suelo.....	11
3.4.2.- Capacidad de Intercambio Catiónico.....	11
3.4.3.- Materia orgánica.....	11
3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.....	12
3.6.- PROBLEMÁTICA DE LOS METALES PESADOS EN EL AMBIENTE.....	14
3.7.- CONTAMINACIÓN DEL SUELO.....	15
3.7.1.- DINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO.....	15
3.8.- FUENTES ANTROPOGÉNICAS DE CONTAMINACIÓN.....	15
3.9.- PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA MOVILIDAD DE LOS.....	16

3.9.1.- CONTAMINANTES EN EL SUELO.....	16
3.10.- METALES PESADOS	17
3.11.- CADMIO	19
3.11.1.- Principales industrias y procesos.....	21
3.11.2.- Efectos sobre la salud humana	23
3.12.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS.....	24
3.13.- FACTORES QUE INCIDEN EN LOS PROCESOS DE REMEDIACIÓN	24
3.14.- CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN	24
3.15.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS (BIORREMEDIACIÓN)	25
3.16.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN FISICOQUÍMICAS	27
3.17.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN TÉRMICAS.....	28
3.18.- ELECTORREMEDIACIÓN.....	29
3.19.- PRINCIPIO BÁSICO DE LA ELECTORREMEDIACIÓN	30
3.20.-MECANISMOS DE REMOCIÓN.....	30
3.21.- FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE ELECTORREMEDIACIÓN.....	31
3.22.- CELDAS DE ELECTROQUÍMICAS	33
3.22.1.-TIPOS DE CELDAS	33
IV.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
4.1.- Localización geográfica de los sitios de muestreo	35
4.2.1.- Procedimiento de recolección de muestras.....	35
4.2.3.- Análisis de muestras en el laboratorio	37
4.2.4.- Procedimiento para la digestión.....	37
4.2.5.- Contaminación y remediación del suelo	38
4.2.6.- Procedimiento para la digestión.....	40
V.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
VI. CONCLUSIÓN.....	55
VII. LITERATURA CITADA	57

INDICE DE FIGURAS

FIG 1. Análisis iniciales de suelo.....	36
FIG 2. Procedimiento para la digestión	38
FIG 3. Solución estándar 1000ppm de Cd, Contaminación y electroremediación del suelo.....	39
FIG 4. Muestras de suelo y tamizadas	40
FIG 5. Procedimiento para la digestión para análisis de concentración de cadmio en suelo.....	41
FIG 6. Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada.....	43
FIG 7. Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada.....	44
FIG 8. Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente ácido acético.	45
FIG 9. Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente agua destilada.....	46
FIG 10 Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente ácido acético.	47
FIG 11 Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje 40 V, 1 A utilizando como solvente agua.	48
FIG 12 Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 1 A utilizando un solvente de ácido acético.	49
FIG 13 . Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A utilizando un solvente de agua destilada.....	50
FIG 14 - Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A por 24 utilizando un solvente ácido acético.....	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis iniciales del suelo	37
Tabla 2. Condiciones Experimentales para cada Tratamiento	42
Tabla 3. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada (Experimento B).....	43
Tabla 4. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada. (Experimento C).....	44
Tabla 5. Suelo electrorremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente ácido acético (Experimento D).	45
Tabla 6.- suelo electrorremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente agua destilada (Experimento E)	46
Tabla 7. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente ácido acético (Experimento F)	47
Tabla 8. Suelo electroremediado en una celda con voltaje 40 V, 1 A utilizando como solvente agua. (Experimento G).....	48
Tabla 9. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 1 A utilizando un solvente de ácido acético (Experimento H)	49
Tabla 10. Suelo electrorremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A utilizando un solvente de agua destilada (Experimento I)	50
Tabla 11. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A por 24 utilizando un solvente ácido acético (Experimento J).....	51
Tabla 12. Diferencia entre secciones dentro de la celda.....	56

I.- INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente esencial del ambiente en el que se desarrolla la vida; es vulnerable, de difícil y larga recuperación (tarda desde miles a cientos de miles de años en formarse), y de extensión limitada, por lo que se considera un recurso natural no renovable. El suelo provee importantes funciones ambientales, dentro de las cuales se destaca ser el sustento de alimento para las plantas, almacenar nutrientes, poseer y albergar materia orgánica proveniente de restos animales y vegetales, ser el hábitat de diversos organismos que transforman la materia orgánica presente en él, entre otros factores que lo hacen ser esencial en el desarrollo de los ecosistemas de los cuales forma parte (Milena *et al.*, 2009).

La importancia del suelo radica en que es un elemento natural dinámico y vivo que constituye la interfaz entre la atmósfera, la litósfera, la biósfera y la hidrósfera, sistemas con los que mantiene un continuo intercambio de materia y energía. Esto lo convierte en una pieza clave del desarrollo de los ciclos biogeoquímicos superficiales y le confiere la capacidad para desarrollar una serie de funciones esenciales en la naturaleza de carácter medioambiental, ecológico, económico, social y cultural (Granada- Laso, 2011).

La sociedad actual ha provocado (y continua provocando) cambios sobre el medio ambiente, diversas actividades (industria, construcción, etc) llevan a cabo la explotación de recursos, ejerciendo sin duda una presión clara sobre casi todos los ecosistemas con los que entran en contacto directo o indirecto (aire, agua y suelo) (García. *et al.*, 2002).

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en unas concentraciones que superan el poder de amortiguación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades.

Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas exógenas, aunque también se puede producir de forma natural o endógena cuando los procesos de edificación liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos (Ortiz *et al.*, 2007).

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). El contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo, pero la actividad humana incrementa el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables, siendo esta, sin duda, la causa más frecuente de las concentraciones tóxicas (Granada- Laso, 2011).

La determinación de metales pesados en el ambiente es de gran importancia, entre los más importantes está el plomo, arsénico y cadmio, la acumulación de estos en el organismo humano causa enfermedades muy graves que pueden ocasionar la muerte (Carrillo. y Gallard, 2012).

El cadmio es un metal pesado no esencial para las plantas y muy tóxico, cuya concentración en el suelo se incrementa progresivamente debido a actividades antropogénicas, tales como la minería, fundición de metales, quema de combustibles fósiles, uso de fertilizantes fosfatados, fabricación de baterías, pigmentos y plásticos (Gallegos *et al.*, 2012). Este metal es considerado el más móvil en el ambiente acuático y una de sus principales características es que es bioacumulativo y persistente en el ambiente (tasa media de 10-30 años) se encuentra en aguas superficiales y subterráneas, cabe mencionar que este metal también tiende a acumularse en la superficie del suelo (Nava y Méndez, 2011).

La Norma Oficial Mexicana Nom-147-SEMARNAT-2004- Establece la concentración de Cadmio en el suelo. El límite máximo permisible de Cadmio para suelo de uso agrícola, residencial y comercial es de 37 mg/kg y en suelo industrial es de 450 mg/kg (DOF, 2004).

La necesaria eliminación de productos tóxicos y peligrosos, tanto orgánicos como inorgánicos, ha dado como resultado la continua y creciente degradación y contaminación del medio ambiente y de los ecosistemas que lo componen: aire, agua y suelo (García. *et al.*, 2002).

En las últimas décadas se han desarrollado diversas tecnologías para la remediación de suelos contaminados que actualmente se aplican exitosamente. Las técnicas de tratamiento consisten en la aplicación de procesos químicos, biológicos o físicos a desechos peligrosos o materiales contaminados a fin de cambiar su estado en forma permanente (De la Rosa- Pérez *et al.*, 2007b).

La remediación electrocinética esencialmente involucra la instalación de electrodos y la aplicación de una corriente directa continua, o de un gradiente de potencial a través de éstos, durante cierto tiempo. Con la aplicación de este campo eléctrico se consigue, dependiendo de diversos factores como el grado de humedad del terreno, acidez, etc., movilizar las especies cargadas hacia los electrodos correspondientes, la corriente actúa como agente limpiador que moviliza los contaminantes hacia el ánodo o el cátodo.

Los mecanismos principales por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, electroósmosis y electroforesis

II.- OBJETIVOS

Objetivos Generales.

Evaluar la técnica de electro remediación, como un método eficiente para disminuir la concentración de cadmio presente en suelos contaminados en una celda construida en el laboratorio.

Hipótesis

La electrorremediación es una técnica eficiente para disminuir la concentración de metales pesados presentes en suelos contaminados.

III.- REVISIÓN DE LITERATURA.

3.1 ANTECEDENTES

La producción comercial de cadmio comenzó sólo a principios del siglo XX. Inicialmente, su principal uso fue en galvanoplastia, pero desde 1960, el cadmio se ha utilizado para la fabricación de baterías de níquel-cadmio. El cadmio también se utiliza en pigmentos de pintura, para galvanoplastia y en la fabricación de plásticos de cloruro de polivinilo.

La mayor parte del cadmio presente en la atmósfera es el resultado de las actividades humanas, especialmente la fundición de minerales de metales no ferrosos, combustibles fósiles. La combustión y la incineración de residuos municipales. Los compuestos de cadmio inorgánico solubles constituyen la mayor preocupación para la seguridad en el trabajo.

La exposición ocupacional de los trabajadores de la industria de la fundición no ferrosa puede ser significativa. Las operaciones de fundición y minería contaminan el ambiente acuático, al igual que los efluentes producidos por el control de la contaminación atmosférica (depuradores de gases, en ausencia de medidas estrictas de control). La deposición atmosférica de cadmio en los suelos cultivables supera su concentración en muchos países, dando lugar a un aumento gradual de los niveles de cadmio en los suelos y cultivos.

La aplicación de lodos de alcantarillado a suelos agrícolas también puede ser una fuente importante de cadmio (OMS, 2010).

3.2.- SUELO

El suelo, la capa más superficial de la corteza terrestre, constituye uno de los recursos naturales más importantes con el que contamos al ser el substrato que sustenta la vida en el planeta. Desde el punto de vista edáfico, un suelo es un cuerpo natural tridimensional formado por la progresiva alteración física y química de un material original o roca madre a lo largo del tiempo, bajo unas condiciones climáticas y topográficas determinadas y sometido a la actividad de organismos vivos (Ortiz Silla, 2015).

A lo largo de su evolución o edafogénesis, en el suelo se van diferenciando capas verticales de material generalmente no consolidado llamados horizontes, formados por constituyentes minerales y orgánicos, agua y gases, y caracterizados por propiedades físicas (estructura, textura, porosidad, capacidad de retención de agua, densidad aparente), químicas y físico-químicas (pH, potencial redox, capacidad de intercambio catiónico) que los diferencian entre sí y del material original.

El conjunto de horizontes constituye el perfil del suelo y su estudio permite dilucidar los procesos de formación sufridos durante su evolución y llevar a cabo su clasificación dentro de las distintas unidades de suelos (Ortiz *et al.*, 2008)

El suelo constituye un recurso natural de gran importancia, que desempeña funciones en la superficie terrestre como reactor natural y hábitat de organismos, así como soporte de infraestructura y fuente de materiales no renovables (Volke Sepúlveda *et al.*, 2005).

3.3- COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO

El suelo es una mezcla compleja de materiales inorgánicos (fracción mineral, formada principalmente de arcillas, limo y arena), materia orgánica, agua/aire y organismos vivos.

En general, la composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado la meteorización (desintegración por la acción de agentes atmosféricos), por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas (Sposito, 1998)

Los componentes de los suelos maduros se encuentran dispuestos en una serie de zonas llamadas horizontes. El arreglo de estos horizontes en un suelo se conoce como un perfil edáfico o perfil del suelo. Cada horizonte se caracteriza por tener diferentes propiedades como color, textura, estructura, espesor y composición (tipo de minerales y elementos químicos presentes), además de su consistencia y reacción. Todas estas propiedades son utilizadas para definir los tipos de horizontes, de los cuales se han identificado a la fecha seis, simbolizados con las letras mayúsculas O, A, E, B, C y R (Miller., 1994; Jaramillo, 2001)

La mayoría de los suelos maduros posee, al menos, tres de los horizontes (A, B y C), pero suelos recientes o poco desarrollados pueden carecer de ellos. Algunos suelos tienen una capa orgánica (horizonte O) compuesta principalmente por hojas, desechos animales, hongos y otros materiales orgánicos parcialmente descompuestos.

El horizonte A, comúnmente es una mezcla porosa de materia orgánica descompuesta (humus), organismos vivos y algunas partículas minerales. El horizonte E, es una capa mineral de color claro, en la que ocurren pérdidas de arcillas, minerales y cationes por lixiviación, generándose una acumulación de arena y limo. Los horizontes B (subsuelo) y C (material parental parcialmente descompuesto), son los que contienen la mayor parte de la materia inorgánica del suelo. El horizonte B contiene depósitos de arcillas

y minerales (aluminio, óxidos de aluminio y carbonato de calcio) que recibe de las capas más superficiales por efecto de escurrimientos; el horizonte C en su mayor parte, es roca disgregada en forma de mezclas variables de arena, arcilla y grava, que contiene un mínimo de material orgánico; este horizonte, normalmente descansa sobre un lecho de roca (material parental) denominado con la letra R, el cual no es considerado como suelo (Miller., 1994; Jaramillo, 2001)

3.4.- PROPIEDADES FÍSICAS

3.3.1.- Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las clases de tamaño de partícula (o separaciones de suelo, o fracciones) en un volumen de suelo dado y se describe como una clase textural de suelo (FAO, 2009).

Por medio de la textura de un suelo se pueden estimar ciertos atributos como su capacidad productiva, su comportamiento mecánico, capacidad de retención de agua, capacidad portante, velocidad de infiltración, densidad aparente, capacidad de usos contrastándola con la profundidad y pendiente, etc (Morales *et al.*, 2011).

3.3.2.- Color del suelo (matriz)

El color del suelo refleja la composición así como las condiciones pasadas y presentes de óxido-reducción del suelo. Está determinado generalmente por el revestimiento de partículas muy finas de materia orgánica humificada (oscuro), óxidos de hierro (amarillo, pardo, anaranjado y rojo), óxidos de manganeso (negro) y otros, o puede ser debido al color de la roca parental.

El matiz, es el color espectral dominante (rojo, amarillo, verde, azul o violeta); el valor, es la claridad u oscuridad de los rangos de color de 1 (oscuro) a 8 (claro); y el croma, es la pureza o fuerza del rango de color desde 1 (pálido) a 8 (brillante). Cuando no

haya un color de suelo matriz dominante, el horizonte se describe como moteado y se dan dos o más colores (FAO, 2009).

3.3.3.- Estructura

La estructura del suelo se refiere a la organización natural de las partículas del suelo en unidades de suelo discretas agregados o peds que resultan de procesos pedogenéticos (FAO, 2009).

Esta propiedad nos permite conocer como están formados los agregados del suelo, es decir cómo se organizan las arcillas, el limo y las arenas para formar el suelo. Para determinar la estructura es necesario estudiar tres parámetros; siendo éstos: la forma, el grado de desarrollo y tamaño del agregado. (Morales *et al.*, 2011).

3.3.4.- Densidad

Se puede distinguir dos tipos de densidades de acuerdo a la densidad de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los espacios intersticiales entre los poros de los agregados del suelo. Los tipos de densidades por lo tanto serán: La **(pre)** de un suelo depende principalmente de la proporción de la materia orgánica e inorgánica presente.

La **(pap)** refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para el manejo de los suelos (refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire). También es un dato necesario para transformar muchos de los resultados de los análisis de los suelos en el laboratorio (expresados en % en peso) a valores de % en volumen en el campo. La **(pap)** del suelo es un buen indicador de importantes características del suelo, tales como porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje (Ingaramo., 2003; Alvarado, 2005; García, 2005).

3.3.5.- Porosidad

La porosidad del suelo (n) viene representada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo frente al volumen total. La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los huecos entre ellos, salvo si las partículas más finas se colocan dentro de esos huecos o si los cementos coloidales los obturan. No obstante lo más esperado es que los suelos con elementos gruesos presenten poros también gruesos y los suelos limosos y arcillosos, huecos muy numerosos pero de pequeño tamaño. La materia orgánica contribuye a aumentar sensiblemente la porosidad. Son por tanto los suelos coloidales los que tienen la mayor porosidad (Villanueva, 2013) (García, 2005).

3.3.6.-Profundidad

La profundidad del suelo es muy importante porque de ella depende el volumen de agua que el suelo puede almacenar. Un suelo de textura y estructura uniforme de 0.60 m de profundidad puede almacenar doble cantidad de agua que un suelo de 0.30 m de profundidad.

Con frecuencia a mayor profundidad mayor densidad aparente y menor porosidad de tamaño medio y grande. En la siguiente tabla se muestran algunos parámetros de clasificación de la profundidad hasta la roca o estrato cementado (Villanueva, 2013).

3.3.7.- Permeabilidad

Se refiere a la capacidad de los suelos para dejar fluir o transmitir agua o aire a través de él. La importancia de la permeabilidad radica en la determinación del potencial del suelo en actividades tales como fosas sépticas (peligro de infiltración de contaminantes hacia las capas freáticas), respuestas de drenaje del suelo y capacidad de regadío.

La permeabilidad se mide en términos de la velocidad del paso de agua a través de una unidad de sección transversal de suelo saturado de humedad en una unidad de tiempo (Morales *et al.*, 2011).

3.4.- PROPIEDADES QUÍMICAS

La química de suelos es la ciencia que estudia las propiedades químicas del suelo y de sus componentes inorgánicos y orgánicos, así como los fenómenos a que da lugar la mezcla de esos componentes. (Bornemisza, 1982).

3.4.1.- pH del Suelo

El pH del suelo expresa la actividad de los iones hidrógeno en la solución del suelo. Este afecta la disponibilidad de nutrientes minerales para las plantas así como a muchos procesos del suelo (FAO, 2009).

3.4.2.- Capacidad de Intercambio Catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de una muestra de suelo o de alguno de sus componentes, expresa: el número de moles de iones de carga positivos adsorbidos que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca, bajo unas condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación de masa-solución dada (Morales *et al.*, 2011).

3.4.3.- Materia orgánica

La materia orgánica del suelo constituye la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo así como sustancias producidas por los organismos

del suelo. La parte más estable de esta materia orgánica se llama humus, que se obtiene de la descomposición de la mayor parte de las sustancias vegetales o animales añadidas al suelo. La fracción orgánica del suelo regula los procesos químicos que allí ocurren, influye sobre las características físicas y es el centro de casi todas las actividades biológicas en el mismo, incluyendo la microflora y la fauna (Bornemisza, 1982).

3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Existen los siguientes tipos de suelo según (Seoanez Calvo, 1999):

Suelos arcillosos: Formados fundamentalmente por arcilla. La arcilla está constituida esencialmente por silicato de aluminio hidratado. Es un tipo de suelo que, cuando está húmedo o mojado, resulta pegajoso pero, cuando está seco es muy fino y suave dado que la arcilla está formada por partículas diminutas de menos de 0.005 milímetros de diámetro.

Desde un punto de vista de la textura, tiene consistencia plástica y puede ser modelado. Son suelos que, para la agricultura, se conocen como suelos húmedos y pesados. Son muy impermeables dado que no dejan pasar el agua o el aire, todo ello propicia que sean suelos donde el agua se estanque con facilidad por lo que en este tipo de suelo se necesita realizar un sistema de drenaje adecuado porque, después de las lluvias el agua queda retenida en la superficie. Presentan un color marrón oscuro. Los suelos arcillosos, al secarse, quedan muy compactos y duros y se caracterizan por la aparición de grietas. La ventaja principal es que son suelos que conservan fácilmente la forma que se le da al trabajarlos.

Se trata de un suelo arcilloso, cuando tomamos un pedazo del mismo en las manos, se hace fácilmente una bola. Igualmente, si colocamos un trozo de esta materia entre los dedos pulgar e índice y al trabajar con ambos dedos, se realiza cintas de hasta 5 cm con este tipo de tierra.

Suelo limoso: Son suelos que contienen una proporción muy elevada de limo. Es un tipo de suelo muy compacto, sin llegar a serlo tanto como los arcillosos. Estos suelos resultan de la sedimentación de materiales muy finos arrastrados por las aguas o depositados por el viento. Suelen presentarse junto a los lechos de los ríos y son muy fértiles.

Se trata de suelos limosos porque, al igual que los arcillosos, permiten formar bolas aunque estas se rompen con facilidad.

Suelos arenosos: El suelo arenoso está formado principalmente por arena. La arena son partículas pequeñas de piedra de carácter silicio con un diámetro entre (0.02 y 2) mm. A diferencia de la arcilla cuando esta húmeda o mojada no se engancha. Los suelos arenosos no retienen el agua que rápidamente se hunde a capas más profundas. Son suelos considerados secos en donde hay muy poca humedad. A diferencia de los suelos anteriores requieren un riego continuo y un trabajo constante para darle una forma determinada porque la pierden con facilidad. Presentan colores claros.

Sabemos que se trata de este tipo de suelo porque al coger un poco de él entre los dedos, somos incapaces de formar una bola. Este tipo de tierra, por mucho que lo manipulemos, seguirá estando suelto.

Suelos margosos: El suelo margoso es un suelo compuesto de arcilla, limo y arena con abundante cantidad de materia vegetal descompuesta (humus). Se trata de un suelo que presenta un color oscuro poco apelmazado y ligero. Podríamos decir que presenta las características positivas de los tres suelos anteriores: mantiene la suficiente humedad pero, al mismo tiempo, permite la permeabilidad hacia las capas inferiores.

Suelos gredosos: Un suelo gredoso es aquel que procede de la descomposición de las cretas o piedras calizas que contienen mucho carbonato cálcico. Es un tipo de tierra.

3.6.- PROBLEMÁTICA DE LOS METALES PESADOS EN EL AMBIENTE

La contaminación por metales pesados es seguramente uno de los problemas ambientales más serios. Industrias como la minería, la fundición de metales, la producción de combustible y energía a partir del petróleo, la industria de fertilizantes y pesticidas y sus aplicaciones, la industria del curtido de cuero, la industria fotográfica, la producción de energía atómica, entre otras, producen residuos que contienen metales pesados y éstos terminan transfiriéndose al medio ambiente debido a un incorrecto tratamiento o disposición final.

Los metales pesados pueden ser acumulados en los distintos eslabones de la cadena trófica, (“bioacumulación”), e incluso trasladados a sitios muy alejados del punto de origen de la contaminación, usualmente a través de cursos de agua (“biomagnificación”). Estos dos procesos traen consecuencias ambientales graves para el ecosistema y para la salud del hombre (Wang. y Chen., 2009).

La peligrosidad de los metales pesados es aún mayor al no ser ni química ni biológicamente degradables. Actualmente, se conocen más sobre los efectos adversos de estos elementos tanto en la salud humana (toxicología) como en los animales y plantas (ecotoxicología). Los efectos de los metales sobre el funcionamiento de los ecosistemas varían considerablemente y son de importancia económica y de salud pública. Entre los mecanismos moleculares que determinan la toxicidad de los metales pesados se encuentran: 1- el desplazamiento de iones metálicos esenciales y bloqueo de sus grupos funcionales, 2- modificación de la conformación activa de biomoléculas, enzimas y polinucleótidos, 3- ruptura de la integridad de biomoléculas y modificación de otros agentes biológicamente activo (cita)

Los metales son quizás las sustancias tóxicas, más antiguas que haya conocido el ser humano, la toxicidad de algunos de ellos, tales como plomo y arsénico ha sido conocida desde hace muchos años, a diferencia otros metales como al cadmio y talio cuya toxicidad ha sido recién reconocida. La acción negativa de estos metales sobre

la salud es ocasionada al menos por dos vías, transporte medio-ambiente en el aire, agua, polvo y comida, la segunda por alterar la forma bioquímica de los elementos (Nava-Ruíz. y Méndez-Armenta., 2011).

El cadmio, mercurio y arsénico son unos de los metales más tóxicos asociados a la contaminación ambiental debido a: Efectos adversos al hombre y al medio ambiente, bioacumulación, persistencia en el medio ambiente (Navarro-Aviño. *et al.*, 2007).

3.7.- CONTAMINACIÓN DEL SUELO

3.7.1.- DINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO

El suelo se ha convertido en un medio receptor de multitud de sustancias potencialmente contaminantes. Su condición de interfase entre la biosfera (biomasa terrestre, biomasa marina y hombre), la litosfera (corteza, suelo y sedimentos), la hidrosfera (agua dulce y agua de mar) y la atmósfera lo convierte en una “estación de tránsito” de los contaminantes, en la que pueden permanecer retenidos grandes períodos de tiempo (lo que aumenta la posibilidad de que puedan ser degradados y perder su naturaleza contaminante) o ser tan móviles que se incorporen a los demás medios y, de ahí, a las redes tróficas con los consecuentes problemas que ello acarrearía. (Miliarium, 2008)

3.8.- FUENTES ANTROPOGÉNICAS DE CONTAMINACIÓN

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas (Prieto. *et al.*, 2009). Las actividades geológicas naturales, como desgastes de cerros y volcanes, constituyen una fuente de aportaciones importante de metales pesados al suelo. También las actividades antropogénicas como la industria minera, que está catalogada como una de las actividades industriales más generadora de metales pesados. En el

suelo, los metales pesados, pueden estar presentes como iones libres o disponibles, compuestos de sales metálicas solubles o bien, compuestos insolubles o parcialmente solubilizables como óxidos, carbonatos e hidróxidos (Pineda., 2004).

La contaminación en suelos por metales pesados ocurre cuando estos son irrigados con aguas procedentes de desechos de minas, aguas residuales contaminadas de parques industriales y municipales y filtraciones de presas de jales (Wang. *et al.*, 1992). Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos en el mismo pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli. *et al.*, 2004).

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

3.9.- PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA MOVILIDAD DE LOS

3.9.1.- CONTAMINANTES EN EL SUELO

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son características del suelo: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio (catiónico y/o aniónico), presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, entre otras. La naturaleza de la contaminación y el origen de los metales y formas de deposición y condiciones medio ambientales producen acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad en los suelos (Sauquillo. *et al.*, 2003).

En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías: la primera, quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo u ocupando sitios de intercambio; segunda, específicamente adsorbidos sobre

constituyentes inorgánicos del suelo; tercera, asociados con la materia orgánica del suelo y cuarta, precipitados como sólidos puros o mixtos. Por otra parte, pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas; pueden pasar a la atmósfera por volatilización y pueden ser movilizados a las aguas superficiales o subterráneas (García. y Dorronsoro., 2005).

Aire

A la atmosfera, la incorporación se produce de manera directa en forma de vapores con micropartículas provenientes de zonas mineras o industriales (Hueso., 2013).

Agua

La incorporación de metales pesados al agua, ya sea dulce o salada, es debida a vertidos industriales, a lluvia con partículas provenientes de vertidos a la atmosfera o de sedimentos, pasando a estuarios y océanos (Hueso., 2013). La lixiviación es el proceso por el cual los elementos en un material sólido como los residuos mineros, son liberados al ambiente a través del contacto con el agua. Conociendo la velocidad y proporción a la cual los constituyentes de interés pueden ser liberados, se podrán definir los impactos en el medioambiente potenciales como la contaminación de aguas superficiales, los riesgos ecológicos y la salud humana (Sloot *et al.*, 2003).

3.10.- METALES PESADOS

Los metales pesados se pueden considerar como un miembro de un grupo de elementos no muy bien definido que exhibe propiedades metálicas. Se incluyen principalmente metales de transición, algunos semimetales, lantánidos, y actínidos. Muchas definiciones diferentes han propuesto basarse en la densidad, otras en el número atómico o peso atómico, y algunas en sus propiedades químicas o de toxicidad (DUFFUS., 2002)

Se llama metal pesado a aquel elemento metálico que presenta una densidad superior a 5 g/cm³, aunque a efectos prácticos en estudios medioambientales se amplía esta definición a todos aquellos elementos metálicos o metaloides, de mayor o menor

densidad, que aparecen comúnmente asociados a problemas de contaminación. Algunos de ellos son esenciales para los organismos en pequeñas cantidades, como el Fe, Mn, Zn, B, Co, As, V, Cu, Ni o Mo, y se vuelven nocivos cuando se presentan en concentraciones elevadas, mientras que otros no desempeñan ninguna función biológica y resultan altamente tóxicos, como el Cd, Hg o el Pb.

Estos elementos tienen su origen en el substrato litológico, apareciendo bien como elementos nativos o incorporados normalmente en las estructuras de sulfuros, silicatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos. Los aportes dominantes se producen por deposición atmosférica y afectan de forma significativa a los primeros centímetros de suelo. Son fuentes importantes de metales en suelos las cenizas y escorias de los procesos de combustión de carbón fósil o derivados del petróleo, el aporte directo procedente de actividades agrícolas (adición de fertilizantes, pesticidas, lodos de depuradoras, compost, etc) y su acumulación a partir de residuos industriales, urbanos y mineros (metalurgia, fabricación de pinturas, barnices, disolventes, baterías, textiles, curtidos, etc) (Ortiz Bernad *et al.*, 2007).

Los metales pesados se encuentran de forma natural en rocas, suelos, agua y aire. La concentración de estos metales en suelos y rocas es muy superior a la existente en el agua. Al contrario que en rocas y suelos, donde son insolubles en la mayoría de los casos, los metales pesados presentes en el agua se encuentran en una forma química relativamente disponible para los seres vivos (Mas. y Azcue., 1993).

La dinámica y disponibilidad de los metales están muy influenciadas por las condiciones fisicoquímicas del suelo en el que se encuentran, como el pH y el potencial rédox, mientras que los constituyentes orgánicos e inorgánicos del suelo son los que en gran medida condicionan los mecanismos de retención de metales por adsorción, complejación y precipitación fundamentalmente. Además, las plantas y los microorganismos (bacterias y hongos) del suelo también pueden interaccionar con los metales mediante mecanismos de extracción, estabilización, biosorción, bioacumulación, biomineralización y biotransformación (Lloyd y Macaskie, 2000).

Estos metales se liberan al medio ambiente por fuentes naturales o como consecuencia de las actividades humanas. La principal fuente natural de metales en el medio ambiente es el proceso de erosión de las rocas. En zonas mineralizadas, los metales pesados se encuentran en elevadas concentraciones en el agua, suelos, vegetación. Otras fuentes naturales de metales son las erupciones volcánicas, arrastre de polvo de suelos contaminados, ciertos procesos biológicos, incendios forestales y el rocío marino (Ortiz Bernad *et al.*, 2007)

3.11.- CADMIO

En 1817 el químico y farmacéutico alemán Fridrix Stromeyer descubre el elemento número 48 al analizar algunos medicamentos a base de zinc. El cadmio es un metal que forma parte del grupo IIB de la tabla periódica, con un peso atómico de 112.41 y una densidad de 8,65 g.cm⁻³ con características muy parecidas a las del Zn y el Hg.; la forma iónica del cadmio (Cd²⁺) esta usualmente combinada con formas iónicas del oxígeno (óxido de cadmio CdO₂), cloruro (cloruro de cadmio, CdCl₂) o sulfuros (sulfato de cadmio CdSO₄); Es un elemento metálico que fue llamado cadmio por su descubridor, del vocablo griego *cadmeia*, con que se denominaban a las menas y óxido de zinc. El cadmio sólido es de color blanco, maleable y está constituido por cristales hexagonales.

Se conocen siete isotopos naturales (106, 108, 110, 111, 112, 113, 114 y 116) de los cuales el 113 es el más ávido de electrones. La fuente natural de cadmio en el suelo es la meteorización del material parental y de las rocas que contienen el elemento. En la naturaleza se encuentra asociado con el azufre, como sulfuro de cadmio (CdS) y su contenido varía con la naturaleza del material parental, alto en suelos que provienen de rocas basálticas y bajo en suelos formados por rocas graníticas (Kabata-Pendias. y Pendias., 2001). Aunque se conocen algunos minerales raros del cadmio, son las menas de zinc la fuente industrial de extracción de este metal.

El sulfuro de cadmio, por su color amarillo canario e insolubilidad en agua se emplea como pigmento destinado a la industria textil, papel, caucho y pintura artística. El rojo de cadmio es una mezcla de CdS y CdSe. El litopón es otro pigmento a base de sulfuro de cadmio, sulfuro de zinc y sulfuro de bario, de color crema o marfil. Puesto que en presencia de este elemento la flama se torna azul, se utiliza en la industria pirotécnica. El vidrio color rubí resulta de la combinación del selenio con el sulfuro de cadmio.

Las actividades antropogénicas asociadas a la minería, uso de lodos y fertilizantes fosfatados y riego de cultivos con aguas residuales han sido señaladas como fuentes de ingreso de este metal al suelo (McBride., 1995; Jakub. *et al.*, 2008; Li. *et al.*, 2011). La presencia de Cd en el suelo se determina cualitativamente mediante la precipitación como sulfuro y se le separa del Zn, debido a que es insoluble en los hidróxidos de los metales alcalinos (Herrera., 2002). El Cd liberado de los minerales es rápidamente particionado entre la solución del suelo y las fases minerales y orgánicas, y la movilidad del elemento entre estas fases dependerá de las características físicas, químicas y biológicas del suelo. En el suelo, el Cd se encuentra en diferentes formas.

La distribución y disponibilidad del cadmio en el suelo está determinada por las características físicas, químicas y biológicas de este sistema, dado que influyen sobre la actividad y concentración de este metal en el suelo. El tipo de arcilla, los óxidos e hidróxidos y el contenido de materia orgánica forman parte de la fase sólida del suelo y proporcionan cargas permanentes y variables responsables de la adsorción de este metal. También el pH y el potencial de oxidación son algunos de los factores que afectan la disponibilidad del cadmio en el suelo. Cuando el pH aumenta, la concentración de cadmio en la solución del suelo disminuye (McBride., 1991; Jinadasa *et al.*, 1997; McLaughlin. *et al.*, 2000; Kabata-Pendias. y Pendias., 2001).

Se ha constatado la influencia de las propiedades del suelo en la retención de metales pesados, así como el efecto sinérgico que ejerce la presencia de algunos metales sobre la movilidad de los mismos en el suelo. Por ejemplo se ha encontrado que la

presencia del zinc favorece la movilidad y disponibilidad de cadmio en el suelo (Estévez, 2000).

3.11.1.- Principales industrias y procesos

Los principales usos y aplicaciones del cadmio o sus compuestos son (Ramírez, 2002):

- Como pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho, lacas, etc.
- En aleación con cobre, aluminio y plata.
- En la producción de pilas de cadmio-níquel.
- Como estabilizador de termoplásticos, como el PVC.
- En fotografía, litografía y procesos de grabado.
- Como “endurecedor” de ruedas y llantas de automóvil.
- En fabricación de foto - conductores y células solares fotoeléctricas.
- El electroplatinado.
- En fabricación de “controles” de reactores nucleares.

México es el quinto productor mundial de Cd, cuyos minerales se encuentran generalmente asociados con minerales de Zn, a tal punto que el nivel de producción de Cd está relacionado con la demanda de Zn en los mercados internacionales.

El Cadmio es uno de los mayores agentes tóxicos asociado a contaminación ambiental e industrial, pues reúne cuatro de las características más temidas de un tóxico (Ramírez, 2002):

1. Efectos adversos para el hombre y el medio ambiente.
2. Bioacumulación.
3. Persistencia en el medio ambiente.

4. “Viaja” grandes distancias con el viento y en los cursos de agua.

En lo ambiental, el cadmio es un elemento relativamente raro en la litosfera. Por afinidad química, se le encuentra junto al zinc, en proporción muy variable. Las principales fuentes de contaminación son: la minero metalurgia de metales no ferrosos, la metalurgia del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o “plásticos”, la combustión de aceite y gasolina y las aplicaciones industriales de cadmio. El tiempo de permanencia del cadmio en suelos es de hasta 300 años y el 90% permanece sin transformarse (J, 1999).

El cadmio (como óxido, cloruro o sulfato) se encuentra en el aire en forma de partículas o vapores (proveniente de procesos de alta temperatura). Puede ser transportado largas distancias en la atmósfera para ser depositado (húmedo o seco) sobre la superficie del suelo o del agua. En contaminación ambiental por cadmio son las partículas de polvo de caucho provenientes de las ruedas de automóvil, de la galvanización con zinc de tuberías, de plásticos que contienen pigmentos coloreados de cadmio y de la industria de cerámica glaseada. Se ha descrito intoxicación por uso doméstico de algunos utensilios bañados en cadmio o por usar cubiertos de plata aleada con cadmio y pinturas a base de cadmio (Ramírez, 2002).

La contaminación del agua debida a las actividades humanas ha aumentado en las últimas décadas, constituyendo un peligro potencial para la salud. Existe una preocupación particular por la presencia de metales pesados; en particular el cadmio (Cd), por ser un elemento muy tóxico y persistente (Moreno-Rivas. *et al.*, 2016|).

En el agua el cadmio existe en forma de ión hidratado o como complejo iónico asociado a otras sustancias inorgánicas u orgánicas. Las formas de cadmio solubles se movilizan en el agua. Las formas insolubles son inmóviles y se depositarán en el sedimento donde serán adsorbidas. El Cd llega a los cuerpos de agua proveniente de los desechos industriales, por lixiviación, falta de tratamiento y/o del descuido de la industria minero-metalúrgica, durante la obtención de hierro, acero, aleaciones y metales no ferrosos (Mohammed. *et al.*, 2011; García-Arreola *et al.*, 2015). El uso de

tuberías galvanizadas, los desechos de las industrias que emplean Cd, como baterías Ni-Cd, galvanizados y pigmentos y el escurrimiento de fertilizantes fosfatados, también son una fuente de contaminación importante (Kulkarni y Kaware., 2013).

3.11.2.- Efectos sobre la salud humana

Respirar aire con niveles muy altos de cadmio puede dañar gravemente los pulmones y causar la muerte.

Respirar aire con niveles más bajos de cadmio durante largo tiempo (durante años) produce acumulación de cadmio en los riñones; si ésta alcanza niveles suficientemente altos puede producir enfermedad renal.

Ingerir alimentos o tomar agua con niveles de cadmio muy altos produce irritación grave del estómago, lo que produce vómitos y diarrea y en ciertas ocasiones la muerte.

Ingerir niveles de cadmio más bajos durante un período prolongado puede producir acumulación de cadmio en los riñones. Si se alcanza un nivel suficientemente alto, se producirá daño del riñón.

La exposición a niveles de cadmio más bajos durante un período prolongado puede aumentar la fragilidad de los huesos de manera que se pueden quebrar fácilmente.

Algunos estudios han descrito cáncer del pulmón en trabajadores expuestos a cadmio en el aire y en ratas que respiraron cadmio. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) ha determinado que el cadmio y los compuestos de cadmio son reconocidos como carcinogénicos en seres humanos. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el cadmio es carcinogénico en seres humanos. La EPA ha determinado que el cadmio es probablemente carcinogénico en seres humanos.

Niños expuestos a niveles tóxicos de cadmio probablemente manifestarán efectos similares a los que se observan en adultos (daño del riñón y los pulmones).

En general no se han descrito efectos adversos sobre el desarrollo o el comportamiento en niños expuestos al cadmio, pero se necesitan más estudios. (ATDSR, 2016)

3.12.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS

El término tecnología de remediación implica el uso de cualquier operación unitaria o conjunto de ellas, que altere la composición de un contaminante peligroso a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan su toxicidad, movilidad o volumen en la matriz o material contaminado. Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de residuos peligrosos sin tratamiento y sus posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente. (Sepúlveda. *et al.*, 2005)

3.13.- FACTORES QUE INCIDEN EN LOS PROCESOS DE REMEDIACIÓN

Antes de considerar la aplicación de cualquier tecnología de remediación, es fundamental conocer ciertas características, tanto del suelo (ambientales), como del contaminante y de los organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) presentes en el sitio, con potencial metabólico para degradar los contaminantes. De esta manera, los procesos de remediación dependen de estos tres factores que deben encontrarse en equilibrio (Alexander, 1994; Van Deuren *et al.*, 2002)

3.14.- CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras: con base en su estado de desarrollo (tradicionales e innovadoras), al lugar en donde se realizan (in situ y ex situ) y, en el caso de la contaminación por metales, con base en la

alteración de propiedades del contaminante (separación/inmovilización o disolución/movilización) (Sepúlveda. *et al.*, 2005).

Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento:

- Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
- Tratamientos fisicoquímicos. Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
- Tratamientos térmicos. El tratamiento químico, típicamente involucra reacciones de oxidación-reducción (redox) que convierten químicamente compuestos tóxicos o peligrosos a compuestos menos tóxicos o no peligrosos, que son más estables, menos móviles o inertes (Volke Sepúlveda y Velasco, 2002)

3.15.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS (BIORREMEDIACIÓN)

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía. (Volke Sepúlveda y Velasco, 2002).

Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras. El

proceso de biorremediación incluye reacciones de oxido-reducción, procesos de sorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales.

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse in situ o ex situ, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis *et al.*, 1998). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo (HTP), solventes (benceno y tolueno), explosivos (TNT), clorofenoles (PCP), pesticidas (2,4-D), conservadores de madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)(Van Deuren *et al.*, 1997; Semple *et al.*, 2001).

Entre las tecnologías de biorremediación más comunes son:

- **Bioaumentación:** Consiste en la adición de microorganismos vivos que tienen la capacidad de degradar el contaminante en cuestión y así promover su degradación o biotransformación.
- **Biolabranza:** El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve (labra) periódicamente para favorecer su aireación. Durante la biolabranza el suelo contaminado se mezcla con suelo limpio.
- **Fitorremediación:** Es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar concentrar y/o destruir contaminantes (organicos e inorgánicos) en suelos o sedimentos.

- **Biorremediación en fase sólida (composteo):** El composteo es un proceso biológico mediante el cual es posible convertir residuos orgánicos en materia estable (composta madura, gracias a la acción de diversos microorganismos). El composteo se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con clorofenoles (PCP), gasolinas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), hidrocarburos del petróleo (HTP). Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y toxicidad de explosivos (TNT).

3.16.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN FISICOQUÍMICAS

Como ya se mencionó, los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación (Van Deuren *et al.*, 1997).

Al igual que el resto de las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse in situ o ex situ. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías se aplican in situ. Entre las tecnologías fisicoquímicas para tratamiento in situ, se encuentra la remediación electrocinética (RE), el lavado de suelos (LS), la extracción por solventes (ES), la extracción de vapores (EV) y la solidificación/estabilización (S/E). (Volke Sepúlveda y Velasco, 2002).

Entre las tecnologías fisicoquímicas son:

- **Extracción de vapores (EV):** Es un proceso relativamente que separa físicamente los contaminantes del suelo. Consiste en la extracción de contaminantes del suelo en forma de vapor. Por medio de un sistema de pozos subterráneos se crea un vacío y los contaminantes ascienden a la superficie en forma de vapor o gas. A menudo, además de los pozos de extracción se instalan pozos de inyección de aire para aumentar la corriente de aire y mejorar la tasa de remoción del contaminante. Los

sistemas de extracción de vapores del suelo sirven para retirar contaminantes que tienden a volatilizarse o a evaporarse con facilidad. extraen compuestos orgánicos volátiles y algunos compuestos orgánicos semivolátiles de la zona no saturada del subsuelo, que está arriba de la capa freática (EPA, 1996).

- **Solidificación/estabilización (S/E):** Con esta técnica se pretende conseguir reducir la solubilidad, reactividad o movilidad de los elementos contaminantes mediante modificación de su estado químico o inmovilización física por un agente estabilizante (estabilización); o bien convertir el residuo con el contaminante en un sólido de manipulación sencilla y segura, evitando riesgos de volatilización, lixiviación o fugas (solidificación).
- **Remediación electrocinética (RE):** La remediación electrocinética o electrorremediación es una tecnología innovadora que puede utilizarse para la remediación in situ de suelos contaminados con metales o compuestos orgánicos polares; es una técnica aplicable principalmente a suelos de baja permeabilidad. El principio de la electrorremediación se basa en la aplicación de una corriente directa de baja intensidad a través del suelo contaminado, con el uso de electrodos divididos en extremos anódicos y catódicos. (Volke Sepúlveda *et al.*, 2005).

3.17.- TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN TÉRMICAS

Los tratamientos térmicos ofrecen tiempos muy rápidos de limpieza, pero son generalmente los más caros. Sin embargo, estas diferencias son menores en las aplicaciones ex situ que in situ. Los altos costos se deben a los costos propios para energía y equipos, además de ser intensivos en mano de obra. Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos incluyen la destrucción, separación e inmovilización de contaminantes. Los procesos

térmicos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad (separación), quemado, descomposición (destrucción) o fundición de los contaminantes (inmovilización). (Volke Sepúlveda y Velasco, 2002).

Entre las tecnologías térmicas son:

- **Desorción térmica (DT):** Esta técnica consiste en calentar la tierra a 90-540 °C con el fin de que los contaminantes con un punto de ebullición bajo se evaporen y por consiguiente, se separen del suelo. Los contaminantes vaporizados se recogen y se tratan generalmente con un sistema de tratamiento de emisiones a la atmosfera. (Volke Sepúlveda y Velasco, 2002).
- **Incineración:** En los procesos de incineración tanto in situ como ex situ, se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870 a los 1,200 °C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno. Generalmente se utilizan combustibles para iniciar el proceso de combustión. Las eficiencias de remoción y destrucción de los incineradores operados adecuadamente exceden el 99.99%. Sin embargo, los gases de combustión generalmente requieren de tratamiento. Existen diferentes tipos de incineradores (Van Deuren *et al.*, 1997).

3.18.- ELECTORREMEDIACIÓN

La electrorremediación es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa. Para la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente directa, se requiere el empleo de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales son colocados en pozos excavados en el suelo, usualmente estos se humectan con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite

transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento. (De la Rosa- Pérez *et al.*, 2007a)

3.19.- PRINCIPIO BÁSICO DE LA ELECTORREMEDIACIÓN

El principio en que se basa la electrorremediación es la electrólisis, proceso en que las reacciones redox sólo tienen lugar si se les suministra energía por medio de una corriente eléctrica aplicada desde el exterior, que significa separación por electricidad. La electrólisis se realiza en las celdas electrolíticas, que son unos depósitos que contienen el electrolito disuelto o fundido y dos electrodos. Los electrolitos disueltos o fundidos conducen la corriente eléctrica por medio de los iones positivos y negativos, al mismo tiempo que se produce algún cambio químico en los electrodos (Granada Laso, 2011).

3.20.- MECANISMOS DE REMOCIÓN

Los mecanismos principales por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, electroósmosis y electroforesis. Siendo los dos primeros los que ejercen la mayor influencia en el transporte del contaminante. A continuación se describe cada uno.

Electromigración: Es un fenómeno en el cual los iones en solución y los coloides que tienen carga eléctrica se mueven a través del campo eléctrico con una velocidad que es proporcional al producto de la fuerza del campo eléctrico y la movilidad del ión o partícula.

Electroósmosis: Es un fenómeno de transporte en el cual el líquido saturante junto con las sustancias que se suspenden en él (coloides con y sin carga eléctrica), fluyen hacia uno de los electrodos (normalmente hacia el cátodo) (Virkyute *et al.*, 2002).

Electroforesis: Este mecanismo se observa cuando hay partículas o coloides con carga eléctrica, de forma que los contaminantes ligados a este material particulado pueden ser transportados por el campo eléctrico. (Virkyute *et al.*, 2002).

3.21.- FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE ELECTORREMEDIACIÓN

La electrorremediación es una técnica que aparenta ser sencilla, sin embargo existen varios factores fisicoquímicos que influyen en el transporte de los contaminantes, y por ende en una efectiva remediación del suelo contaminado; los factores de mayor importancia se explican a continuación.

pH. Los cambios de pH promueven reacciones de los metales con otras sustancias que se encuentran en el suelo de forma natural, este factor regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electrorremediación (cita). La hidrólisis del agua produce una disociación que genera iones hidrógeno (H^+) en el ánodo e iones hidroxilo (^-OH) en el cátodo, liberando oxígeno e hidrógeno respectivamente.

Contenido de agua. El movimiento del electrolito por electroósmosis es función del contenido de agua; por lo tanto, el grado de saturación del suelo es un factor indispensable para llevar a cabo el proceso electrocinético. Una distribución irregular de humedad en el suelo contaminado puede observarse durante la electrorremediación, ya que el electrolito se mueve hacia uno de los electrodos, incrementando la humedad en este y disminuyéndola en el electrodo contrario. Esta disminución está asociada con el desarrollo de poros de presión negativos, variaciones en el pH y por lo tanto en la fuerza del campo eléctrico, lo cual resulta en tasas de flujo electroosmótico irregulares (Lindgren *et al.*, 1994; S., 1997).

Por tanto es necesario mantener una humedad adecuada agregando electrolito a la misma tasa electroosmótica a la que es drenado del sistema. Por otro lado, un

contenido bajo de agua puede generar la sequedad del suelo, debido a efectos de calentamiento o al desarrollo de algunas reacciones químicas exotérmicas (Shapiro y Probstein, 1993).

Conductividad eléctrica: La conductividad eléctrica es diferente para cada tipo de suelo, está definida como la capacidad de un medio o espacio físico de permitir el paso de la corriente eléctrica. Para conocer la conductividad eléctrica de un suelo, es necesario ponerlo en suspensión acuosa y medirla con un conductímetro. En electrorremediación, los cambios de pH del suelo modifican la conductividad global del medio por lo que se forman perfiles de voltaje.

En algunos experimentos con suelos industriales contaminados, la conductividad del suelo se incrementa con el tiempo, debido a la penetración de los frentes ácido y alcalino, así como por la solubilización de las especies iónicas ya sea como resultado de los cambios de pH.

Naturaleza y química del suelo: La electrorremediación se ha probado exitosamente en ensayos de laboratorio con suelos de granulometría muy fina (limos y arcillas) y baja permeabilidad. También puede ser aplicada en suelos arenosos, siempre y cuando exista un horizonte impermeable debajo del suelo contaminado, el cual impedirá que el electrolito drene a estratos más profundos (Virkytyte *et al.*, 2002).

En la cinética de remoción del contaminante influyen las siguientes características del suelo: la capacidad de adsorción, intercambio iónico y de amortiguamiento del pH; en el caso de suelos arcillosos y limosos, estos ofrecen mayor superficie de contacto, por lo que los metales y sustancias iónicas (sulfato, nitrato, amonio) pueden ser adsorbidos con mayor facilidad en sus superficies, lo cual dificulta su remoción (Ravera *et al.*, 2006). Un suelo electrorremediado generalmente tiende a acidificarse y a disminuir o perder su contenido de sales inorgánicas como nitrato, fosfato y sulfato, por lo que se pudiera reducir o nulificar su fertilidad.

Naturaleza del contaminante: La especie química de los contaminantes es un factor que influye fuertemente sobre la eficiencia de la técnica. Los contaminantes pueden existir como sólidos precipitados, solutos disueltos, adsorbidos a partículas del suelo o sorbidas en materia orgánica. En la actualidad las especies químicas son evaluadas por extracción secuencial o lixiviación selectiva y se ha demostrado que las formas intercambiables migran con mayor rapidez que las absorbidas en la materia orgánica o en la fracción residual (Kim y Kim, 2001; Reddy *et al.*, 2001; Suer *et al.*, 2003; Turer y Genc, 2005).

3.22.- CELDAS DE ELECTROQUÍMICAS

3.22.1.-TIPOS DE CELDAS

La electroquímica es la interrelación que se establece entre los sistemas químicos y los sistemas eléctricos, cuando ambos fenómenos inciden en un proceso.

Las celdas electroquímicas se pueden clasificar, en tres tipos muy generales: celdas galvánicas o voltaicas, celdas electrolíticas:

En una celda galvánica, la reacción electroquímica acontece de manera espontánea y la energía química se transforma en energía eléctrica. Esto dedebe a que uno de los analitos es un reductor (un donador redox) con un pK_r menor al que tendrá el otro analito que es un oxidante (un aceptor redox) con un pK_r mayor comparativamente, sobre una escala de pe .

En una celda electrolítica la reacción electroquímica se lleva a cabo por la imposición externa de un voltaje mayor al del potencial reversible de celda. También es posible la imposición de una corriente de electrólisis que permita la transformación electroquímica de los analitos en el medio. Este tipo de celdas se utilizan en la electrosíntesis de diversos compuestos, en el análisis de parámetros fisicoquímicos o bien, en la dilucidación de mecanismos de reacción (Baeza Reyes y García Mendoza, 2011).

En ambas celdas, el electrodo en el que ocurre la reducción se llama cátodo; mientras que el electrodo en el que ocurre la oxidación se llama ánodo. Por tanto, para que se lleve a cabo la reacción electroquímica se debe provocar una perturbación de carácter eléctrico y como consecuencia se obtiene una respuesta de tipo eléctrico, de donde se obtiene información del compuesto analizado y los procesos de reacción en la interfase conductor sólido – disolución que acompañan a la reacción.

IV.- MATERIALES Y MÉTODOS

La Comarca Lagunera se ubica entre los paralelos 24° 22' y 26° 23' de latitud norte y entre los meridianos 101° 41' a 104° 61' de longitud oeste, tiene una superficie de 47887 km², una altitud media de 1100 m, una extensión montañosa y una superficie plana donde se localiza el área agrícola. Su clima es seco desértico, con lluvias en verano e invierno fresco, la precipitación pluvial media anual es 258 mm y la evaporación media anual es 2000 mm, por lo cual la relación precipitación - evaporación es 1:10; la temperatura media anual es 21 °C con máxima de 33.7 °C y mínima 7.5 °C.

4.1.- Localización geográfica de los sitios de muestreo

Las muestras fueron tomadas de la Plaza de la tortuga que se ubica en la ciudad de Torreón, Coahuila, con ubicación en las siguientes

coordenadas; 25°32'6"N 103°25'50"W; Torreón, Coah; Latitud: 25°32'38" N

Longitud: 103°25'08" O

Altitud sobre el nivel del mar: 1124 m.

4.2.1.- Procedimiento de recolección de muestras

Recolección de muestra

Se tomaron muestras de suelo en 5 puntos de la plaza con profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm. Las muestras de suelo se colocaron en bolsas de plástico donde se identificaron por secciones y profundidad, y fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro UL donde se realizó el análisis inicial y remediación del suelo contaminado. En total 15 muestras con el objetivo de evaluar la técnica de electrorremediación del suelo contaminado.

4.2.2.- Análisis inicial del suelo.

Se secaron las muestras del suelo por 24 horas; se tamizó el suelo en una malla de 2mm y se tomó 1kg de cada sección con las profundidades de 0-20 y 20-40 cm.

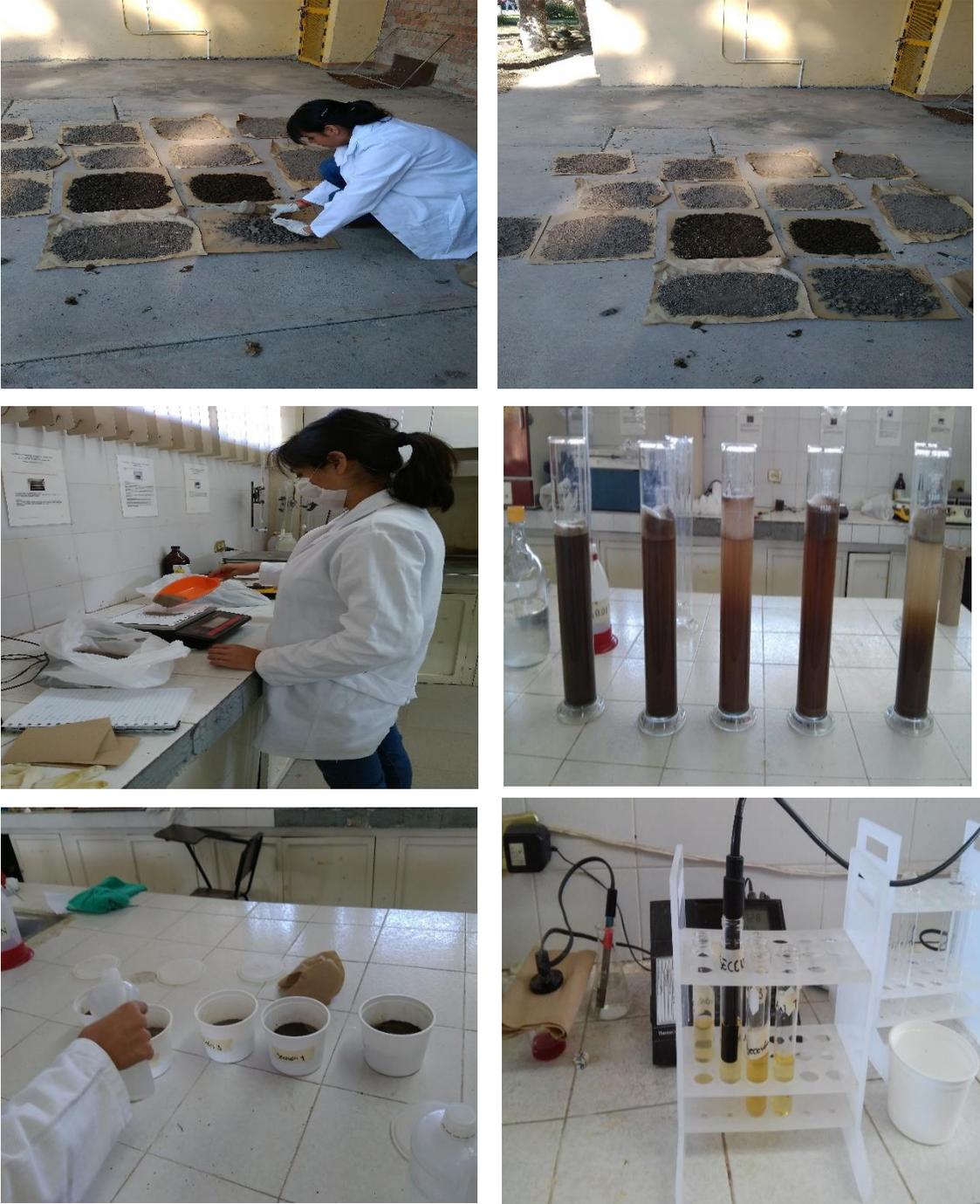


FIG 1. Análisis iniciales de suelo.

Muestras	Textura	% M.O	Ph	C.E	Ca +Mg	Ca	Na
1	Franco arcilloso	7.1	8.26 Medianamente alcalino	2.18 mS/cm	4 Meq/lto	3.6 Meq/lto	17.8 Meq/lto
2	Franco	1.7	8.01 Medianamente alcalino	4.43 mS/cm	12.4 Meq/lto	4.8 Meq/lto	31.9 Meq/lto
3	Franco	3.3	8.31 Medianamente alcalino	1.9 mS/cm	8 Meq/lto	5.6 Meq/lto	11.7 Meq/lto
4	Franco	1.7	7.76 Medianamente alcalino	2.18 mS/cm	8 Meq/lto	5.6 Meq/lto	13.8 Meq/lto
5	Franco	3.0	8.25 Medianamente alcalino	2.16 mS/cm	8.8 Meq/lto	6 Meq/lto	12.8 Meq/lto

Tabla 1. Análisis iniciales del suelo

4.2.3.- Análisis de muestras en el laboratorio

Tras la recolección de las muestras se prosiguió a analizar en el laboratorio de suelos, cada muestra fue analizada mediante la terminación de Cadmio por el método de espectrofotometría de absorción atómica, Perkin Elmer 2380 que se encuentra en el laboratorio de suelo.

4.2.4.- Procedimiento para la digestión.

Secar y tamizar en malla de 2 mm la muestra de suelo

Pesar 5 gr d suelo y colocarlos en botes de plástico con tapón

Agregar 50 ml de ácido nítrico 4 molar y marcar el nivel del líquido.

Colocarlo en baño María 12 horas a 70°C

Sacarlo del baño María y dejarlo a temperatura ambiente y nivelar el líquido

Agitar por 1 hora

Filtrar y recoger filtrado

Analizarlo por absorción atómica.



FIG 2. Procedimiento para la digestión

4.2.5.- Contaminación y remediación del suelo

Se realizaron un total 10 experimentos.

Se preparó una solución estándar de 1000 ppm de cadmio utilizando como solvente agua destilada y ácido acético 0.1M.

Se agregó a la celda de electroremediación 1kg de suelo mezclado de los 5 puntos muestreados obteniendo una muestra compuesta, contaminado el suelo con la solución estándar, humectándola hasta un punto de saturación. Posteriormente se conectó la celda a una fuente de poder modelo BK Precision multirango de corriente directa de 0-60V y 0-10 A, y un multímetro modelo UNI-T UT33A. La celda de electroremediación tiene una medida de 20 x 10 x 5 cm obteniendo un volumen de 1000cm³.

Se aplicó una diferencia de potencial de 20 y 40 V, durante un tiempo de remediación de 24 horas.



FIG 3. Solución estándar 1000ppm de Cd, Contaminación y electroremediación del suelo.

Después de la remediación se dividió la celda en 4 partes y se tomaron muestras, que posteriormente se secaron en la estufa Felisa a una temperatura de 105°C, se tamizaron las muestras de suelo en una malla de 2mm para hacer la digestión.



FIG 4. Muestras de suelo y tamizadas

4.2.6.- Procedimiento para la digestión

Secar y tamizar en malla de 2 mm la muestra de suelo

Pesar 5 gr d suelo y colocarlos en botes de plástico con tapón

Agregar 50 ml de ácido nítrico 4 molar y marcar el nivel del líquido.

Colocarlo en baño María 12 horas a 70°C

Sacarlo del baño María y dejarlo a temperatura ambiente y nivelar el líquido

Agitar por 1 hora

Filtrar y recoger filtrado

Analizarlo por absorción atómica.





FIG 5. Procedimiento para la digestión para análisis de concentración de cadmio en suelo.

Tabla 2. Condiciones Experimentales para cada Tratamiento

Experimento	Potencia	Contaminante	Tiempo
		Solución estándar 1000 ppm	
B	20 V, 1 A	Cd	24 horas
C	20 V, 1 A	Cd	24 horas
D	20 V, 1 A	Cd	24 horas
E	20 V, 2 A	Cd	24 horas
F	20 V, 2 A	Cd	24 horas
G	40 V, 1 A	Cd	24 horas
H	40 V, 1 A	Cd	24 horas
I	40 V, 2 A	Cd	24 horas
J	40 V, 2 A	Cd	24 horas

Tabla 2. Condiciones Experimentales para cada Tratamiento

V.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración inicial de Cadmio en suelo: 136 ppm (limite dentro de la norma)

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
B1	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1373.68
B2	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1136.84
B3	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1160.52
B4	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1350

Tabla 3. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada (Experimento B).

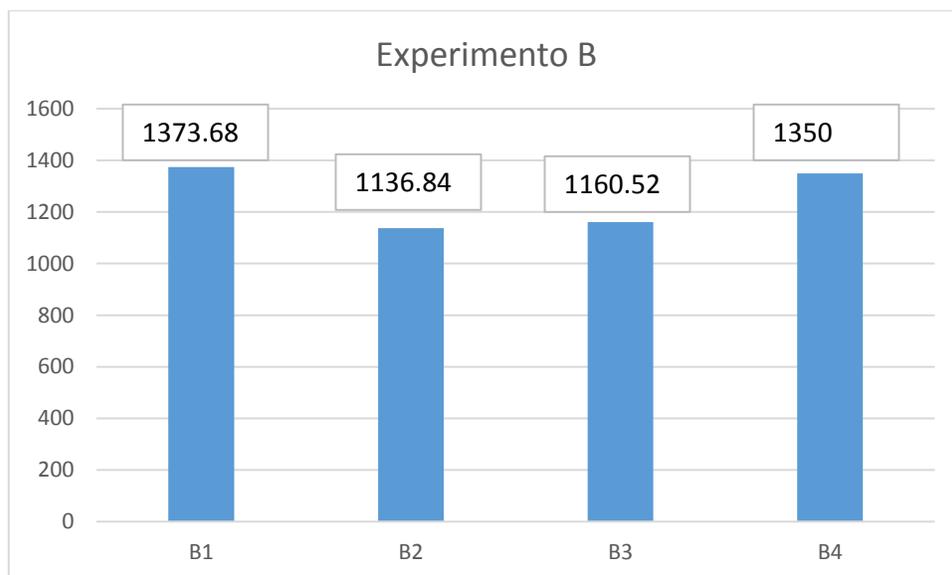


FIG 6. Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada.

En la figura 6, el experimento B presenta la concentración inicial del cadmio con respecto a la final, la sección B4 tiene mayor acumulación del metal con 1350 ppm, mientras que en la sección B1 la concentración disminuyó a 1278 ppm. En este experimento se aplicó una corriente de 20 V y 1 A, utilizando agua destilada.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
C1	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1326.31
C2	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1326.31
C3	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1302.63
C4	Cd	20	1	24 HRS	Agua destilada	1326.31

Tabla 4. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada. (Experimento C)

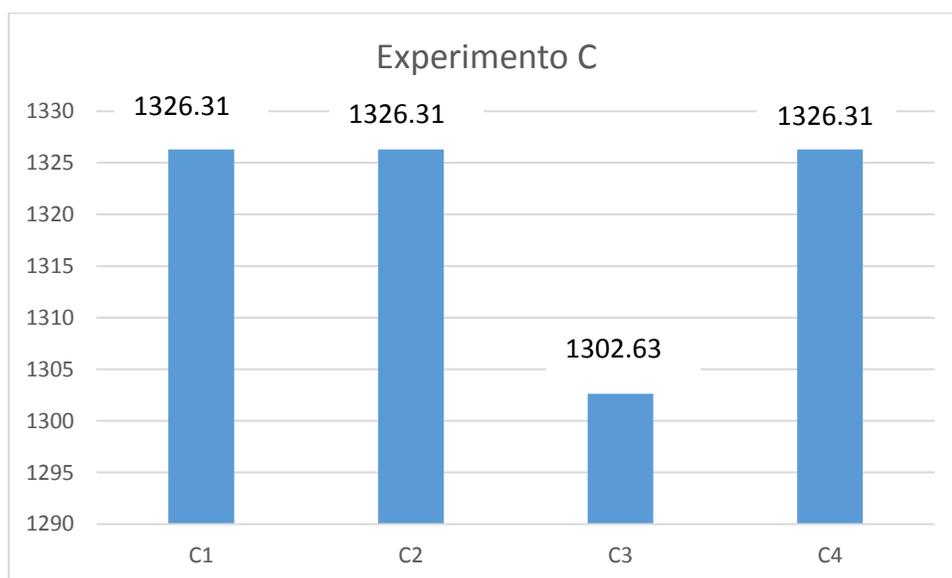


FIG 7. Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente agua destilada.

La figura 7. Experimento C, el Cd se mantuvo con la misma concentración de 1326 ppm en las secciones C1, C2 y C4, mientras que en la sección C3 la concentración del metal es disminuyó a en 1302 ppm. En este experimento se aplicó una corriente de 20 V y 1 A, utilizando agua destilada.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
D1	Cd	20	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1207.89
D2	Cd	20	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1255.26
D3	Cd	20	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1255.26
D4	Cd	20	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1278.94

Tabla 5. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente ácido acético (Experimento D).

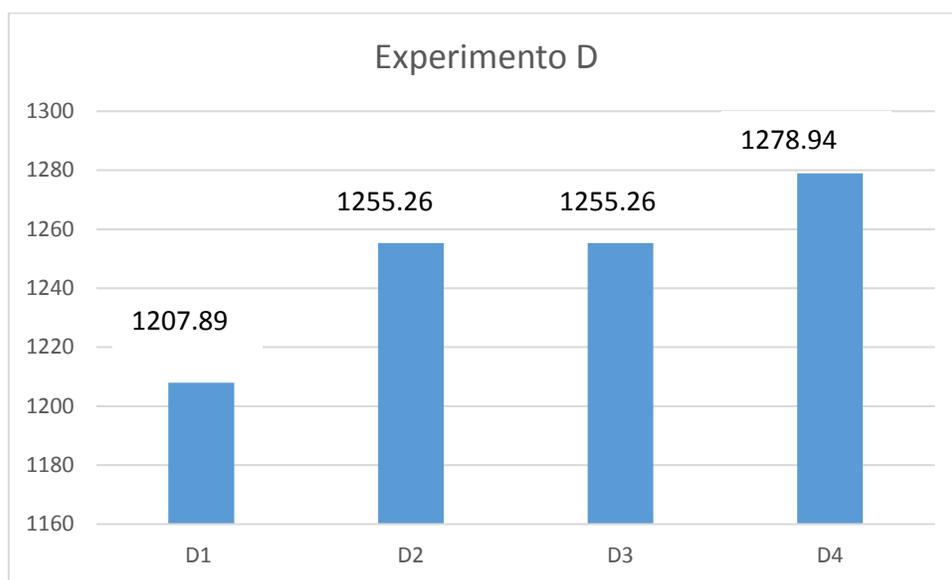


FIG 8. Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 1 A utilizando como solvente ácido acético.

La figura 8. Experimento D, la concentración inicial de la sección D1 tiene menor acumulación de Cadmio con 1207 ppm, el metal se movilizó en las demás secciones acumulando una concentración mayor de 1278 ppm de Cd en la sección D4. El experimento aplicó el mismo voltaje y amperaje que los experimentos B y C, pero con diferente solvente, utilizando ácido acético.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
E1	Cd	20	2	24 HRS	Agua destilada	1231.57
E2	Cd	20	2	24 HRS	Agua destilada	1231.57894
E3	Cd	20	2	24 HRS	Agua destilada	1278.94
E4	Cd	20	2	24 HRS	Agua destilada	1350

Tabla 6.- suelo electrorremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente agua destilada (Experimento E)

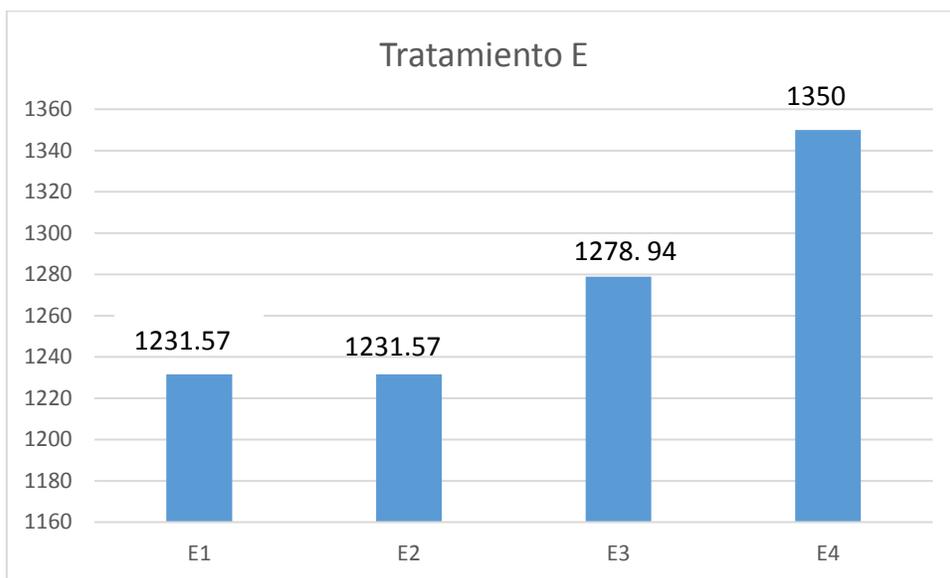


FIG 9. Ppm de Cd en suelo electrorremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente agua destilada.

La figura 9. Experimento E, muestra que la concentración del metal se movilizó de la sección E1 región anódica hacia las demás secciones aumentando su concentración en sección E4 de la región catódica con 1350 ppm. El experimento se realizó con una corriente de 20 V y 2 A, utilizando agua destilada.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
F1	Cd	20	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1231.57
F2	Cd	20	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1231.57
F3	Cd	20	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1278.94
F4	Cd	20	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1350

Tabla 7. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente ácido acético (Experimento F)

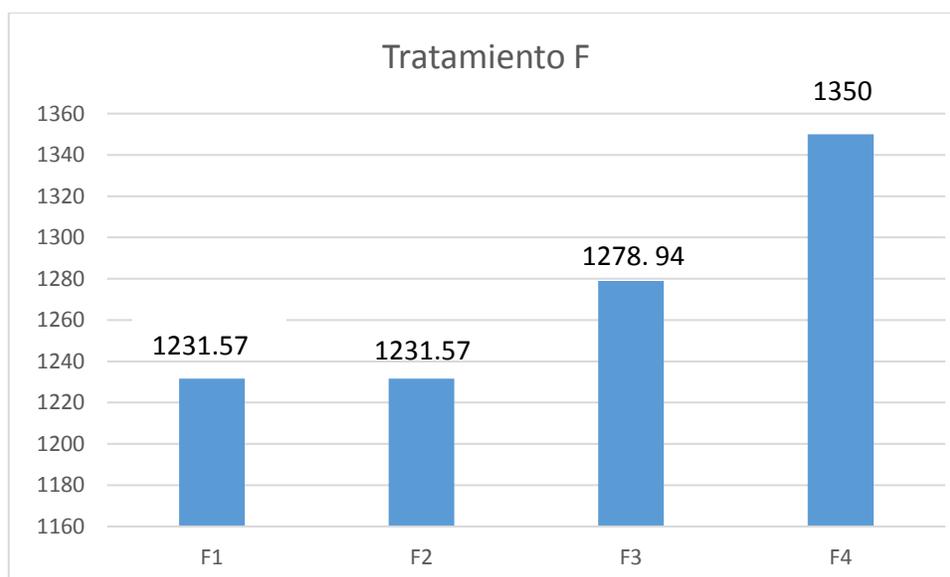


FIG 10 Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 20 V, 2 A utilizando como solvente ácido acético.

La figura 10. Experimento F, muestra que la concentración del metal se movilizó de la sección F1 región anódica hacia las demás secciones aumentando su concentración en sección F4 de la región catódica con 1350 ppm. El experimento se realizó con una corriente de 20 V y 2 A, utilizando ácido acético.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
G1	Cd	40	1	24 HRS	Agua destilada	1207.89
G2	Cd	40	1	24 HRS	Agua destilada	1255.26
G3	Cd	40	1	24 HRS	Agua destilada	1184.21
G4	Cd	40	1	24 HRS	Agua destilada	1255.26

Tabla 8. Suelo electroremediado en una celda con voltaje 40 V, 1 A utilizando como solvente agua. (Experimento G)

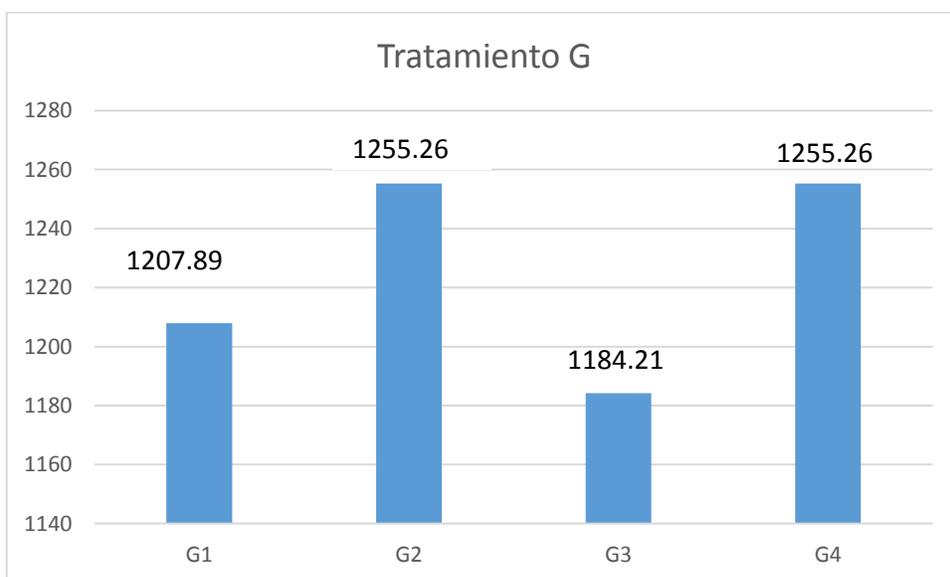


FIG 11 Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje 40 V, 1 A utilizando como solvente agua.

En la figura 11. Experimento G muestra una variación de concentración en todas las secciones presentando mayor acumulación del Cd en las secciones G2 y G4 con una concentración de 1255 ppm mientras que en la sección G3 hay menor concentración de 1184 ppm. Este experimento se realizó aplicando un voltaje de 40 y 1 A, y como solvente agua destilada por un tiempo de 24 horas.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
H1	Cd	40	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1539.47
H2	Cd	40	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1302.63
H3	Cd	40	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1302.63
H4	Cd	40	1	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1231.57

Tabla 9. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 1 A utilizando un solvente de ácido acético (Experimento H)

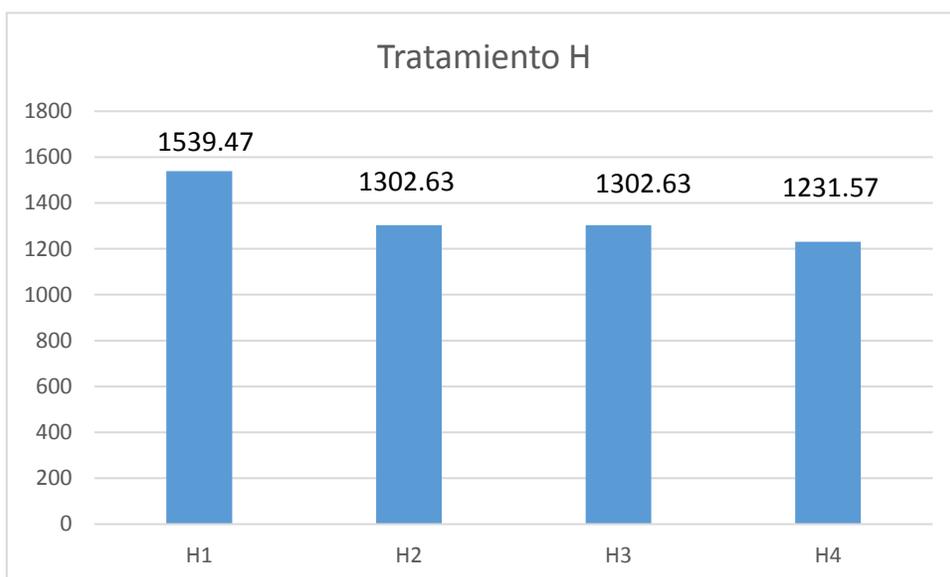


FIG 12 Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 1 A utilizando un solvente de ácido acético.

La figura 12 muestra un comportamiento puesto, en la sección H4 hay menor acumulación de Cadmio con 1231 ppm, el metal electro emigró hacia las demás secciones acumulando mayor concentración en la sección H1 con 1539 ppm. Este experimento se realizó aplicando un voltaje de 40 y 1 A, y como solvente ácido acético.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
I1	Cd	40	2	24 HRS	Agua destilada	1184.21
I2	Cd	40	2	24 HRS	Agua destilada	1207.89
I3	Cd	40	2	24 HRS	Agua destilada	1539.47
I4	Cd	40	2	24 HRS	Agua destilada	1136.84

Tabla 10. Suelo electrorremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A utilizando un solvente de agua destilada (Experimento I)

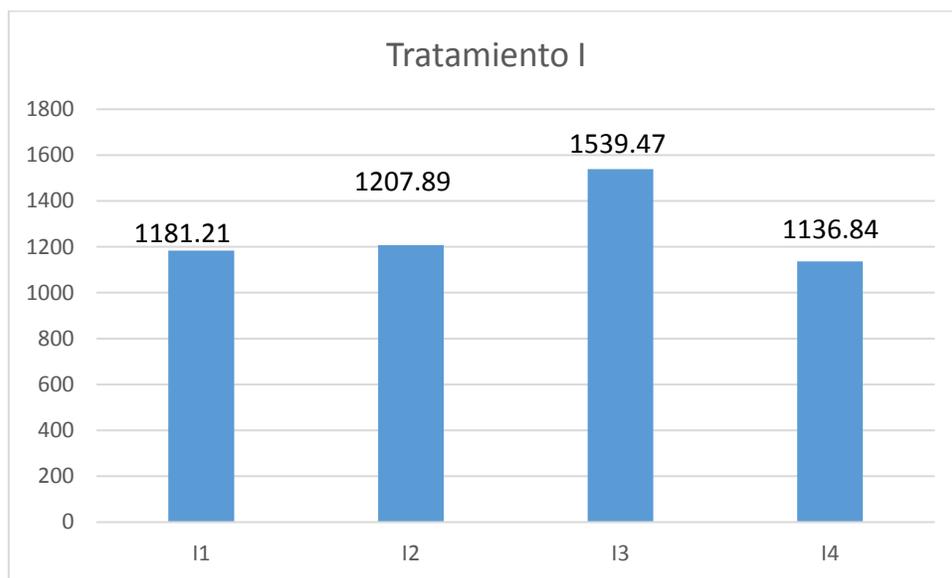


FIG 13. Ppm de Cd en suelo electrorremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A utilizando un solvente de agua destilada.

La figura 13. Experimento I, presenta una variación de concentración de remoción de Cd, en la sección I3 de la región catódica hay mayor concentración con 1539 ppm y en sección I1 de la región anódica hay menor concentración de 1184 ppm de Cd. el experimento se realizó con un voltaje de 40 y 2 Amper, utilizando agua destilada.

Muestra	Metal	V	A	Tiempo	Solvente	ppm
J1	Cd	40	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1231.57
J2	Cd	40	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1278.94
J3	Cd	40	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1231.57
J4	Cd	40	2	24 HRS	Ac. Acético 0.1 M	1207.8

Tabla 11. Suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A por 24 utilizando un solvente ácido acético (Experimento J)

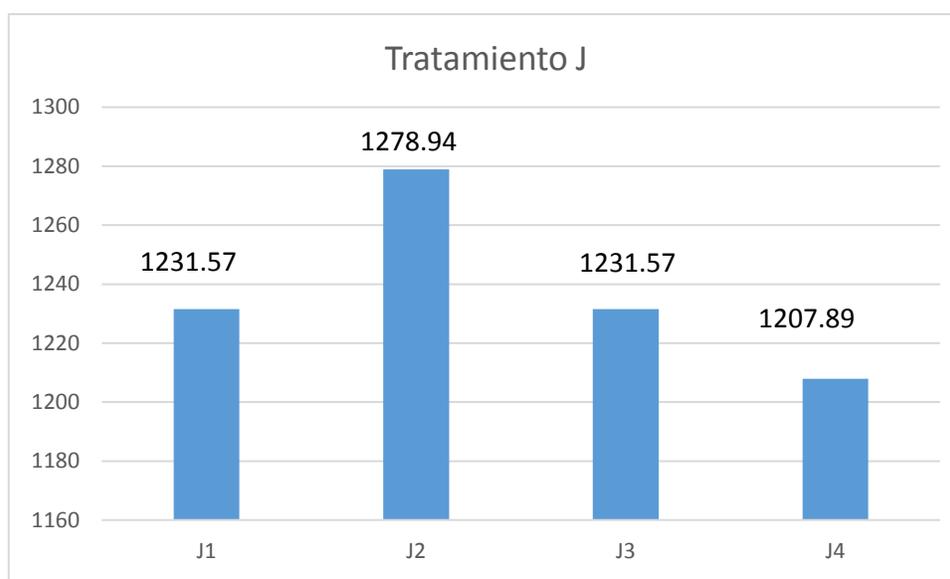


FIG 14 - Ppm de Cd en suelo electroremediado en una celda con voltaje de 40 V, 2 A por 24 utilizando un solvente ácido acético.

La figura 14. Experimento J, la concentración del cadmio se acumuló en la sección J2 en la región del ánodo con 1278 ppm y disminuyó en la sección J4 de la región del cátodo con 1207 ppm. El experimento se realizó con un voltaje de 40 y 2 Amper, utilizando ácido acético.

DIFERENCIA ENTRE SECCIONES DENTRO DE CADA EXPERIMENTO EN LA CELDA

Con base en los resultados obtenidos del presente proyecto de investigación se determinó que se obtuvo una remoción de Cd en todos los experimentos, el experimento B de acuerdo a cada una de las secciones hubo una variación donde la sección B1 y B4 tuvo una diferencia de 72 ppm donde se trabajó con un voltaje de 20 y 1 amper, utilizando como solvente agua destilada con un tiempo de 24 horas. En el experimento C de acuerdo a cada uno de las secciones hubo una variación donde la sección C3 hubo una remoción hacia al ánodo de la sección C1 que tuvo una diferencia de 24 ppm donde se trabajó con un voltaje de 20 y 1 amper utilizando como solvente agua destilada con un tiempo de 24 horas. En el experimento D de acuerdo a cada una de las secciones, la sección D4 del cátodo tuvo mayor acumulación que en la sección D1 del ánodo con una diferencia de 71 ppm, se trabajó con un voltaje de 20 y 1 amper, utilizando como solvente ácido acético con un tiempo de 24 horas. En el experimento E , la concentración de Cadmio en la sección E1 del ánodo se removió hacia el cátodo de la sección E4 donde tuvo una diferencia de 119 ppm, se trabajó con un voltaje de 20 y 2 amper, utilizando como solvente agua destilada con un tiempo de 24 horas. En el experimento F muestra que la sección F1 del ánodo tuvo una remoción del Cadmio hacia el cátodo de la sección F4 que tuvo una diferencia de 119 ppm, se trabajó con un voltaje de 20 y 2 amper, utilizando como solvente ácido acético con un tiempo de 24 horas. En el experimento G de acuerdo a cada una de las secciones tuvo variación, donde la sección G4 muestra una mayor concentración que la sección G3 que tuvo una diferencia de 71 ppm, se trabajó con un voltaje de 40 y 1 amper, utilizando como solvente agua destilada con un tiempo de 24 horas. En el experimento H de acuerdo a cada uno de las secciones fue el que dio mejor resultado, con un comportamiento opuesto al experimento D, E Y F, en estos experimento la concentración disminuye desde el ánodo y en el experimento H disminuye desde el cátodo, el metal se removió de la sección H4 hacia la sección H1, donde tuvo una diferencia de 308 ppm, se trabajó con un voltaje de 40 y 1 amper, utilizando como solvente ácido acético con un tiempo de 24 horas. En el experimento I de acuerdo a

cada una de las secciones tuvo variación de concentración, donde en la sección I3 del cátodo hay mayor acumulación que la sección I1 de la región del ánodo con una diferencia de 359 ppm, se trabajó con un voltaje de 40 y 2 amper, utilizando como solvente agua destilada con un tiempo de 24 horas. En el experimento J la concentración de la sección J2 en la región anódica muestra una mayor acumulación mientras que en la sección J4 hay menor concentración de Cd, con una diferencia de 71 ppm, el experimento se trabajó con un voltaje de 40 y 2 amper, utilizando como solvente agua destilada con un tiempo de 24 horas.

Algunos autores señalan que hay factores que influyen en la electroremediación, como el solvente utilizado, el pH, y la conductividad eléctrica. Según M. Alexander 1994 dice que el pH determina el grado de adsorción de iones en las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (M. Alexander, 1994) La solubilidad de los contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente disminuye su movilidad con valores altos de pH.

Se destaca que el pH difícilmente se controla en un experimento de remediación electrocinética, debido al fenómeno de electroósmosis, que promueve un flujo desde el ánodo hacia el cátodo. (Shapiro y probsten, 1993) dicen que una remoción exitosa dependerá de mantener el contaminante inorgánico en solución evitando los cambios súbitos de pH; en el caso de algunos contaminantes orgánicos (como ácidos y fenoles, entre otros) las condiciones óptimas de remoción serán aquellas en las que el pH logra desplazar el equilibrio de disociación de la sustancia hacia la forma disociada.

En los experimentos realizados se aplicó una corriente de 20 y 40 voltios con Amperajes de 1 y 2, con un periodo de remediación de 24 horas, en algunos estudios se demuestra que al aplicar una corriente directa de 20 V, con una remediación del suelo por 24 horas, es posible la remoción de varios contaminantes metálicos presentes en una muestra de un suelo real, a pesar de las interacciones presentes (matriz porosa-contaminante). García Hernández realizó un estudio y comprobó que

la variación de la concentración de Cd presenta una remoción de este elemento prácticamente en las secciones de suelo de los experimentos.

En el experimento I del estudio de remediación del suelo, utilizando ácido acético alcanzó un 22 % de remoción (7 ppm) para Cd.

Los experimento realizados, en los tratamientos E, F se pudo comprobar que la variación de la concentración del Cadmio disminuyó en las secciones E1 Y F1 de la celda, aumentando la concentración en las secciones E4 Y F4 utilizando el solvente agua destilada y ácido acético con la misma corriente eléctrica de 20 volts y 2 A, que se aplicó en el estudio de electroremediación de suelos contaminados.

En otro estudio realizado por (Reyes Cuella y Vazquez, 2009), en los tratamientos para la electroremediación de cadmio en suelo, aplicó corrientes de 30 y 40 V con un periodo de remediación de 5 días. Las condiciones óptimas de este sistema, a escala laboratorio, se encontraron aplicando 30 voltios durante un tiempo de 5 días, al estéril humectado previamente con agua desionizada al 30% durante 24 horas. El tratamiento electroquímico aplicado permitió la recuperación de dos terceras partes del residuo estéril de carbón, que de ese modo se revalorizó con posibilidades de ser usado en otras aplicaciones.

En el experimento H con una corriente eléctrica de 40 V, 1 A, utilizando ácido acético con un tiempo de remediación de 24 horas, presento remoción del Cadmio en la sección H4 de la región anódica acumulando mayor concentración en sección H1 de la región catódica presentando una de remoción de 308 ppm. Se demostró que si es posible la remoción del Cadmio, aplicando un voltaje de 40 y el tiempo de tratamiento.

VI. CONCLUSIÓN

Con base a los resultados obtenidos en el proyecto de investigación, se obtuvo una remoción de Cd en todos los experimentos, mostrando mejores resultados en los experimentos E, F y H, aplicando un potencial de 20 y 40 V con un tiempo de remediación de 24 horas, utilizando los solventes agua destilada y ácido acético.

La diferencia de concentración de Cd en los experimentos es de 119 y 308 ppm (mg/kg), La mayor diferencia entre la sección con menor concentración y la de mayor concentración fue en el experimento H, con un voltaje de 40 V y 1 Amper, utilizando como solvente ácido acético con un tiempo de 24 horas.

La concentración del experimento H todavía se encuentra fuera del límite de la norma 147-SEMARNAT-SSA1-2004. Es posible que la remoción del contaminante sea más eficiente si aplicamos más tiempo de remediación en los tratamientos.

Experimentos	Secciones	Diferencia entre secciones dentro de la celda
B	B4=1350 ppm B1= 1278 ppm	72 ppm
C	B1=1326 ppm B3= 1302 ppm	24 ppm
D	B4= 1278 ppm B1=1207 pmm	71 ppm
E	E4= 1350 ppm E1= 1231 ppm	119 ppm
F	F4= 1350 ppm F1= 1231 ppm	119 ppm
G	G4= 1255 ppm G3= 1184 ppm	71 ppm
H	H1=1539 ppm	308 ppm

	H4= 1231 ppm	
I	I3= 1539 ppm	358 ppm
	I1= 1181 ppm	
J	J2 =1278 ppm	71 ppm
	J4 = 1207 ppm	

Tabla 12. Diferencia entre secciones dentro de la celda

La electrorremediación tiene un gran potencial para descontaminar diversos tipos de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos en un amplio rango de concentraciones. Las condiciones de muestreo, preparación y análisis iniciales permitieron controlar factores externos que influyen en los resultados del proceso. Aunque en diversos estudios, tanto de laboratorio como de campo se han obtenido buenos resultados, todavía es necesario avanzar en las investigaciones para tener un mejor entendimiento de los fenómenos de transporte involucrados.

VII. LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1994. "Biodegradation and Bioremediation." Academic Press, San Diego.: 302.
- Alvarado, J. 2005. "Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. ." *Agronomía Costarricense* 29(1): 85-94.
- ATDSR 2016. "Cadmio (Cadmium)." Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades.
- Baeza Reyes, A. y A. García Mendoza 2011. "Principios de electroquímica analítica." UNAM.
- Bornemisza, E. 1982. "Introducción a la Química de Suelos." Universidad de Costa Rica, San José Costa Rica, Secretaría General de la Organización de los Estados Unidos Americanos Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Monografía 25: 21-47.
- Carrillo., J. L. R. y R. O. Gallard 2012. "Utilización de las abejas melíferas para monitorerar metales pesados en el aire." *Apicultura sin fronteras.*: 2-5.
- De la Rosa- Pérez, D., A. , M. Teutli-León, M. y M. Ramírez-Islas, E. 2007a. "Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo." *Rev. Int. Contam. Ambient* 23(3): 129-138.
- De la Rosa- Pérez, D. A., et al , M. Maura, Teutli-León y M. E. Ramírez-Islas 2007b. "Electrremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo."
- DOF 2004. "Nom-147-SEMARNAT-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/o vanadio." Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- DUFFUS., J. H. 2002. "Heavy metals a meaningless term?".
- EPA 1996. "Guía del ciudadano: La extracción de vapores del suelo y la aspersion de aire." Organismo para la Desechos Sólidos y EPA 542-F-96-024 Protección del Medio Ambiente Respuesta en Situaciones.: 1-4.
- Estévez, J., Andrade, L., Marcet, P. y Montero, M. 2000. "Influencia de las propiedades del suelo en la fijación y movilidad de Zn y Cd." *Edafología* 5: 9-27.
- Eweis, J. B., S. Ergas, J., D. Chang, P. y E. Schroeder, D. 1998. " Bioremediation Principles." McGraw-Hill International Editions: 296.
- FAO 2009. "Guía para la descripción de suelos." ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN: 26-34.

- Gallegos, E. G., E. G. Santillán, L. F. J. Santracruz, J. M. Rigoberto, M. González y M. A. G. Camarillo 2012. "La respuesta de Haba (Vicia faba, L) cultivada en suelos contaminados con concentraciones de Cadmio." *Int. Contam. Ambient* 28: 119-126.
- García-Arreola, M. E., S. H. Soriano-Pérez., L. M. FloresVélez., I. Cano-Rodríguez. y P. A. AlonsoDávila. 2015. "Comparación de ensayos de lixiviación estáticos de elementos tóxicos en residuos mineros." *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14.: 109-117.
- García, A. 2005. "Edafología. Universidad Extremadura, Departamento de de biología y producción de los vegetales, área de edafología y química agrícola." España.
- García., C., J. L. Moreno., T. Hernández. y A. Polo. 2002. "Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo." *Ciencia y Medio Ambiente.*: 125-138.
- García., I. y C. Dorronsoro. 2005. "Contaminación por Metales Pesados. En *Tecnología de Suelos.*" Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola.
- Granada- Laso, J. F. 2011. "Evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales pesados. ." Universidad Técnica Particular de Loja, La Universidad Católica de Loja. : P.P 25-26.
- Granada Laso, J., F 2011. " Evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales pesados." Universidad Técnica Particular de Loja. Escuela de Ingeniería Civil
- Han., F. X., A. Banin., W. L. Kingery., G. B. Triplett., L.X. Zhou, S. J. Zheng. y W. X. Ding. 2003. "New Approach to Studies of Heavy Metal Redistribution in Soil. ." *Advances in Environmental Research.* 8: 113-120-.
- Herrera., T. 2002. "La Contaminación con Cadmio en Suelos Agrícolas. Universidad Central de Venezuela." *Venesuelos* 8 (1 Y 2): 42-47.
- Hueso., M. R. 2013. "Bioadsorción de Cadmio por Biomasa de Opuntia." Universidad Politécnica de Cartagena: 17, 1-123.
- Ingaramo., O. 2003. "Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica." Facultad de Cs. Agrarias –UNNE.
- J, L. D. 1999. "Medicina Laboral y Ambiental. 2ª." Edición. México. El Manual Moderno. .
- Jakub., M., B. Tomasz. y M. Maneckia. 2008. "Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. ." *J. Haz. Mat* 152: 1332-1339.
- Jaramillo, D. 2001. " Introducción a la ciencia del suelo. ." Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín: 590.

- Jinadasa, K., P. Milham., C. Hawkins., P. Cornish., P. Williams., C. Kaldor. y J. Conroy. 1997. "Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia." *Journal of Environmental Quality*, 26 26: 924-933.
- Kabata-Pendias., A. y H. Pendias. 2001. "Trace Elements in Soils and Plants." 3ª edición. CRC.Press. 3: 112-116.
- Kim, S., O. y K. Kim, W. 2001. "Monitoring of electrokinetic removal of heavy metals in tailing-soils using sequential extraction analysis." *J. Hazard. Mater.* 85: 195–211.
- Kulkarni, S. J. y J. P. Kaware. 2013. " A review on research for cadmium removal from effluent." *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology* 2.: 465-469.
- Li., X., N. Ziadi., G. Bélanger., Z. Cai. y H. y. Xu. 2011. "Cadmium accumulation in wheat grain as affected by mineral N fertilizer and soil characteristics." *Canadian Journal of Soil Science* 91: 521-531.
- Lindgren, E., R., E. Mattson, D. y M. Kosak, W. 1994. "Electrokinetic remediation of unsaturated soils." *American Chemical Society Symposium* 554: 30-50.
- Lloyd, J. R. y L. E. Macaskie 2000. "Bioremediation of Radionuclide-Containing Wastewaters." *Environmental Microbe-Metal Interactions. American Society for Microbiology.* : 277-327.
- M. Alexander 1994. "Biodegradation and Bioremediation." Academic Press, San Diego. .
- Mas., A. y J. M. Azcue. 1993. "Metales en sistemas biológicos." Barcelona: Promociones Publicaciones Universitaria.: 19, 1-123.
- McBride., M. B. 1991. "Comments on "Adsorption of heavy metals by silicon and aluminum oxide surfaces on clay minerals'." *Soil Science Society of America Journal.* 55: 1508 – 1509.
- McBride., M. B. 1995. "Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective? ." *J. Environ. Qual* 25.
- McLaughlin., M., B. Zarcinas., D. Stevens. y N. Cook. 2000. "Soil Testing for Heavy Metals. Commun." *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 31: 1661-1700.
- Milena, S., S. Arroyave y F. J. C. Restrepo. 2009. "Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. ." Universidad de Medellín. : 13-33.
- Miliarium 2008. "Estabilización y Solidificación." Miliarium.com.
- Miller., T. 1994. "Ecología y medio ambiente." Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F. : 867.
- Mohammed., A. S., A. Kapri. y R. Goel. 2011. "Biomangement of Metal Contaminated Soils." 1-28.
- Morales, C. A. P., C. C. M. Morales, B. E. Restrepo, F. Mauro, A. C. Montes y M. J. E. Velarde 2011. "Edafología 1." Universidad de Caldas: 44-55.

- Moreno-Rivas., S. C., R. I. Armenta-Corral., M. C. Frasquillo-Félix., I. Lagarda-Díaz., L. Vázquez-Moreno. y G. R.-C. Mont. 2016|. "Biosorción de Cadmio en solución acuosa utilizando levadura de panadería (*Saccharomyces cerevisiae*).". Revista Mexicana de Ingeniería Química. 15: 843-857.
- Nava-Ruíz., C. y M. Méndez-Armenta. 2011. "Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio)." 16: 140-147.
- Nava, C. e. a. y M. Méndez 2011. "Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio)." Arch Neurocién (Mex vol. 16: P.P 141.
- Navarro-Aviño., J., A. Aguilar. y J. López-Moya 2007. "Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas." Ecosistemas.: 18(29) 10-25.
- OMS 2010. "EXPOSURE TO CADMIUM: A MAJOR PUBLIC HEALTH CONCERN." World Health Organizations. OMS W: 1-4.
- Ortiz Bernad, I., J. García, M., M. Dorado Valiño y S. Villar Fernández 2007. "Técnicas de recuperación de suelos contaminados." Universidad de Alcalá. Dirección General de Universidades e Investigación: 12.
- Ortiz, I., E. Fernández, M. Francisco y C. Dorronsoro 2008. "ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN GABINETE Y SU APLICACIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN DE HORIZONTES EDÁFICOS." Departamento de Geología, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, Madrid (Spain). Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada. Granada (Spain). (16.1): 57-63.
- Ortiz, I. e. a., J. Sanz, M. Dorado y S. Villa 2007. "Técnicas de recuperación de suelos contaminado." Universidad de Alcalá: 12-13, 1-108.
- Ortiz Silla, R. 2015. "Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología " Revista Eubacteria. Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología (Edafología), Universidad de Murcia. : 51-64.
- Pagnanelli., F., E. Moscardini., V. Giuliano. y L. Toro. 2004. "Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area: Pollution Detection and Affinity Series. ." Environmental Pollution. 132: 189-201.
- Pineda., H. R. 2004. "Presencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Contribución de *Glomus* Intraradices en la Absorción y Translocación de Cinc y Cobre en Girasol (*Helianthus Annuus* L.) Crecido." Universidad de Colima. Tecoman, Colima.

- Prieto., J., C. A. G. Ramírez., A. D. R. Gutiérrez. y F. P. García. 2009. "Contaminación y fitotoxicidad por metales pesados provenientes de suelos y agua. ." Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. : 29-44.
- Ramírez, A. 2002. "Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos." Anales de la Facultad de Medicina. Universidad Nacional Mayor de San Marcos 63: 52.
- Ravera, M., C. Ciccarelli, D. Gastaldi, C. Rinaudo, C. Castelli y D. Osella 2006. "An experiment in the electrokinetic removal of copper from soil contaminated by the brass industry." Chemosphere 63: 950-955.
- Reddy, K., R., C. Xu, Y. y S. Chinthamreddy 2001. "Assessment of electrokinetic removal of heavy metals from soils by sequential extraction analysis." J. Hazard. Mater. 84: 279-96.
- Reyes Cuella, J., C. y M. Vazquez, V. 2009. "Electrochemical Remediation at Laboratory Scale of the Coal Dump in Paz de Rio (Colombia)." Grupo de Investigación en Química Ambiental, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Instituto de Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia 409-417.
- S., L. 1997. "Laboratory investigation of electroosmosis in bentonites and natural clays." Geotec. J 43: 664-671.
- Sauquillo., A., A. Rigol. y G. Rauret. 2003. "Overview of the use of Leaching Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments." Trends in Analytical Chemistry 22: 152-159.
- Semple, K. T., B. Reid, J. y T. Fermor, R. 2001. " Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants." Environ. Pollution 112: 269-283.
- Seoanez Calvo, M. 1999. "Contaminación del suelo: Estudios, tratamientos y gestión. Casa del libro.com."
- Sepúlveda., T. V., J. A. V. Trejo y D. A. d. I. R. Pérez. 2005. "Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación." Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología.
- Shapiro y Probst 1993. " Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis." Environ. Sci. Technol 27.
- Shapiro, A., P. y R. Probst, F. 1993. "Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis." Environ. Sci. Technol 27: 283-291.

- Sloot, H. A. v. d., V. V. Zomeren., P. F. A. B. Seignette., J. J. Dijkstra., R. N. J. Comans., J. C. L. Meeussen., K. D.S. y O. Hjelmar. 2003. "Evaluation of environmental aspects of alternative materials using an integrated approach assisted by a database/expert system." To be published in the proceedings of the International Symposium'. *Advances in Waste Management and Recycling'*: 4-24.
- Sposito, G. 1998. ""The Chemistry of Soils." " Oxford University Press 277.
- Suer, P., K. Gitye y B. Allard 2003. "Speciation and transport of heavy metals and macroelements during electroremediation." *Environ. Sci. Technol.* 37: 177-181.
- Turer, D. y A. Genc 2005. "Assessing effect of electrode configuration on the efficiency of electrokinetic remediation by sequential extraction analysis." *J. Hazard. Mater.* 119: 167–174.
- Van Deuren, J., T. , S. Lloyd, R. Chetry, Liou y J. Peck. 2002. "Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4th Edition." Technology Innovation Office, EPA Platinum International.
- Van Deuren, J., Z. , Z. Wang y J. Ledbetter 1997. " Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. 3ª Ed." Technology Innovation Office, EPA.
- Villanueva, L. A. G. 2013. "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS." UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL – MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS: 21-15.
- Virkutyte, J., M. Sillanpää y P. Latostenmaa 2002. "Electrokinetic soil remediation." *The Sci. Tot. Environ.* 289: 97–121.
- Volke Sepúlveda, T. y J. Velasco, A. 2002. "Tecnologías de remediación para suelos contaminados." Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT): 27-46.
- Volke Sepúlveda, T., J. A. Velasco Trejo y D. de la Rosa Pérez, A. 2005. "Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación." Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología.: 11-15.
- Wang., J. y C. Chen. 2009. " Biosorbents for heavy metals removal and their future. ." *Biotechnology Advances.*: 27(2), 195-226.
- Wang., Q. R., Y. S. Cui., X. M. Liu., Y. T. Dong. y P. Christie. 1992. " Soil Contamination and plant Uptake of Heavy Metals Polluted sites in China."