



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DE MORELIA

“ELECTROFITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON COBRE MEDIANTE
EL USO DE *SPINACIA OLERACEA*”

TESIS

QUE PRESENTA:

CARLOS AUGUSTO RAMÍREZ RAMÍREZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

ASESORA INTERNO:

VERONICA JANETTE CEDEÑO GARCIDUEÑAS

CO-ASESOR EXTERNO:

RICARDO RANGEL SEGURA

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE DE 2022





ANEXO XXXIII. FORMATO DE LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Morelia, Michoacán; a 15 de noviembre del 2022

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral.

CARLOS ALBERTO HARO MEDRANO
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

| | |
|-------------------------------------|---|
| Nombre del estudiante y/o egresado: | Carlos Augusto Ramírez Ramírez |
| Carrera: | Ingeniería Ambiental |
| No. de control: | 17852388 |
| Nombre del proyecto: | "ELECTROFITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON COBRE MEDIANTE EL USO DE SPINACIA OLERACEA" |
| Producto: | Tesis |

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

[Handwritten Signature]
ALEJANDRO ROMERO BAUTISTA

JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍAS



| | | | |
|--|--|--------------------------------|--|
| <i>[Handwritten Signature]</i> | <i>[Handwritten Signature]</i> | <i>[Handwritten Signature]</i> | <i>[Handwritten Signature]</i> |
| VERÓNICA JANETTE CEDEÑO GARCIDUEÑAS PRESIDENTE | CLAUDIA PALOMARES RODRÍGUEZ SECRETARIO | RICARDO RANGEL SEGURA VOCAL | LENIN EJECATL MEDINA OROZCO VOCAL SUPLENTE |

* solo aplica para el caso de tesis o tesina
c.c.p.- Expediente.



*“Nada en la vida es para ser temido,
es sólo para ser comprendido. Ahora es
el momento de entender más, de modo
que podamos temer menos”*
Marie Curie (1867-1934).

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora la Doctora Verónica, por todo el conocimiento que me ha brindado desde la primera clase, por el apoyo y motivación a seguir avanzando; por su paciencia, y sobre todo por la confianza que me ha brindado para la realización de este proyecto.

Al Doctor Ricardo por su disposición para la evaluación y disposición de este proyecto.

A cada uno de mis profesores, por el conocimiento que me han brindado con cada una de sus clases, con cada uno de los ejemplos y anécdotas que me han enseñado a lo largo de mi carrera; por despertar en mí el amor por la ciencia.

A mi mamá, quien me ha apoyado en cada paso de mi vida y me ha enseñado el valor del amor y respeto a la vida, por enseñarme a nunca rendirme ante las situaciones difíciles y disfrutar de lo que tengo y las personas que me rodean cada día. Por ser la persona que más admiro y mi modelo a seguir.

A mi hermana Paulina y mi hermano Arturo, por ser mis compañeros de vida y estar siempre conmigo, sin importar la circunstancia y motivarme con sus acciones a aprender más todos los días.

A mi sobrino Ethan Daniel, quien desde su nacimiento se convirtió en mi mayor motivación por seguir adelante y me llena de alegría cada vez que lo veo.

A mi amiga Hanny, por aconsejarme y acompañarme en los buenos y malos momentos, por ayudarme a sonreír cada día con sus pláticas y por ser la persona que más me ha ayudado a crecer como persona.

RESUMEN

En la actualidad la contaminación del suelo es un problema a nivel mundial que conlleva grandes afectaciones al medio ambiente, afectando un componente esencial para el desarrollo de la vida en el planeta y el cual alberga una gran biodiversidad de organismos que desempeñan actividades fundamentales como impulsores de servicios ecológicos. La contaminación por metales pesados ha resaltado en las últimas décadas debido principalmente a las descargas industriales, la industria minera y la implementación excesiva de plaguicidas en los campos. El cobre en particular es un elemento presente de manera natural en los suelos, siendo este un micronutriente. Sin embargo, este mismo en concentraciones altas tiene un impacto negativo en la salud de los organismos debido a su toxicidad, provocando irritación de la nariz, boca, ojos y causar dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea. La ingestión de niveles altos de cobre puede producir daño del hígado y los riñones y puede causar la muerte. En la presente investigación se analiza la implementación de la electrofitorremediación con *Spinacia Oleracea* para la sustracción del cobre presente en el suelo. El suelo implementado fue extraído del Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, y caracterizado con el fin de conocer las características de este. Por otra parte, fue realizada una evaluación de toxicidad en plántulas de espinaca a diferentes concentraciones de cobre (10, 20 y 40 ppm), resultando en cambios no significativos a comparación del blanco durante el tiempo en el que se contempló el experimento (14 días). Debido a ello se utilizaron dos concentraciones mayores, siendo estas de 240 y 150 ppm, siendo esta última la sometida al experimento de electrofitorremediación y obteniendo resultados significativos de sustracción de cobre presente en el suelo contaminado.

ABSTRACT

Soil contamination is currently a worldwide problem that has a great impact on the environment, affecting an essential component for the development of life on the planet and which harbors a great biodiversity of organisms that perform fundamental activities as drivers of ecological services. Contamination by heavy metals has been highlighted in recent decades mainly due to industrial discharges, the mining industry, and the excessive use of pesticides in the fields. Copper in particular is an element naturally present in soils, this being a micronutrient. However, copper in high concentrations has a negative impact on the health of organisms due to its toxicity, causing irritation of the nose, mouth and eyes and causing headaches, dizziness, nausea and diarrhea. Ingestion of high levels of copper can cause liver and kidney damage and can cause death. In the present investigation, the implementation of electrophytoremediation with *Spinacia Oleracea* for the subtraction of copper present in the soil is analyzed. The implemented soil was extracted from the Instituto Tecnológico del Valle de Morelia and characterized in order to know its characteristics. On the other hand, a toxicity evaluation was carried out on spinach seedlings at different copper concentrations (10, 20 and 40 ppm), resulting in non-significant changes compared to the blank during the time the experiment was conducted (14 days). Because of this, two higher concentrations were used, 240 and 150 ppm, the latter being the one subjected to the electrophytoremediation experiment and obtaining significant results of subtraction of copper present in the contaminated soil.

Índice

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS..... | 4 |
| RESUMEN..... | 5 |
| ABSTRACT..... | 6 |
| 1.- INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| 2.- ANTECEDENTES..... | 12 |
| 3.- HIPOTESIS..... | 17 |
| 4.- OBJETIVOS..... | 17 |
| 4.1 <i>Objetivo general</i> | 17 |
| 4.2 <i>Objetivos específicos</i> | 17 |
| 5.- JUSTIFICACIÓN..... | 18 |
| 6.- MARCO TEÓRICO..... | 19 |
| 6.1 SUELOS..... | 19 |
| 6.1.1 <i>Proceso de formación del suelo</i> | 20 |
| 6.2.1 <i>Contaminación del suelo</i> | 23 |
| 6.2.1.1 Principales contaminantes de los suelos..... | 24 |
| 6.2.1.2 Plaguicidas..... | 24 |
| 6.2.1.3 Nitrógeno y fósforo..... | 24 |
| 6.2.1.4 Hidrocarburos..... | 24 |
| 6.2.2 <i>Metales pesados y metaloides</i> | 25 |
| 6.2.3 <i>Cobre (Cu)</i> | 28 |
| 6.3 TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS..... | 29 |
| 6.3.1 <i>Fitorremediación</i> | 31 |
| 6.3.2 <i>Electrorremediación</i> | 34 |
| 6.3.2.1 Factores que influyen el proceso de electroremediación..... | 36 |
| 6.3.3 <i>Electrofitorremediación</i> | 37 |
| 6.3.3.1 Factores que influyen en el proceso de electrofitorremediación..... | 39 |
| 6.4 <i>SPINACIA OLERACEA</i> | 42 |
| 7.- METODOLOGÍA..... | 44 |
| 7.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO..... | 45 |
| 7.1.1 <i>Textura</i> | 45 |
| 7.1.2 <i>Densidad aparente</i> | 46 |
| 7.1.3 <i>pH</i> | 47 |
| 7.1.4 <i>Conductividad eléctrica</i> | 47 |
| 7.1.5 <i>Materia orgánica</i> | 47 |
| 7.2 EVALUACIÓN DE BIOACUMULACIÓN Y TOXICIDAD..... | 48 |
| 7.3 DETERMINACIÓN DE COBRE EN SUELO..... | 48 |
| 7.4 EXPERIMENTO DE ELECTROFITORREMEDIACIÓN..... | 49 |
| 8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 51 |

| | |
|--|----|
| 8.1 MUESTREO DE SUELO | 51 |
| 8.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO | 52 |
| 8.3 EVALUACIÓN DE TOXICIDAD | 57 |
| 8.4 ELECTROFITORREMEDIACIÓN..... | 59 |
| 8.4.1 Digestión de muestras de suelo..... | 62 |
| 9.- CONCLUSIONES | 65 |
| 10.- RECOMENDACIONES | 66 |
| 11.- ANEXOS | 67 |
| ANEXO 1 “CURVA DE CALIBRACIÓN” | 67 |
| ANEXO 2 “ANÁLISIS DE VARIANZA Y PRUEBA DE TUKEY” | 69 |
| ANEXO 3 “PRODUCTOS” | 71 |
| 12.- BIBLIOGRAFÍA | 78 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Factores influyentes en la formación del suelo. Recuperado de “Química agrícola” Simon Navarro et al., (2012)..... | 21 |
| Figura 2. Procesos implicados en la fitorremediación de suelos contaminados. Adaptado de Mackinlay Llanza et al., (2017)..... | 32 |
| Figura 3. Mecanismos y procesos electroquímicos en la electro-fitorremediación de suelos contaminado. Adaptado de Sánchez et al., (2020)..... | 38 |
| Figura 4. Configuraciones de electrodos más usadas. | 41 |
| Figura 5. Spinacia Oleracea | 42 |
| Figura 6. Metodología a implementar | 44 |
| Figura 7. Triángulo de texturas. | 46 |
| Figura 8. a) configuración de electrodos y diseño de reactor, b) imagen lateral de la configuración de los electrodos... .. | 50 |
| Figura 9. Ubicación de sitio de muestreo. | 51 |
| Figura 10. Muestreo de suelo. | 52 |
| Figura 11. Disponibilidad de nutrimentos respecto al pH. Recuperado de Castellanos, 2014. | 54 |
| Figura 12. Rango de pH más adecuado para cultivos. Adaptado de Mula (2012)..... | 55 |
| Figura 13. Progreso de crecimiento durante experimento de toxicidad | 58 |
| Figura 14. Acomodo e inicio de experimento de electrofitorremediación. | 59 |
| Figura 15. Espinaca durante experimento de electrofitorremediación. | 60 |
| Figura 16. Digestión de muestras de suelo resultantes de fitorremediación. | 63 |
| Figura 17. Curva de calibración | 68 |

Índice de gráficas

| | |
|---|----|
| Gráfica 1. Crecimiento de plántulas durante experimento | 57 |
|---|----|

Índice de tablas

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1. Efectos en la salud humana de metales pesados.</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabla 2. Principales técnicas de recuperación de suelos. Recuperado de "Técnicas de recuperación de suelos contaminados" Ortíz et al., 2007.</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabla 3. Caracterización Físico-Química del suelo.</i> | <i>53</i> |
| <i>Tabla 4. Condiciones de salinidad de los suelos respecto a su conductividad eléctrica. Adaptado de Lorenz (2004).</i> | <i>56</i> |
| <i>Tabla 5. Registro de crecimiento y número de hojas en espinacas.</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla 6. Resultados de digestión de muestras de suelo.</i> | <i>64</i> |
| <i>Tabla 7. Concentración de cobre en material vegetativo con tratamiento de electrofitorremediación.</i> | <i>64</i> |

1.- INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente esencial para el desarrollo de la vida en el planeta, alberga una gran biodiversidad de organismos que desempeñan actividades fundamentales como impulsores de servicios ecológicos, los cuales son necesarios para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Se estima que la biodiversidad del suelo podría llegar hasta un 25% de la cantidad total de las especies vivas descritas en el mundo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016). Sin embargo, la biodiversidad del suelo es vulnerable a las perturbaciones humanas, incluyendo el uso de la tierra y el cambio climático, la contaminación del suelo, las especies invasoras y el sellado del suelo. La sobreexplotación del suelo está llegando a niveles críticos, ocasionando la pérdida de los suelos productivos, lo cual afecta la manera en la que se desarrolla la vida, además de provocar la destrucción de los ecosistemas. Por otra parte, el suelo es de difícil y larga recuperación (tarda desde miles a cientos de miles de años en formarse), y de extensión limitada, por lo que es considerado un recurso natural no renovable (Silva & Correa, 2009). El suelo es el producto de la interacción compleja de varios factores, entre ellos la roca madre, el tiempo, el clima, las plantas y los animales, y la topografía. Durante este proceso la roca madre es meteorizada por los agentes meteorológicos y de esta manera la roca se va fragmentando. Los fragmentos de la roca se entremezclan con restos orgánicos (heces, organismos muertos o en descomposición, fragmentos de vegetales, pequeños organismos que viven en el suelo, etc.) y con el paso del tiempo todos estos materiales se van estratificando y terminan por formar lo que comúnmente se conoce como suelo (Tarbuck *et al.*, 2005). Debido a su largo proceso de formación y su lenta recuperación, la contaminación del suelo resulta en un tema alarmante. De tal manera que este tipo de contaminación ha sido identificada como la tercera amenaza más importante en Europa y Eurasia, cuarta en África del Norte, quinta en Asia, séptima en Pacífico del Noroeste, octava en Norteamérica y novena en el África Sub-Sahariana y Latinoamérica (Natalia *et al.*, 2019). Por lo cual, se han diseñado diversas técnicas destinadas a la remediación de los suelos

contaminados, entre las cuales recientemente se ha mostrado gran interés a la electrofitorremediación ya que el campo eléctrico puede mejorar la eliminación de los contaminantes al aumentar la disponibilidad de los mismos, sin embargo, aún quedan varios desafíos técnicos y prácticos que deben superarse mediante investigaciones para la aplicación satisfactoria de esta tecnología acoplada en los sitios de campo reales.

2.- ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas el problema de la contaminación ha sido de gran notar alrededor del mundo. La contaminación se ha vuelto un problema visible producto principalmente de las actividades humanas, las cuales han resultado en una degradación continua de los ecosistemas del planeta. Entre los diferentes tipos de contaminación, la contaminación del suelo ha sido uno de los más alarmantes debido a la lenta recuperación del recurso, ya que esta consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo, además de que el suelo alberga una gran cantidad de organismos que desempeñan actividades fundamentales para los servicios ecológicos, los cuales son necesarios para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Sin embargo, la única estimación global de la contaminación del suelo fue realizada en la década de los 90 por el Centro Internacional de Referencia e Información sobre Suelos (ISRIC) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) que estimaba que 22 millones de hectáreas estaban afectadas por contaminación del suelo. No obstante, datos más recientes indican que este número podría subestimar la naturaleza y alcance del problema (Rodríguez *et al.*, 2019).

En cuanto a México en el 2014 fueron identificados por parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 1,983 sitios contaminados que representan una superficie de 369,867,970.8 m², de los que el 32.0% (635 sitios) se encontraban sin ninguna acción de remediación, lo que significó el 91.8% (339,463,884.7 m²) de la superficie total identificada como contaminada, en el 38.6% (765 sitios) se estaban llevando a cabo acciones de remediación, equivalente al 7.7% (28,544,217.4 m²) de la superficie del país, y en el 29.4% (583 sitios) que constituyeron el 0.5% (1,859,868.7 m²) de la superficie contaminada se concluyó la remediación de la afectación ambiental ocasionada por la contaminación (Aulianida *et al.*, 2015).

La contaminación del suelo provoca una reacción en cadena, ya que esta altera la biodiversidad del suelo, reduciendo la materia orgánica que contiene y su capacidad para actuar como filtro. A partir de esta, también se contamina el agua almacenada en el suelo y el agua subterránea, provocando un desequilibrio de sus nutrientes, teniendo así consecuencias para todas las formas de vida, de manera que se facilita la transferencia de contaminantes a la cadena alimentaria causando diversas enfermedades y una excesiva mortalidad en la población, desde efectos agudos a corto plazo, hasta otros crónicos a largo plazo (ONU, 2018) . Además, los suelos son la clave para la seguridad alimentaria y con una población mundial que se proyecta supere los 9 000 millones en 2050, nuestra seguridad alimentaria dependerá de nuestra capacidad para aumentar los rendimientos y la calidad de los alimentos.

Por este motivo en el 2012 fue establecida la Alianza Mundial para los Suelos, con el objetivo de promover la gestión sostenible del suelo y mejorar la gobernanza del suelo para garantizar unos suelos sanos y productivos, y apoyar la prestación de servicios esenciales de los ecosistemas para la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, la adaptación al cambio climático y la mitigación de sus efectos, y el desarrollo sostenible. Siendo que, en base con la FAO, el 33% de los suelos a nivel mundial se encuentran degradados.

Por otra parte, de acuerdo con Eugenio *et al.*, (2019) las principales fuentes antropogénicas de la contaminación del suelo son los agentes químicos. Por lo que, el saneamiento de los suelos contaminados resulta esencial y actualmente se prosiguen realizando investigaciones con el fin de desarrollar métodos de rehabilitación novedosos y científicos, tal como es presentado en el trabajo de Víctor Vidal *et al.*, (2010) quienes determinaron la remoción de mercurio presente en suelo contaminado con el empleo de guarumo (*Cecropia peltata*) y la aplicación de ácido cítrico, llevándose a cabo bajo condiciones controladas en invernadero y con un diseño factorial que tiene como variable de respuesta la concentración de mercurio total (HgT) en suelo y tejidos, y como factores: el grado de contaminación del suelo, la aplicación de un agente quelante (ácido cítrico)

para liberar Hg del suelo (2 niveles: aplicación y no aplicación) y el tiempo de crecimiento de la planta siendo este de 4 niveles (mes 1, mes 2, mes 3 y mes 4). Los porcentajes de remoción que se obtuvieron en este estudio están comprendidos entre 15.7% y 33.7% debido a la capacidad del guarumo para acumular grandes cantidades del metal sin presentar efectos tóxicos considerables. Además, concluyeron que el ácido cítrico no tuvo una influencia significativa sobre la recuperación de Hg ya que se encontró un alto contenido de mercurio biodisponible en los suelos contaminados; por lo cual se pudo concluir que el guarumo es una especie con capacidad fitorremediadora.

Por otra parte, Cartaya *et al.*, (2011) estudiaron la absorción y distribución del cobre en plántulas de tomates tratadas con polímeros naturales (*oligogalacturónidos*, Ogal), de modo que se utilizaron semillas de tomate de la variedad Amalia germinadas en recipientes plásticos de 0.3 L de capacidad con suelo contaminado con 5 mg Cu (II)/Kg de suelo y variando la concentración de Ogal, el riego se realizó de acuerdo con las exigencias del cultivo. A los 25 días de germinadas las semillas se evaluó la longitud de la raíz, la altura de las plantas y el contenido de metales pesados en la planta y en el suelo. Los resultados obtenidos de la investigación evidenciaron que el empleo de la mezcla de *oligogalacturónidos* contrarresta el efecto de la toxicidad del cobre y produjo cambios en el patrón de acumulación del metal en las plantas tratadas con polímeros naturales.

Otro trabajo en cual se utilizaron plantas con el propósito de remediar suelos contaminados es el presentado por Ortiz-Cano *et al.*, (2009) quienes estudiaron la capacidad extractora de plomo (Pb) y cadmio (Cd) del quelite (*Amaranthus hybridus* L.) al adicionar una mezcla de micorrizas arbusculares (*Entrophospora columbiana*, *Glomus intraradices*, *G. etunicatum*, *G. clarum*) al sustrato contaminado con Pb o Cd. Para lo cual se realizaron dos experimentos, uno por cada metal, con diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. En el primer experimento se adicionaron tres cantidades de micorrizas (0, 2.5

y $5.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) en suelos con $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Pb, por otra parte, en el segundo experimento se utilizaron las mismas cantidades de micorrizas en suelos contaminados con $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cd. Posteriormente se determinaron las concentraciones de Pb y Cd en raíz, hoja y tallo a los 65, 95 y 125 días de edad de la planta con un espectrofotómetro de absorción atómica. Los resultados obtenidos en este estudio indican que la adición de micorrizas incrementó significativamente ($P < 0.05$) la concentración de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja de quelite. Además, los autores afirman que las concentraciones de estos metales se incrementaron significativamente conforme la edad de la planta.

De igual manera ha sido documentada la implementación de pasto azul de Kentucky por ser buen indicador para la absorción de metales pesados en múltiples estudios referidos a la remoción de contaminantes presentes en suelos, teniendo como ejemplo de esto el estudio realizado por Putra *et al.*, (2013) quienes estudiaron la aplicación de un sistema de fitorremediación asistido con electrocinética (sistema EAPR) en la eliminación del plomo presente en suelos utilizando azul de Kentucky, obteniendo como conclusión que cuando la planta crecía en el suelo utilizando el sistema EAPR, se encontraba una gran cantidad de plomo en el sistema de raíces y brotes en relación con el proceso de fitorremediación. En general, para cada método, el coeficiente de bioacumulación y el factor de translocación de la planta cultivada en el sistema EAPR era alto, mostrando una alta absorción de la concentración de plomo en la raíz y la depositó en el sistema de brotes. Además de que la adición de urea, el contenido de agua, la acumulación de biomasa y el contenido de clorofila mostraron respuestas positivas para las plantas al superar el estrés del plomo en el suelo.

Otro trabajo a destacar dentro de la implementación de la electrofitorremediación es el presentado por Aboughalma *et al.*, (2008) quienes estudiaron el mejoramiento electrocinético de la fitorremediación implementado en suelo contaminado con Zn, Pb, Cu y Cd utilizando plantas de patata, para lo cual plantaron tubérculos de patata en recipientes

de plástico llenos de suelo contaminado y se cultivaron en un invernadero. Tres de esos recipientes fueron tratados con un campo eléctrico de corriente continua (DC), tres con corriente alterna (AC) y tres permanecieron sin tratar como recipientes de control. Obteniendo una producción de biomasa mayor en un 72% con el tratamiento AC y un 27% menor con el tratamiento DC en comparación con el control. Además de una mayor acumulación general del metal en las raíces de las plantas tratadas con campos eléctricos que en el control. Por otra parte, la absorción de Zn en los brotes de las plantas bajo tratamiento con AC fue mayor en comparación con el control y el tratamiento con DC. La acumulación de Zn y Cu en las raíces de las plantas bajo el tratamiento de AC y DC fue similar, y ambas fueron mayores en comparación con el control. El contenido de Cd en las raíces de las plantas bajo los tres tratamientos se encontró que era más alto que el del suelo. Por último, se encontró que la acumulación de Pb en las raíces y la absorción en los brotes fue menor en comparación con su contenido en el suelo.

3.- HIPOTESIS

La implementación de fitorremediación asistida por electrocinética en suelo contaminado mediante el uso de *Spinacia Oleracea* es un método de tratamiento efectivo para la remoción de cobre presente en suelos.

4.- OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Determinar la eficiencia de remoción de cobre en suelo mediante *Spinacia Oleracea* asistida por electrocinética

4.2 Objetivos específicos

1. Identificar la tolerancia toxicológica por parte de *Spinacia Oleracea* a través de la adición de solución de sulfato de cobre con concentraciones de 10, 20 y 40 ppm y evaluar la afectación de dichas concentraciones a su crecimiento para su posterior análisis de varianza.
2. Evaluar la concentración de cobre en el suelo después del proceso de electrofitorremediación, mediante una digestión ácida y la cuantificación de cobre por el método de Batocuproína.
3. Definir el porcentaje de bioacumulación de cobre en el tejido vegetal de la *Spinacia Oleracea* después del tratamiento de electrofitorremediación, a través de una digestión ácida y su posterior cuantificación mediante el método de Batocuproína.

5.- JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la contaminación de los suelos es un grave problema ambiental que va en aumento a nivel mundial, debido a esto, es de suma importancia el continuo desarrollo de tecnología para la remoción de contaminantes de los suelos.

En el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de los contaminantes presentes en suelos, la fitorremediación es uno de los procesos de amplio interés, debido a que se considera un proceso sostenible de bajo costo en comparación con otras técnicas de remediación, en el cual se utilizan plantas verdes para la eliminación o degradación de contaminantes en los suelos. Sin embargo, la acción de las plantas cuenta con limitantes como son la profundidad máxima de las raíces en crecimiento, la lenta tasa de crecimiento y la baja producción de biomasa de las plantas de fitorremediación que se producen naturalmente, además de que la absorción del contaminante está limitada por su toxicidad y biodisponibilidad. Por otra parte, la combinación de fitorremediación y la remediación electrocinética evita, en parte, las limitaciones de la fitorremediación ya que el campo eléctrico mejora la actividad de la planta al aumentar la biodisponibilidad de los contaminantes. Sin embargo, esta tecnología no ha sido ampliamente estudiada, ya que solo se han probado seis especies de plantas: ray-grass, mostaza india, colza, pasto azul de Kentucky, tabaco y patata. Debido a esto en la presente investigación se busca determinar la eficiencia de remoción de cobre en suelo mediante el uso de *Spinacia Oleracea* asistida por electrocinética para de esta manera atacar problemas de contaminación de la misma índole.

6.- MARCO TEÓRICO

6.1 SUELOS

El suelo es un componente esencial del medio ambiente en el que se desarrolla la vida y cubre la mayor parte de la superficie terrestre. Junto con el aire y el agua, es uno de nuestros recursos más indispensables ya que contiene agua y elementos nutritivos que los seres vivos utilizan y en el que se apoyan y nutren las plantas y otros organismos. El suelo es utilizado por la gente de muchas maneras, por lo que cuenta con diversas definiciones.

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA por sus siglas en inglés, 2020) define al suelo como la capa superficial mineral y/u orgánica de la tierra que ha experimentado algún grado de meteorización física, biológica y química.

Por otra parte, Ortiz Silla, (2015) define al suelo como 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.

Por su parte, Navarro (2012) define al suelo como la capa superior de la Tierra que se distingue de la roca sólida y en donde las plantas crecen.

En este sentido, se definirá para este trabajo al suelo como capa superficial de la tierra formado a partir de la interacción de varios factores, entre ellos la roca madre, condiciones climáticas, actividad de organismos vivos y el tiempo.

Su importancia radica en que es 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 (Ortiz Silla, 2015). Sin embargo, el suelo es un recurso frágil y dado que su velocidad de formación y regeneración es muy lenta mientras que los procesos que contribuyen a su degradación, deterioro y destrucción son mucho más rápidos este se considera un recurso no renovable.

6.1.1 Proceso de formación del suelo

El proceso de formación del suelo parte de la roca madre, la cual a partir del transcurso del tiempo y a través de meteorización es degradada y alterada (Lutgens *et al.*, 2005). La meteorización se clasifica en:

- **Meteorización mecánica:** Se lleva a cabo por fuerzas físicas que rompen la roca en trozos cada vez más pequeños sin modificar la composición mineral de la roca. En la naturaleza, hay cuatro procesos físicos importantes que inducen la fragmentación de la roca: fragmentación por helada, expansión provocada por la descompresión, expansión térmica y actividad biológica.
- **Meteorización química:** Implica una transformación química de la roca en uno o más compuestos nuevos. Los principales procesos de meteorización química son la disolución, la oxidación y la hidrólisis.

La naturaleza de la roca madre influye en el suelo de dos maneras, primeramente, el tipo de roca madre afectará la velocidad de meteorización y en segundo lugar la composición química de la roca madre afectará la fertilidad del suelo. Otro factor influyente en la formación del suelo es el clima, esto debido a que las variaciones de la temperatura y las precipitaciones determinan si predominará la meteorización química o mecánica, además, así como en la velocidad de y profundidad de la meteorización.

La flora y fauna es un factor vital en la formación de los suelos, ya que estos proporcionan materia orgánica al suelo que al descomponerse se suministran nutrientes importantes. Por

consiguiente, la fertilidad del suelo está relacionada en gran medida con la cantidad de materia orgánica presente. La materia orgánica también tiene una gran capacidad de retención de agua, por lo que ayuda a mantener el agua en el suelo. Además, la descomposición de los restos animales y vegetales induce a la formación de varios ácidos orgánicos que aceleran el proceso de meteorización. Por último, la orientación de la pendiente, o la dirección a la que mira la pendiente, es otro factor importante, ya que la diferencia en la cantidad de radiación solar recibida producirá diferencias en la temperatura y la humedad del suelo.

Es importante resaltar que es la influencia combinada de la roca madre, el tiempo, el clima, las plantas y los animales y la pendiente lo que determina este carácter. Los factores antes

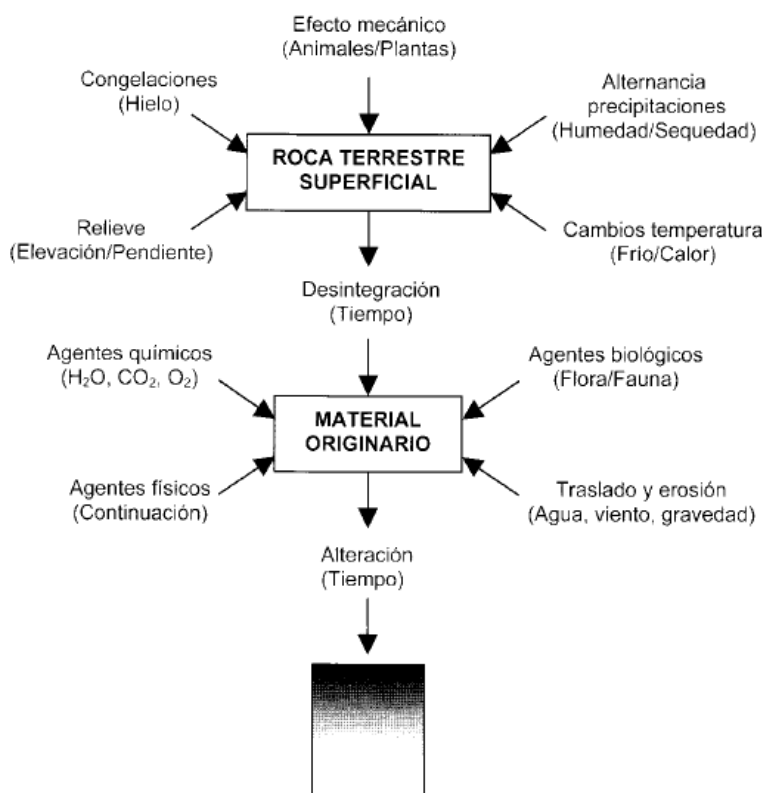


Figura 1. Factores influyentes en la formación del suelo. Recuperado de "Química agrícola" Simon Navarro et al., (2012).

descritos Navarro *et al.*, (2012) los sintetiza en la Figura 1. Factores influyentes en la formación de suelo.

6.2 CONTAMINACIÓN

La contaminación se posiciona como uno de los problemas más importantes que afectan al planeta en el siglo XXI y el cual va en aumento conforme la humanidad incrementa. De manera que la cantidad de contaminantes que son aportados al medio ambiente comprometen la calidad ambiental de nuestro planeta.

Ya que la contaminación se ha encontrado con la humanidad en gran parte de la historia, esta conlleva diversas definiciones.

El Instituto Geográfico Nacional de España (2016) define a la contaminación como la presencia de cualquier agente, o combinación de agentes en el ambiente, en formas y concentraciones que puedan resultar nocivos para la salud, el bienestar de la población o perjudiciales para la vida vegetal o animal.

De acuerdo con la Fundación Aquae (2017) la contaminación es la introducción de un contaminante en un ambiente natural que causa inestabilidad, desorden, daño o malestar en un ecosistema, en el medio físico o en un ser vivo.

Por su parte, Secretaría de cultura, recreación y deporte de Bogotá (2020) la contaminación es la presencia en el ambiente de sustancias o elementos dañinos para los seres humanos y los ecosistemas (seres vivos).

Por consiguiente, definiremos la contaminación cómo la presencia de cualquier agente físico, químico o biológico que causen inestabilidad, daño o malestar a los organismos vivos de un ecosistema.

Entre los tipos de contaminación según el medio afectado podemos encontrar: la contaminación del agua, aire y suelo.

6.2.1 Contaminación del suelo

Este tipo de contaminación se refiere a la presencia en el suelo de un químico o una sustancia fuera de sitio y/o presente en una concentración más alta de lo normal que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado (Rodriguez *et al.*, 2019). La contaminación del suelo puede ser clasificada de acuerdo con su origen, de esta manera siendo puntual o difusa.

- **Contaminación puntual:** Esta puede ser causada por un evento específico o una serie de eventos dentro de un área determinada en la que los contaminantes son liberados al suelo y la fuente e identidad de la contaminación son fácilmente identificadas.
- **Contaminación difusa:** La contaminación difusa es una contaminación que se propaga por áreas muy extensas, se acumula en el suelo y no tiene una fuente única o fácilmente identificable. Implica el transporte de los contaminantes a través de sistemas de aire-suelo-agua. Por lo que es necesario realizar análisis complejos que involucran a estos tres compartimentos a fin de evaluar adecuadamente este tipo de contaminación (Eugenio *et al.*, 2019) .

6.2.1.1 Principales contaminantes de los suelos

Las emisiones de contaminantes al medio ambiente suelen proceder de procesos antropogénicos, de modo que las interacciones humanas las principales causantes de la contaminación del suelo. Los principales contaminantes de los suelos son los plaguicidas, nitrógeno y fósforo, hidrocarburos y los metales pesados o metaloides.

6.2.1.2 Plaguicidas

Los plaguicidas producen efectos tóxicos (agudos y crónicos) sobre ciertos organismos. Sin embargo, la justificación de su uso radica en la necesidad de combatir las plagas, dentro de las cuales se incluyen malezas, enfermedades, insectos y otras de tipo animal que afectan a los cultivos, reduciendo de esta manera las pérdidas en las cosechas ya que sin estos las pérdidas de las cosechas oscilarían alrededor del 32% para cereales y 78% en la producción de frutas de acuerdo con estimaciones de Yaguana *et al.*, (2019).

Sin embargo, algunos de estos plaguicidas también son contaminantes orgánicos persistentes (COP), y también están asociados a la contaminación de suelos por metales pesados (Eugenio *et al.*, 2019).

6.2.1.3 Nitrógeno y fósforo

El nitrógeno y el fósforo se convierten en contaminantes cuando son aplicados en exceso a los suelos agrícolas en forma de fertilizantes o en áreas de producción ganadera intensiva (Carpenter *et al.*, 1998). Estos nutrientes pueden filtrarse a las aguas subterráneas o ser transportados a los cuerpos de agua superficiales por la escorrentía, causando eutrofización o llevando a altas concentraciones de nitratos que causan problemas ambientales y de salud humana (Frumin *et al.*, 2014).

6.2.1.4 Hidrocarburos

La contaminación del suelo por hidrocarburos afecta la flora, fauna y microorganismos del suelo, su fertilidad, así como la existencia y sobrevivencia de los animales que se alimentan

de la fauna. Asimismo, puede existir una afectación en el ámbito social que incluye los sistemas de producción, la salud, la economía y las formas de vida de las poblaciones, debido a los efectos de estos compuestos, los cuales son tóxicos para los humanos (mutagénicos y carcinogénicos) y para los seres vivos en sus diversas formas (microflora, mesofauna y fauna). Este tipo de contaminación se da debido principalmente a derrames, así como a las actividades propias de la industria petrolera (Arroyo *et al.*, 2014) .

Este tipo de contaminación del suelo por hidrocarburos ha venido en aumento como resultado de las malas prácticas en la explotación, refinación, distribución, mantenimiento y almacenamiento de petróleo crudo y sus derivados (Iturbe *et al.*, 2007).

6.2.2 Metales pesados y metaloides

El término “metales pesados” se refiere al grupo de metales y metaloides de masa relativamente alta ($>4,5 \text{ g/cm}^3$) como Pb, Cd, Cu, Hg, Sn y Zn, que pueden causar problemas de toxicidad (Kemp, 1998). Estos elementos se encuentran presentes en los suelos de forma natural en bajas concentraciones. Siendo que muchos de ellos son micronutrientes esenciales para plantas y animales. Sin embargo, estos en concentraciones altas pueden causar fitotoxicidad y dañar la salud de los organismos vivos a causa de su naturaleza no biodegradable, que causa que se acumulen fácilmente en los tejidos y organismos vivos (Eugenio; *et al.*, 2019).

Las principales fuentes antropogénicas de los metales pesados son las áreas industriales, los estériles de minas, la eliminación de desechos con alto contenido metálico, la gasolina y las pinturas con plomo, la aplicación de fertilizantes, los lodos de depuradora, los plaguicidas, la irrigación con aguas residuales y los derrames de petroquímicos (Alloway, 2013). Entre estos, destaca la minería debido principalmente al inadecuado manejo de sus residuos denominados “jales mineros”, lo que ocasiona problemas de contaminación en

estados como Zacatecas, San Luis Potosí, Guerrero y Sonora (Cortés *et al.*, 2013; Meza *et al.*, 2009; Mireles *et al.*, 2012).

De acuerdo con Ramos *et al.*, (2006) reportes indican que en México podrían existir millones de toneladas de jales dispersos en el territorio nacional, de los que se desconocen sus condiciones y su potencial de afectación al medio ambiente.

Por otra parte, es importante mencionar que los metales pesados son el tipo de contaminantes más persistentes y complejos para remediar en la naturaleza, ya que estos se bioacumulan en los tejidos de los organismos vivos. Por lo que, los metales pesados son un grupo de contaminantes ambientales sujetos a una mayor investigación y preocupación, debido principalmente a su persistencia y a las bajas concentraciones a las que pueden manifestar efectos tóxicos. Su acumulación progresiva y/o su transferencia a otros medios naturales como las aguas subterráneas, entrada en la cadena trófica, etc., supone una amenaza para la salud humana y la de los ecosistemas (Bayón, 2015).

Entre los metales pesados, el Zn, Ni, Co y Cu son relativamente más tóxicos para las plantas, y As, Cd, Pb, Cr y Hg son relativamente más tóxicos para los animales superiores (McBride, 1994).

En cuanto a los efectos tóxicos de los metales pesados, los más problemáticos son los del Hg, Cd, Pb, As, Cu, Zn, Sn y Cr como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Efectos en la salud humana de metales pesados.

| <i>Metal pesado</i> | <i>Efecto en la salud</i> |
|---------------------|--|
| As | Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por arsénico son: vómitos, dolor abdominal y diarrea. Seguidamente, aparecen otros efectos, como el entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies |

o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte. En una exposición prolongada puede causar cambios de pigmentación, lesiones cutáneas y durezas y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies. Además de cáncer de pie, vejiga o pulmón (OMS, 2018).

Cd Los síntomas ocasionados por intoxicación por cadmio es la diarrea, dolor estomacal y vómito severo, infertilidad, daño al sistema nervioso central, daño a sistema inmune, interferencias con el calcio en la regulación de sistemas biológicos y cáncer (L. Solutions, 2017).

Cr El efecto principal producido por la ingestión de compuestos de cromo (VI) son irritación y úlceras en el estómago y el intestino delgado y anemia (ATSDR, 2016).

Cu La exposición prolongada de cobre puede irritar la nariz, la boca, los ojos y causar dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea. La ingestión de niveles altos de cobre puede producir daño del hígado y los riñones y puede causar la muerte (ATSDR, 2004).

Hg Tras la exposición a distintos compuestos de mercurio se pueden observar trastornos neurológicos y del comportamiento, con síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, cefalea o disfunciones cognitivas y motoras (World Health Organization, 2018).

Ni Los efectos más graves a la salud por exposición al níquel son la bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer (ATSDR, 2016a).

Pb La exposición al plomo puede causar anemia, hipertensión, disfunción renal, inmunotoxicidad y toxicidad reproductiva. En niños ataca principalmente al cerebro y al sistema nervioso central, pudiendo

| | |
|----|--|
| | provocar coma, convulsiones e incluso la muerte (World Health Organization, 2019). |
| Zn | La ingestión de demasiado cinc puede producir calambres estomacales, náusea y vómitos. La ingestión de niveles altos de cinc durante varios meses puede producir anemia, daño del páncreas y disminución del tipo de colesterol beneficioso (HDL) en la sangre (ATSDR, 2016b). |

6.2.3 Cobre (Cu)

Como se ha afirmado anteriormente el Cu es un elemento presente de manera natural en los suelos, incluso si este se encuentra de manera insuficiente el suelo no resulta apto para actividades agrícolas intensivas.

El cobre es un metal rojizo cuya concentración promedio en la corteza terrestre es aproximadamente 50 partes de cobre por millón de partes de suelo (ppm). El cobre es uno de los elementos que en bajas concentraciones es considerado un micronutriente esencial para todos los organismos, incluyendo a los seres humanos y otros animales (ATSDR, 2004). Sin embargo, de acuerdo con la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR por sus siglas en inglés, 2004) la exposición a este elemento en dosis altas puede ser perjudicial para los animales, ya que la exposición prolongada puede irritar la nariz, la boca, los ojos y causar dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea. La ingestión de niveles altos de cobre puede producir daño del hígado y los riñones y puede causar la muerte. Por otra parte, Kamunde *et al.*, (2004) afirma que la exposición del cobre en dosis altas produce en las plantas lesiones en las raíces, inhibe el crecimiento radicular

y promueve la formación de raicillas secundarias cortas y de color pardo. También produce clorosis. En algas y hongos previene la germinación de esporas.

Además, cuando el cobre se libera al suelo, puede adherirse fuertemente a la materia orgánica y a otros componentes (por ejemplo, arcilla, arena, etc.) en las capas superficiales del suelo y puede que no se movilice muy lejos cuando es liberado. Al mismo tiempo, en los suelos contaminados por Cu sólo un número pequeño de plantas pueden vivir. Debido al efecto del Cobre sobre las plantas, es una seria amenaza para las zonas de producción agrícola, además de su influencia negativa en la actividad de microorganismos y lombrices de la tierra, disminuyendo la descomposición de la materia orgánica (LENNTECH, 2017).

6.3 Técnicas de descontaminación de suelos contaminados

Debido a los grandes efectos negativos de la contaminación del suelo en los organismos vivos muchas investigaciones han ido encaminadas a tratar de recuperarlos en vez de destruirlos. La destrucción de los suelos se realiza generalmente trasladándolos a vertederos adecuadamente aislados y controlados porque se intuye que otros tratamientos de recuperación no ofrecen las garantías suficientes para contener la contaminación.

Actualmente, existe un amplio abanico de tecnologías de recuperación de suelos contaminados, diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes alterando su estructura química mediante procesos generalmente químicos, térmicos o biológicos. La aplicación de estos depende de las características del suelo contaminante, de la eficiencia esperada, su viabilidad económica y el periodo de tiempo estimado (Ortiz *et al.*, 2007).

En función de los objetivos que se quieren alcanzar a la hora de recuperar un suelo contaminado (Kaifer *et al.*, 2004) se puede distinguir entre:

- **Técnicas de contención**, que aíslan el contaminante en el suelo sin actuar sobre él, generalmente mediante la aplicación de barreras físicas en el suelo.
- **Técnicas de confinamiento**, que reducen la movilidad de los contaminantes en el suelo para evitar su migración actuando directamente sobre las condiciones fisicoquímicas bajo las que se encuentran los contaminantes.
- **Técnicas de descontaminación**, dirigidas a disminuir la concentración de los contaminantes en el suelo.

En la Tabla 2 se pueden observar los principales tipos de tratamientos de recuperación de suelos.

Tabla 2. Principales técnicas de recuperación de suelos. Recuperado de "Técnicas de recuperación de suelos contaminados" Ortíz et al., 2007.

| <i>Tipo de tratamiento</i> | | <i>Tratamiento</i> | <i>Aplicación</i> |
|------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------|
| <i>Descontaminación</i> | Físico-químico | Extracción | In situ |
| | | Lavado | Ex situ |
| | | Flushing | In situ |
| | | Electrocinética | In situ |
| | | Adición de enmiendas | In situ |
| | | Barreras permeables activas | In situ |
| | | Inyección de aire comprimido | In situ |
| | | Pozos de recirculación | In situ |
| | | Oxidación ultravioleta | Ex situ |
| | | Biológico | Biodegradación asistida |
| Biotransformación de metales | In situ | | |

| | | |
|----------------------|-------------------------------|---------|
| | Fitorremediación | In situ |
| | Bioventing | In situ |
| | Landfarming | Ex situ |
| | Biopilas | Ex situ |
| | Compostaje | Ex situ |
| | Lodos biológicos | Ex situ |
| Térmico | Incineración | Ex situ |
| | Desorción térmica | Ex situ |
| Mixto | Extracción multifase | In situ |
| | Atenuación natural | In situ |
| <i>Contención</i> | Barreras verticales | In situ |
| | Barreras horizontales | In situ |
| | Barreras de suelo seco | In situ |
| | Sellado profundo | In situ |
| | Barreras hidráulicas | In situ |
| <i>Confinamiento</i> | Estabilización físico-química | In situ |
| | Inyección de solidificantes | In situ |
| | Vitrificación | In situ |

6.3.1 Fitorremediación

La fitorremediación (“fito”, del griego “phyto”, que significa “planta”) es un conjunto de tecnologías que se basan en el uso de plantas para reducir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de aguas, sedimentos, suelos e incluso aire a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz, por lo que es considerada una tecnología con un gasto financiero y

tecnológico relativamente bajo (Delgadillo *et al.*, 2011). Es un proceso biológico que puede aplicarse a contaminantes orgánicos, inorgánicos y contaminación mixta. Lo que convierte a la fitorremediación en una tecnología apta para aplicarse en campos agrícolas, áreas industriales y zonas en las que se ha llevado a cabo ejercicios militares. Se ha demostrado también su eficiencia en la eliminación de metales radioactivos y tóxicos de suelos (Mackinlay Llanza *et al.*, 2017).

En la fitorremediación junto con plantas son utilizadas enmiendas del suelo (abonos, etc.) y prácticas agronómicas (cultivo del suelo). Las enmiendas orgánicas son utilizadas para mejorar la fertilidad de los suelos, siendo también fuente de nutrientes esenciales para las plantas, y favorecer la actividad y desarrollo de los microorganismos del suelo, mejorando su fertilidad química y biológica (Bernal *et al.*, 2007).

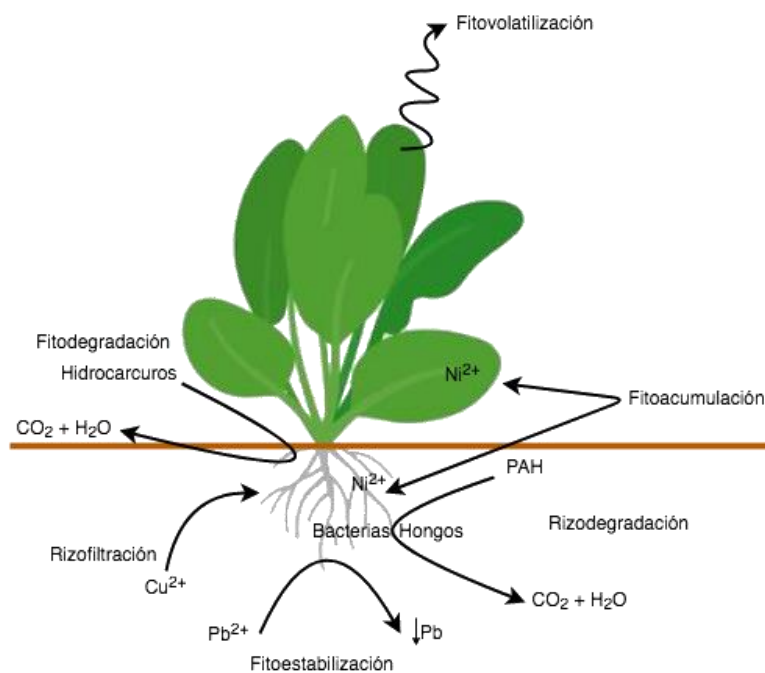


Figura 2. Procesos implicados en la fitorremediación de suelos contaminados. Adaptado de Mackinlay Llanza *et al.*, (2017).

La fitorremediación es aplicable tanto *in situ* como *ex situ* y posee una serie de fitotecnologías a través de las cuales las plantas pueden contribuir a la recuperación de suelos, sedimentos y aguas contaminadas (Figura 2). A continuación, se nombran cada una de ellas:

- **Fitoacumulación:** Las raíces de la planta se encargan de absorber las sustancias inorgánicas para transportarlos hasta sus propios tejidos como las hojas o los tallos.
- **Rizofiltración:** Tiene un efecto similar que la fitoacumulación, solo que la acumulación y degradación de los contaminantes se produce sobre la misma raíz sin llegar a ascender sobre los tejidos.
- **Fitoestabilización:** Consiste en inmovilizar los contaminantes que hay por los alrededores de la planta mediante la absorción de estos por las raíces.
- **Fitodegradación:** Por medio de este tratamiento la acción de la actividad natural y metabólica de la planta como por la segregación de enzimas segregados por la misma, es capaz de descomponer los contaminantes orgánicos que se encuentran a su alrededor.
- **Fitovolatilización:** Por medio de este, las plantas absorben los compuestos orgánicos que se encuentran en las inmediaciones de la misma, siendo capaces de liberarlos en estado gaseoso por la acción de las hojas (Mackinlay Llanza *et al.*, 2017).

Dependiendo de la estrategia de recuperación, estos procesos darán lugar a la contención (fitoestabilización o fitoinmovilización) o eliminación (fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y rizofiltración) de contaminantes por los que las plantas pueden ser empleadas en la recuperación de suelos y aguas contaminadas (Bernal *et al.*, 2007).

Una de las principales ventajas con la que cuenta la fitorremediación es que es una tecnología más barata que las convencionales. Otra ventaja que proporciona la implementación de esta tecnología es que debido a la poca perturbación que se realiza en el suelo contaminado su impacto ambiental resulta mínimo. Al ser una tecnología que es viable el tratamiento *in situ* evita la excavación y el tráfico pesado (Mackinlay Llanza *et al.*, 2017).

En el uso de plantas en la recuperación de suelos contaminados, estas participan activamente en la prevención de la erosión por viento y lluvia. Además de reestablecer la vegetación del área. Sin embargo, este proceso es relativamente lento y dependiente de la estación del año en la que se encuentre. El crecimiento de la vegetación puede estar limitado por extremos de la toxicidad ambiental, es aplicable a ambientes con concentraciones de contaminantes de bajas a moderadas. Además, la fitorremediación está limitada por la profundidad de las raíces, requiriendo así un estudio previo de la disponibilidad de contaminantes en el suelo a tratar (Martínez Sepúlveda *et al.*, 2019).

6.3.2 Electrorremediación

Otro tipo de tratamiento utilizado con el propósito de la descontaminación de los suelos es la remediación electrocinética, también conocida como electrorremediación, la cual es una tecnología que aprovecha las propiedades conductivas del suelo y cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones) (Hernández *et al.*, 2011).

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 (Perez *et al.*, 2007).

De acuerdo con Hernández Laura *et al.*, (2011) 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.

- **Electromigración:** En este fenómeno los iones en disolución 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. De modo que si el contaminante es un compuesto inorgánico y la fuerza iónica es grande, los fenómenos de transporte son conducidos principalmente por éste mecanismo (De la Rosa Perez *et al.*, 2007). En otras palabras, es el movimiento de especies iónicas disueltas, que están presentes en el fluido del poro, debido a la influencia de un campo eléctrico.
- **Electro-ósmosis:** Representa el movimiento del líquido con respecto a las superficies sólidas inducido por el campo eléctrico. Esto se produce debido a que en las superficies no equilibradas de las partículas del suelo predominan las cargas negativas, y atraen al líquido hacia el cátodo, que se comporta como un gran catión.
- **Electroforesis:** Corresponde al desplazamiento de partículas coloidales cargadas en suspensión en un líquido, tiene una importancia muy inferior a la de los dos anteriores en este proceso. Los pasos de transformación del contaminante dependen de las especies químicas y de las condiciones del medio ambiente (Vargas Marissa *et al.*, 2011).
- **Electrólisis:** Incluye los procesos reactivos que ocurren sobre la superficie de los ánodos y cátodos que se han posicionado en el suelo, directamente o bien en el seno de una disolución de electrolito en contacto con el suelo. Los más importantes son la

oxidación del agua sobre la superficie anódica y la reducción del agua o la electrodeposición de metales sobre la extensión catódica (Martínez Sepúlveda *et al.*, 2019).

6.3.2.1 Factores que influyen el proceso de electroremediación

En la electroremediación existen varios factores fisicoquímicos que influyen en el transporte de los contaminantes, y en una efectiva remediación del suelo contaminado; algunos de estos factores se expresan a continuación:

- a) **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 electroremediación (Acar & Alshwabkeh, 1993). La hidrólisis del agua produce una disociación que genera un pH ácido cerca del ánodo y un pH básico cerca del cátodo. De modo que, para efectuar una eliminación exitosa se deberá mantener el contaminante inorgánico en disolución evitando los cambios súbitos de pH (De la Rosa Perez *et al.*, 2007).

- b) **Contenido de agua:** 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 ya que el electrolito se mueve hacia uno de los electrodos, incrementando la humedad en este y disminuyéndola en el electrodo contrario. Por lo que, es necesario mantener una humedad adecuada agregando electrolito a la misma tasa electro-osmótica a la que esta es drenada del sistema. Estudios indican que el contenido de agua óptimo del suelo para la electromigración es menor que el de saturación (Teutli León *et al.*, 2007).

- c) **Conductividad eléctrica:** En electroremediación la conductividad total del medio puede ser modificada debido a los cambios de pH en el suelo, formando perfiles de voltaje (Acar & Alshawabkeh, 1993).

- d) **Potencial Zeta (ζ):** Es la medida que determina la carga de un coloide (Volts), en función de la superficie cargada y la naturaleza y composición del medio en el que se está suspendiendo. Generalmente los suelos el potencial ζ es negativo debido a que la superficie del suelo generalmente tiene carga negativa. Con el incremento de la acidez el ζ disminuye su negatividad, afectando la velocidad y velocidad del flujo electro-osmótico (De la Rosa Perez *et al.*, 2007).

- e) **Naturaleza y química del suelo:** En la cinética de sustracción de un contaminante influyen diversas características del suelo, como son la capacidad de adsorción, el intercambio iónico y de amortiguamiento del pH; para el caso de los suelos arcillosos y limosos, estos ofrecen una mayor superficie de contacto, por lo que metales y sustancias iónicas pueden ser adsorbido con mayor facilidad en sus superficies, dificultando su remoción (Ravera *et al.*, 2006).

- f) **Naturaleza y arreglo de los electrodos:** La estructura de los electrodos debe ser porosa para establecer un buen contacto con los electrolitos y para poder liberar los gases producidos por la electrólisis del agua. El tamaño, forma y arreglo de estos, así como la distancia entre ellos afecta las tasas de remoción de los contaminantes (De la Rosa Perez *et al.*, 2007).

6.3.3 Electrofitorremediación

La electrofitorremediación es la combinación de los tratamientos de electroremediación y fitorremediación, la cual tiene el objetivo de mejorar los procesos llevados a cabo por las

plantas en la fitorremediación mediante el aumento de la movilidad y disponibilidad de los contaminantes bajo el campo eléctrico hacia la capa del suelo donde se encuentran las raíces. Para ello, son colocados electrodos en la zona contaminada entre las plantas cultivadas para posteriormente aplicar un gradiente de potencial eléctrico (Figura 3). De esta manera los contaminantes son transportados por electro-ósmosis y/o electromigración hacia la zona de las raíces, siendo las plantas el principal elemento remediador de la técnica (Mackinlay Llanza *et al.*, 2017).

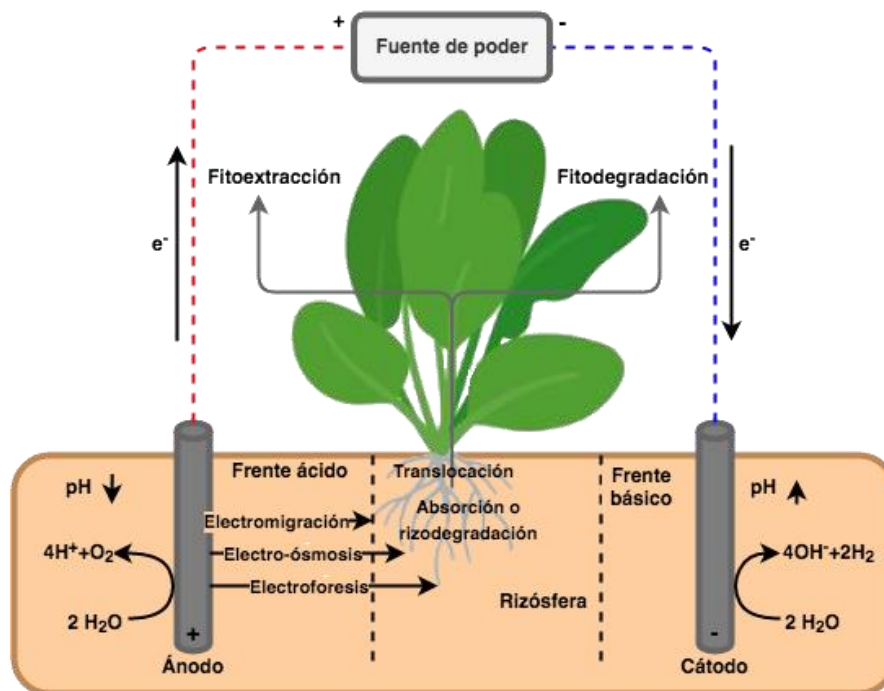


Figura 3. Mecanismos y procesos electroquímicos en la electro-fitorremediación de suelos contaminado. Adaptado de Sánchez *et al.*, (2020).

Este tratamiento no solo permite eliminar los contaminantes por mecanismos electroquímicos, sino también por absorción, acumulación y/o degradación en las plantas. La electro-fitorremediación se considera un tratamiento sostenible desde un punto de vista medioambiental debido al uso de los recursos renovables, además de benigna para el suelo.

6.3.3.1 Factores que influyen en el proceso de electrofitorremediación

En la electrofitorremediación al igual que en otros tratamientos, existen diversos factores que influyen en la remediación efectiva del suelo contaminado; algunos de ellos se expresan a continuación:

- a) **Tipo de campo eléctrico:** Las alternativas más comunes utilizadas en este tipo de tratamientos son (i) el uso de corriente eléctrica unidireccional (DC); (ii) el uso de la corriente DC con inversión periódica de la polaridad del electrodo (DC-RP); y (iii) el uso de corriente eléctrica alterna (AC). En la aplicación de la corriente DC son provocados flujos electroquímicos estables de agua, iones y contaminantes en todo el suelo. Sin embargo, la aplicación de la corriente continua puede provocar descensos y aumentos en el pH de las zonas del suelo cercanas al ánodo y al cátodo, respectivamente. La disminución del pH en la zona del ánodo puede ser útil en el caso de la contaminación por metales, debido a que contribuye a su solubilización en cierta medida. Sin embargo, valores extremos de pH causan (en algunos casos), efectos perjudiciales en el crecimiento de las plantas y los microorganismos, reduciendo la eficacia global del tratamiento. En el caso de la aplicación de DC-RP se evitan dichos valores extremos de pH, ya que los electrodos actúan alternativamente como ánodo y cátodo permitiendo el mantenimiento de flujos electroquímicos constantes de agua y especies químicas a través del suelo. En la tercera alternativa el tipo de campo eléctrico da lugar a una variación continua de la polaridad, evitando así la formación de frentes ácidos y alcalinos.

- b) **Material de los electrodos:** Los electrodos utilizados en la electrofitorremediación deben mantener su integridad física y química para evitar el deterioro y la liberación de cualquier especie adicional que pudiera interferir en los procesos de fitorremediación. Especialmente en el caso de los ánodos metálicos en los cuales

podría producirse una liberación de especies metálicas disueltas por la oxidación del electrodo. Los materiales más empleados en la aplicación de electrofitorremediación son básicamente tres: grafito, acero inoxidable y titanio. El grafito es un material ampliamente utilizado por su inercia y relativo bajo costo; puede actuar como ánodo o cátodo y la forma del electrodo incluye varillas, placas y láminas alargadas. El acero inoxidable es empleado principalmente para los cátodos, en combinación con ánodos de grafito, debido a su bajo costo (Sánchez Sánchez *et al.*, 2020).

- c) **Configuración de los electrodos:** En la práctica, las configuraciones de los electrodos pueden variar e influir en la eficacia de la electrofitorremediación. Las configuraciones más utilizadas en la aplicación de esta tecnología pueden observarse en la Figura 4.

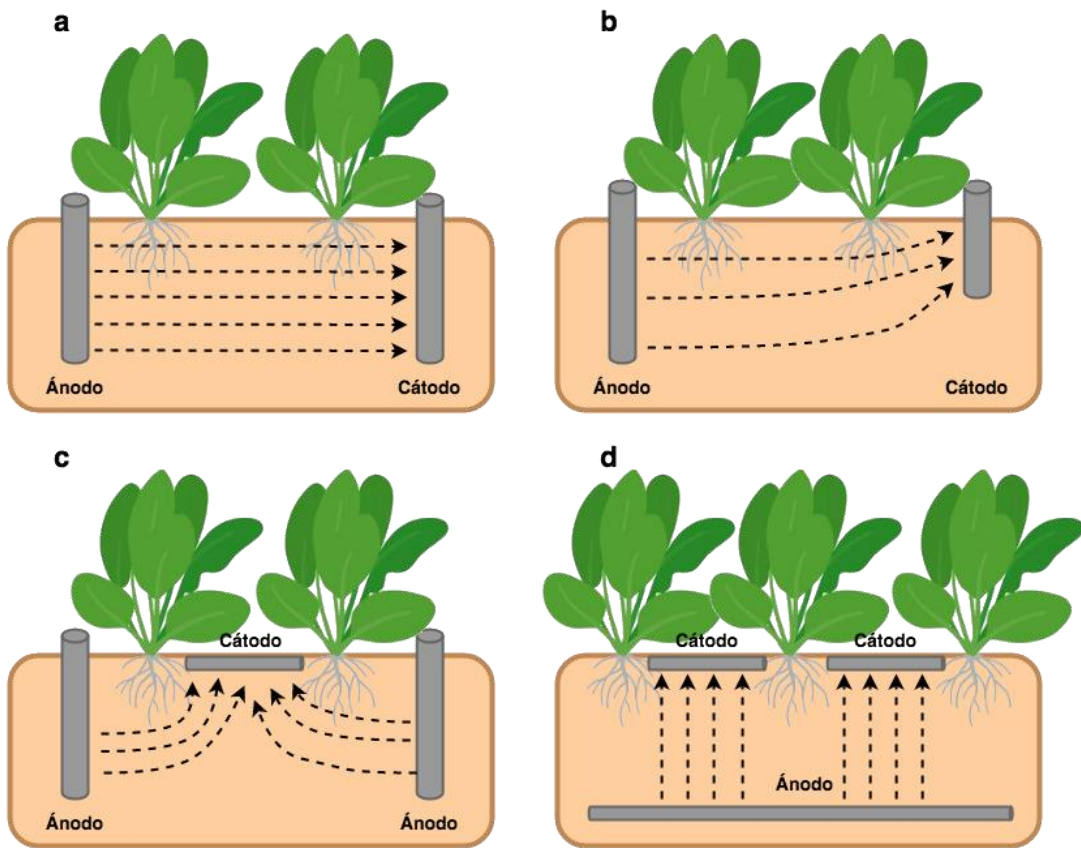


Figura 4. Configuraciones de electrodos más usadas.

6.4 *Spinacia Oleracea*



Figura 5. Spinacia Oleracea

La espinaca es un cultivo de distribución mundial que se cultiva en zonas tropicales durante todo el año en las tierras altas y frescas, mientras en las zonas templadas se cultiva a libre exposición en las partes bajas durante la primavera y verano, o bajo invernadero durante otoño e invierno, pertenece a la familia *Chenopodiaceae* y la especie se denomina *Spinacia Oleracea L.*

Actualmente no se cuenta con información que haga referencia a su implementación en el tratamiento de fitorremediación asistida con electrocinética, por lo cual resulta de gran interés su aplicación con esta tecnología.

De acuerdo con Arias *et al.*, (2010) la espinaca en una primera fase forma una roseta de hojas de duración variable de acuerdo con las condiciones climáticas y posteriormente emite el tallo. De las axilas de las hojas o directamente del cuello surgen tallitos laterales que dan lugar a ramificaciones secundarias, en las que pueden desarrollarse flores. En su descripción general podemos destacar lo siguiente:

- **Sistema radicular:** Raíz pivotante, poco ramificada y de desarrollo radicular superficial.
- **Tallo:** Erecto de 30 cm a 1 m de longitud en el que se sitúan las flores.
- **Hojas:** Caulíferas, más o menos alternas y pecioladas, de forma y consistencia muy variables, en función de la variedad. Color verde oscuro. Pecíolo cóncavo y a menudo rojo en su base, con longitud variable, que va disminuyendo poco a poco a medida que soporta las hojas de más reciente formación y va desapareciendo en las hojas que se sitúan en la parte más alta del tallo.
- **Flores:** Las flores masculinas, agrupadas en número de 6-12 en las espigas terminales o axilares presentan color verde y están formadas por un periantio con 4-5 pétalos y 4 estambres. Las flores femeninas se reúnen en glómérulos axilares y están formadas por un periantio tetrudentado, con ovarios uniovulares, estilo único y estigma dividido en 3-5 segmentos.

De acuerdo con González *et al.*, (2004) la espinaca crece y produce en un amplio rango de temperaturas, desde 5 a 24°C, siendo que el crecimiento más rápido oscila entre los 15 y 18°C. Sin embargo, también soportar temperaturas de -9 a -6°C sin mayor daño, siempre que no esté muy pequeña o cercana a la madurez. Además, tiene un requerimiento de frío facultativo o cuantitativo para la inducción floral, siendo el óptimo una exposición de una a tres semanas a 8°C con límites entre 5 y 12°C.

7.- METODOLOGÍA

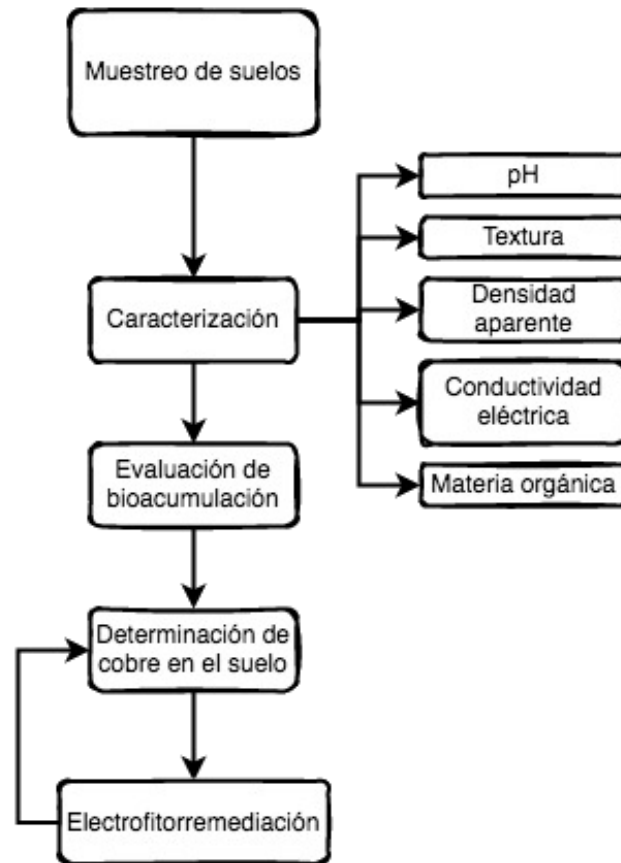


Figura 6. Metodología a implementar

Con el fin de cumplir los requerimientos necesarios para dar desarrollo a la presente investigación se diseñó la metodología presentada en la Figura 6, de la cual se obtendrá información referente al estado inicial de la muestra de suelo (evaluando los parámetros de pH, textura, densidad aparente, conductividad eléctrica y materia orgánica), las afectaciones presentadas en las plantas y su eficiencia de remoción una vez concluido el experimento.

7.1 Caracterización del suelo

Para la caracterización del suelo se analizará la textura, densidad aparente, pH, materia orgánica y conductividad. La metodología implementada fue la siguiente:

7.1.1 Textura

La textura se refiere al porcentaje de arena, limo y arcilla que puede tener un suelo, su determinación se realizará siguiendo la metodología del “hidrómetro de Boyucos” en la cual primeramente son pesados 50g de suelo en un vaso de aluminio en el cual son agregados también 50g de solución dispersante (calcón), dejando reposar durante 5 minutos. Posteriormente se agrega agua corriente hasta cerca del segundo nivel del vaso. Esta mezcla se agita en las batidoras de 10 a 15 minutos según lo arcilloso de la muestra. Una vez transcurrido el tiempo de agitación se deberá vaciar todo el contenido del vaso en las probetas de Boyoucos y agitar manualmente. La primera lectura se tomará con el hidrómetro a los 40 segundos, registrando la temperatura. Por último, la mezcla se deja reposar y tomar la segunda lectura sin agitar a los 120 minutos.

Se realizará una corrección por temperatura, para la cual a cada lectura tomada con el hidrómetro se hace corrección mediante la siguiente fórmula:

- $\text{Lectura Corregida} = \{\text{Lectura} + [(\text{temperatura} - 19.5) * 0.36]\} * 2$
- $\% \text{ Arena} = 100 - \text{Primera lectura corregida}$
- $\% \text{ Arcilla} = \text{segunda lectura corregida}$
- $\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ arena} + \% \text{ arcilla})$

De acuerdo con los porcentajes obtenidos de arena, arcilla y limo se consultará el triángulo de texturas Figura 7 y donde se interceptan las líneas imaginarias trazadas de cada lado se obtendrá su clasificación por textura para el suelo.

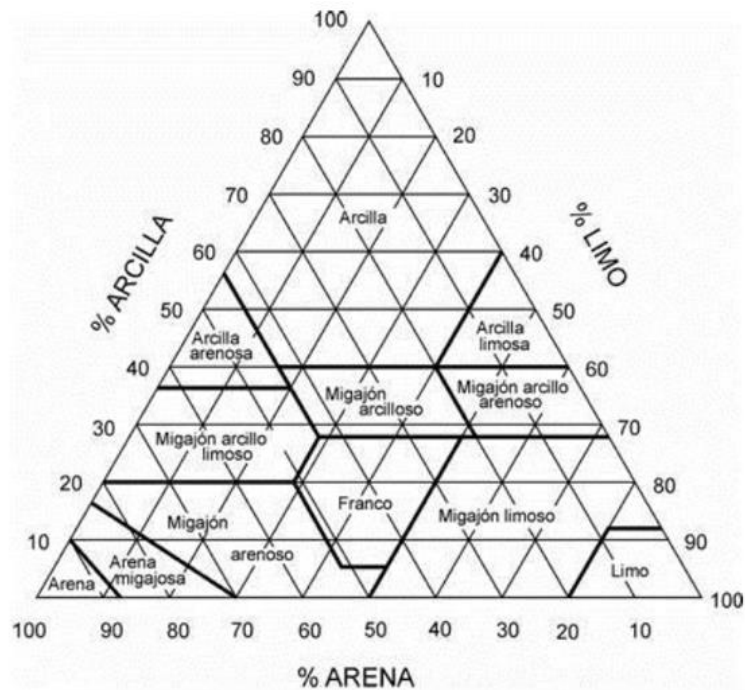


Figura 7. Triángulo de texturas.

7.1.2 Densidad aparente

La densidad es la masa del suelo referida al volumen que ocupa tomando en cuenta los espacios porosos, su determinación se llevará a cabo de acuerdo con la metodología de la probeta, en la cual primeramente son pesados 15 g de suelo, los cuales son introducidos en una probeta de 25 ml y compactados dentro de la probeta dando una serie de suaves golpes sobre una franela doblada y húmeda. Se deberá observar el descenso en el volumen hasta el volumen constante y registrar la última lectura de volumen. Por último, se realizarán el siguiente cálculo con los datos obtenidos.

$$\rho_{\text{aparente}} = \text{masa del suelo} / \text{volumen de suelo}$$

7.1.3 pH

Para la determinación del potencial de hidrógeno en agua en relación 1:2 se pesarán 20 g de suelo a los cuales se les adicionará 40 mL de agua destilada para ulteriormente agitar por 10 minutos en un agitador mecánico. La lectura se realizará ajustando el potenciómetro a pH 7.

7.1.4 Conductividad eléctrica

Por medio de la conductividad eléctrica se determina el contenido de sales de un suelo. Para su determinación, del extracto conservado del pH 1:2 en agua, se tomará directamente la C.E. del sobrenadante, utilizando la celda del conductímetro la cual debe estar calibrada con una solución patrón de 1413 μS .

7.1.5 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo es aquella que proviene de organismos vivos o muertos del suelo. Para su determinación primeramente se pesarán 0.25g de suelo y serán colocados dentro de un matraz Erlenmeyer de 250 ml posteriormente se adicionarán 5 ml de dicromato de potasio 0.5 N y 10 ml de ácido sulfúrico concentrado con precaución y agitando contantemente. Se deberá dejar enfriar y agregar agua corriente hasta aproximadamente 100 – 150 ml. Posteriormente agregar 1ml de ácido fosfórico concentrado. Agregar de 3 a 4 gotas de difenilamina y titular con sulfato ferroso 0.125 N hasta vire a color verde. Correr un blanco de reactivos.

$$\%MO = \frac{(V_1 N_1) - (V_2 N_2) * 0.69}{0.25} \quad \text{Ecuación. 1}$$

7.2 Evaluación de bioacumulación y toxicidad

Para determinar la bioacumulación de Cu^{2+} , se añadieron 25 ml de Cu^{2+} a 40, 20 y 10 ppm a tres diferentes plantas (respectivamente) de *Spinacia Oleracea* (espinaca) en 50 ml de suelo cada una (53 g) con 25 ml de solución de nutrición para simular el suelo contaminado de acuerdo con la metodología implementada por Eyvazi *et al.*, (2019). Posteriormente se realizó riego diario, de acuerdo con las especificaciones de la planta durante un periodo de tiempo de 14 días durante el cual, las plantas fueron monitoreadas con el fin de llevar un registro de su crecimiento. Una vez transcurrido dicho periodo, se realizó la determinación del cobre contenido en cada una de las muestras de suelo en las diferentes concentraciones.

7.3 Determinación de cobre en suelo

7.3.1 Digestión de las muestras de suelo

Se tomaron 3 g de muestra seca y se transfirieron a un balón de reacción de 250 ml donde posteriormente se adicionaron, gota a gota, 1 ml de agua destilada, 21 ml de HCl 37% y 7ml de HNO_3 65%; se conectó el balón de reacción al condensador, y la reacción se dejó a temperatura ambiente durante 16 horas; posteriormente, se aumentó la temperatura hasta la temperatura de reflujo durante dos horas. Una vez transcurrido, la reacción se dejó en reposo a temperatura ambiente hasta que precipitó cualquier residuo insoluble en el balón. El líquido sobrenadante se filtró por gravedad con un papel filtro cuantitativo de tamaño de poro de 8 μm y 150 mm de diámetro. El filtrado se recogió en un matraz volumétrico de 100 ml, y el residuo en el papel de filtro se lavó con unas gotas de HNO_3 0.5 mol L^{-1} , y este filtrado se recogió en un matraz Erlenmeyer, finalmente el matraz se llevó a volumen con agua destilada. Este extracto se transfirió a una botella de vidrio y se rotuló para su posterior análisis (Ramírez Niño & Navarro Ramírez, 2015).

7.3.2 Método de batocuproína

Durante el proceso de desarrollo del método de batocuproína primeramente es necesario realizar una curva de calibración, para la cual se partió de una solución patrón de cobre con una concentración de 1000 ppm, obteniéndose por medio de disoluciones las soluciones de calibración con concentraciones de 240, 150, 50, 20, 5, 0.025, 0.02, 0.015, 0.01 y 0.005 ppm. Dichas soluciones se utilizaron para realizar la curva de calibración antes mencionada. Ulteriormente para la determinación del contenido de cobre se procede con la metodología de Batocuproína; en la cual primeramente se agregó 1 ml de la muestra a analizar a un matraz Erlenmeyer de 50 ml, seguido de 1 ml de HCl, 5 ml de hidroxilamina, 5 ml de citrato de sodio y 5 ml de disulfonato de Batocuproína disódica, en este orden y agitando entre cada una de las adiciones de las soluciones. Posteriormente se leyó la absorbancia de la muestra contra el blanco a 484 nm. Este procedimiento se realizó con cada una de las muestras y posteriormente se estimó la concentración a partir de la curva de calibración (Brandi & Wilson Wilde, 2013).

7.4 Experimento de electrofitorremediación

Posteriormente a la germinación, las plántulas de *Spinacia Oleracea* se dejaron crecer durante un periodo de crecimiento de 30 días. Una vez finalizado dicho periodo se aplicó una corriente alterna (AC) a las plantas, conservando una planta sin la aplicación de la corriente alterna como un blanco para comparación.

En la Figura 8 se puede apreciar la configuración utilizada de los electrodos, así como las dimensiones del reactor en las cuales fue llevado el tratamiento. Por otra parte, los electrodos empleados son del material grafito con respecto a los ánodos y de acero inoxidable con respecto al cátodo. El campo eléctrico fue aplicado durante un periodo de 14 días (aplicados 8 hrs al día, en dos periodos de 4 hrs) hasta la cosecha de las plantas, manteniendo la corriente a 70 mA.

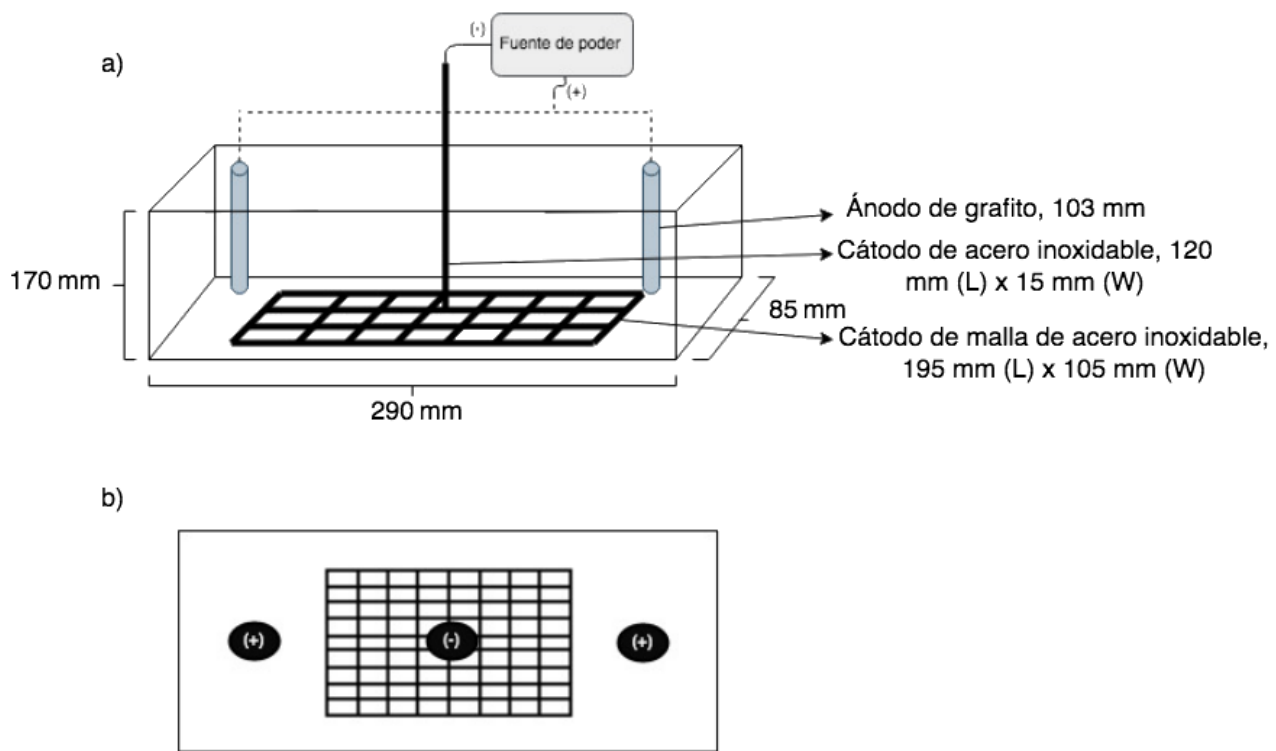


Figura 8. a) configuración de electrodos y diseño de reactor, b) imagen lateral de la configuración de los electrodos.

8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Muestreo de suelo

El muestreo del suelo utilizado fue recolectado del terreno del Instituto Tecnológico del Valle de Morelia (Figura 9), en la zona 14Q Coord. Este: 273504.53 m E. Norte: 2185353.45 m N



Figura 9. Ubicación de sitio de muestreo.

El muestreo fue realizado en los primeros 30 cm de la superficie del suelo (Figura 10), correspondientes a los horizontes “O” y “A” del perfil de suelo.



Figura 10. Muestreo de suelo.

Dichas muestras fueron secadas y tamizadas con el fin de prepararlas para la caracterización del suelo.

8.2 Caracterización del suelo

La caracterización del suelo fue realizada en el laboratorio de ingeniería ambiental en las instalaciones de la misma institución académica, en la cual se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización Físico-Química del suelo.

| <i>Parámetro</i> | <i>Valor</i> |
|--------------------------------|-------------------------|
| <i>pH</i> | 7.7 |
| <i>Conductividad eléctrica</i> | 0.751 dS/m |
| <i>Densidad aparente</i> | 1.07 g/cm ³ |
| <i>Materia orgánica</i> | 2.78 % |
| <i>Textura</i> | Franco arcilloso |
| <i>Arcilla y limo</i> | 38% |
| <i>Arena</i> | 62% |

Como puede observarse en la caracterización resultante del análisis del suelo extraído resulta de una textura franco-arcillosa, por lo que este tipo de suelo estando seco tiene agregados muy firmes y duros los cuales son resistentes a dejarse romper con la mano. Cuando este se pulveriza, el suelo presenta una sensación áspera al tacto debido a los pequeños agregados que persisten. Por otra parte, cuando está húmedo es muy maleable. Cuando se frota entre los dedos forma una cita que no se siente áspera ni suave. Este tipo de suelo contiene más arcilla de lo que se considera óptimo, debido a que son pesados y no drenan fácilmente siendo difíciles de trabajar si estos se encuentran muy secos.

De acuerdo con (Antúnez et al., 2015), la densidad aparente es un valor que varía con la textura, siendo estos valores para suelos no compactados en suelos franco arcillosos como el que presenta nuestra muestra de suelo de 1.33 g cm⁻³, dicho valor es importante en la clasificación de la calidad del suelo, ya que suelos con valores altos de densidad aparente determinan un ambiente pobre para el crecimiento de las raíces debido a la poca aireación y una baja infiltración del agua en el suelo.

Los suelos arcillosos muestran una baja densidad aparente debido a su gran interacción entre las partículas de cohesión y adhesión que generan un volumen considerable de poros

(Díaz, 2015). Como puede apreciarse en la Tabla 3, la densidad aparente resultante de la caracterización de la muestra de suelo nos da un valor de 1.07 g cm^{-3} , siendo esta una densidad aparente baja lo cual refleja una mayor porosidad y menor compactación.

Por otra parte, un factor importante que influye en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas en el suelo es el pH. Este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados para el crecimiento vegetal (Ibarra-Castillo, 2009). De manera general, el pH óptimo de los suelos agrícolas (Figura 11) debe variar entre 6.5 y 7 (Intagri, 2018).

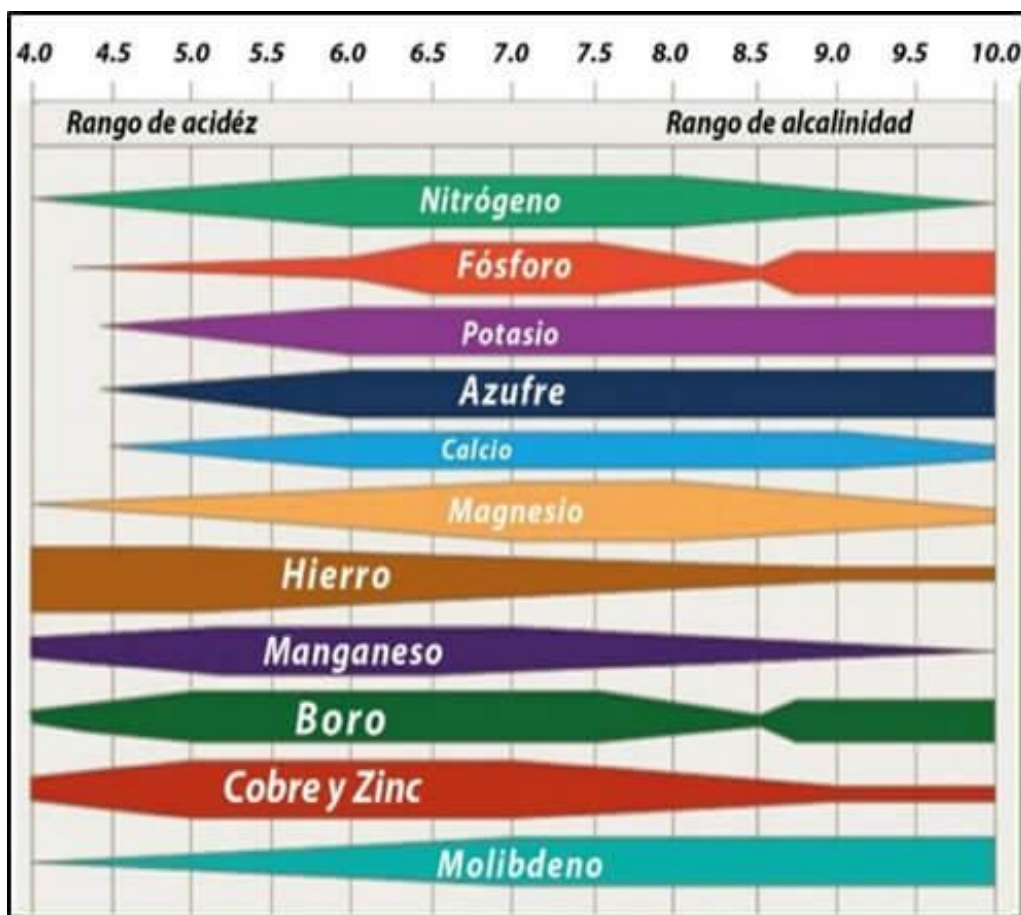


Figura 11. Disponibilidad de nutrientes respecto al pH. Recuperado de Castellanos, 2014.

Sin embargo, este rango de pH igualmente depende del cultivo (Figura 12) al que se somete la especie vegetal. En el caso de la *Spinacia Oleracea* este rango varía entre los valores de 6.5 y 8. Como puede observarse en la Tabla 3, el pH obtenido de la muestra de suelo utilizada es de 7.7, lo cual nos indica un óptimo pH para la realización de nuestro experimento.

| Cultivo | pH | | | | | | | |
|-----------|----|-----|---|-----|---|-----|---|-----|
| | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 |
| Alcachofa | | | | | | | | |
| Apio | | | | | | | | |
| Berenjena | | | | | | | | |
| Calabaza | | | | | | | | |
| Cebolla | | | | | | | | |
| Col | | | | | | | | |
| Coliflor | | | | | | | | |
| Espinaca | | | | | | | | |
| Lechuga | | | | | | | | |
| Maíz | | | | | | | | |
| Patata | | | | | | | | |
| Zanahoria | | | | | | | | |
| Habas | | | | | | | | |

Figura 12. Rango de pH más adecuado para cultivos. Adaptado de Mula (2012).

En el suelo la conductividad eléctrica (CE) determina la concentración de sales solubles presentes (Ca, Mg, Na, K, carbonatos, sulfuros y cloruros) en los suelos, proporcionando un indicativo de la salinidad presente en el medio. Esta influye en gran medida en el esfuerzo que tiene que realizar la raíz de la planta para absorber los nutrientes, por lo que al obtener un valor alto la especie vegetal tendrá que esforzarse en mayor medida para extraer dichos nutrientes (S.C., 2017). De igual manera salinidad disminuye el crecimiento de los cultivos al ocasionar una disminución en la disponibilidad del agua, llegando a presentar síntomas foliares como la deformación y amarillamiento en las hojas (Lorenz, 2012).

En la Tabla 4 podemos observar podemos observar una clasificación de los suelos con base en su CE y el efecto general de los cultivos.

Tabla 4. Condiciones de salinidad de los suelos respecto a su conductividad eléctrica. Adaptado de Lorenz (2004).

| CE [dS/m] | Condiciones de salinidad | de Descripción |
|------------------|---------------------------------|--|
| 0 - 2 | No salino | Libre de influencia, no existen limitaciones a los cultivos |
| 2 - 4 | Muy ligeramente salino | Casi libre de influencia, algunos cultivos muy sensibles muestran afectaciones |
| 4 - 8 | Ligeramente salino | Cultivos afectados, pero no impedidos |
| 8 - 15 | Moderadamente salino | Cultivos muy afectados, incluso impedidos, excepto los resistentes |
| >15 | Fuertemente salino | Todos los cultivos impedidos; sólo vegetación halófila natural |

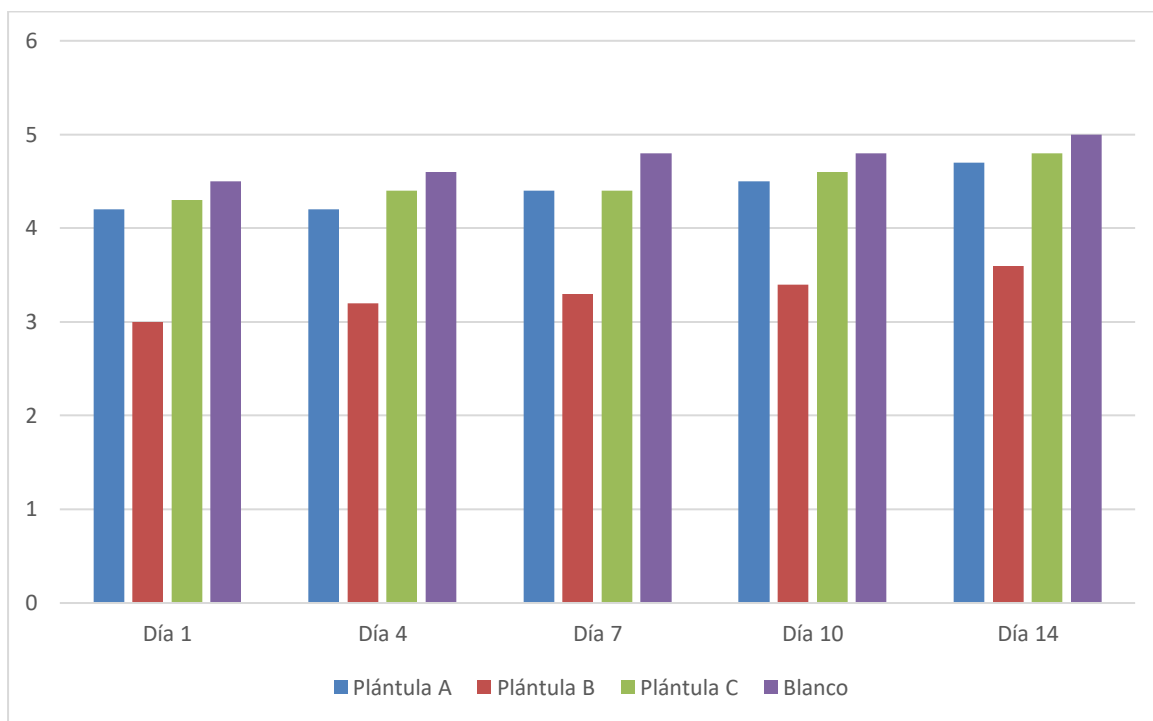
Como puede observarse en la Tabla 3, el valor obtenido de conductividad eléctrica para la muestra de suelo caracterizada es de 0.751 dS/m, colocándose en una condición no salino, por lo que no existen limitaciones para la *Spinacia Oleracea*.

La materia orgánica (MO) es un constituyente del suelo de gran importancia, ya que este afecta la calidad del suelo de manera que almacena y suministra los macro y micronutrientes a las plantas, incrementando la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de intercambio aniónico, estabilizando la acidez en el suelo, favorece la porosidad del suelo mejorando así la aireación y penetración del agua, además de aumentar la capacidad del suelo para retener agua entre otros (Docampo, 2014).

De acuerdo con (Julca-Otiniano *et al.*, 2006) el nivel deseable de materia orgánica en suelos arcillosos es de 2%, sin embargo, el porcentaje obtenido en la caracterización de la muestra de suelo es de 2.78%, lo cual nos indica un suelo medianamente rico en MO.

8.3 Evaluación de toxicidad

Una vez administradas las diferentes concentraciones a las plántulas, estas fueron observadas y monitoreadas cada día con el fin de tomar nota y evidencia fotográfica (Figura 13) con respecto a los cambios visibles presentados en su tamaño. Al finalizar el tiempo comprendido del experimento se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y se utilizó la prueba de comparación de medidas de Tukey (Anexo 2) con una confiabilidad del 95%, con el fin de analizar las diferencias con respecto al crecimiento de las plántulas siendo para lo cual se utilizó el programa Excel, concluyendo en base al resultado que no existen diferencias significativas en el crecimiento de las plántulas.



Gráfica 1. Crecimiento de plántulas durante experimento

Como se puede observar en la Gráfica 1 las plántulas sometidas al experimento no sufrieron una afectación significativa, debido a lo cual se considera que la especie *Spinacia Oleracea* es un organismo tolerante a las concentraciones de cobre sometidas, debido a lo cual se decidió aumentar dichas concentraciones de C_u .

En la Figura 13 puede observarse el progreso del experimento durante los 14 días en el que comprendió.

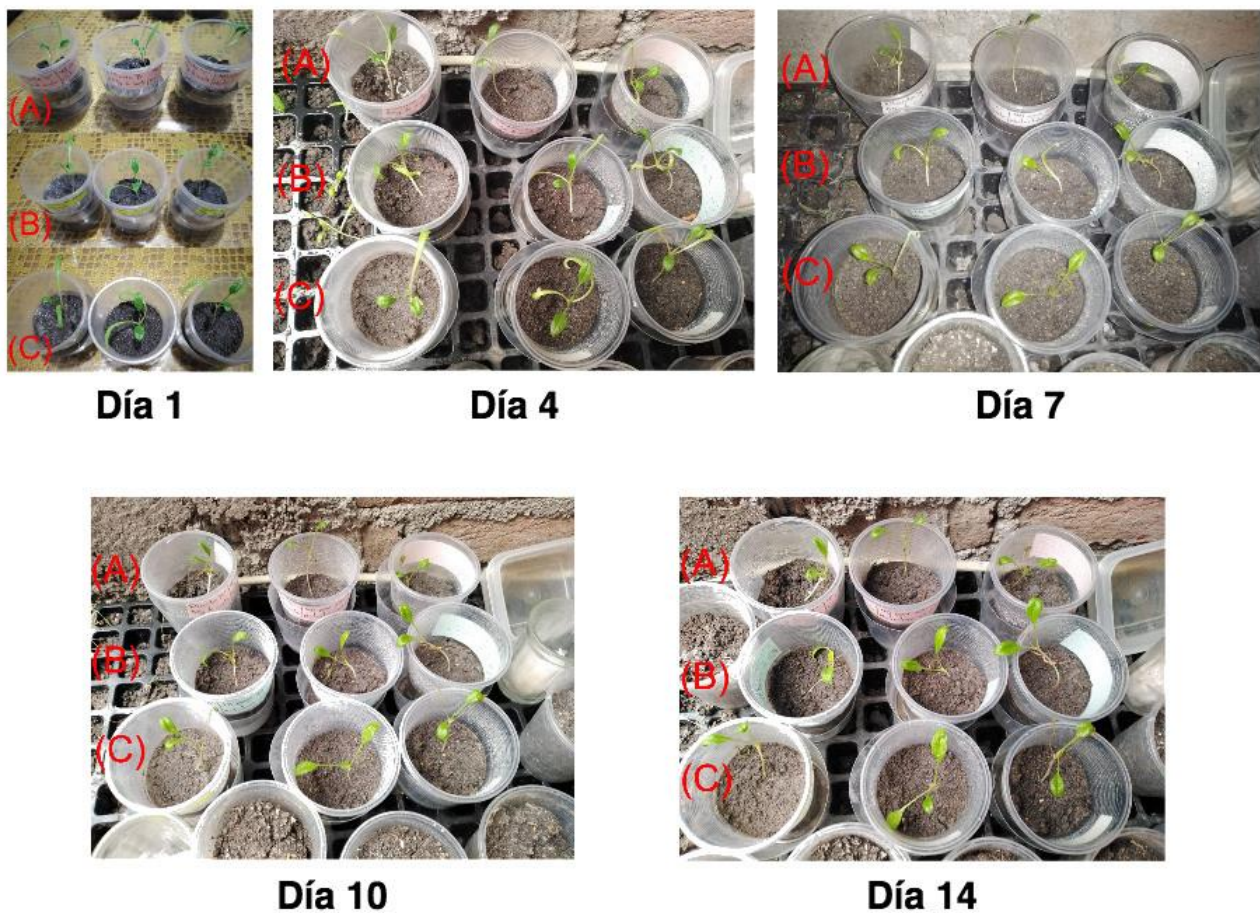


Figura 13. Progreso de crecimiento durante experimento de toxicidad

Como se mencionó anteriormente y es apreciable en la Gráfica 1, las plántulas no presentaron cambios significativos durante el tiempo que contempló el experimento, lo cual se le atribuye inicialmente que el cobre es un micronutriente esencial para los organismos.

8.4 Electrofitorremediación

El acomodo e inicio del experimento de electrofitorremediación puede ser observado en la Figura 14. Dicho proceso se realizó durante un periodo de 14 días (Figura 15) con una concentración de cobre de 150 ppm en 4 kg de suelo. Durante el proceso se realizó simultáneamente un registro del tamaño de las plantas, número de hojas así como la tonalidad de las plantas, las cuales pueden observarse en la Tabla 5.



Figura 14. Acomodo e inicio de experimento de electrofitorremediación.



Día 1



Día 2



Día 3



Día 4



Día 5



Día 6



Día 7



Día 8



Día 9



Día 10



Día 11



Día 12



Día 13



Día 14

Figura 15. Espinaca durante experimento de electrofitorremediación.

Tabla 5. Registro de crecimiento y número de hojas en espinacas.

Condiciones de plantas registradas por días

| Día | Tamaño (cm) | | Número de hojas | |
|-----|-------------|----------|-----------------|----------|
| | Planta A | Planta B | Planta A | Planta B |
| 1 | 8.5 | 10.5 | 7 | 9 |
| 2 | 8.5 | 10.5 | 7 | 9 |
| 3 | 8.5 | 10.5 | 7 | 9 |
| 4 | 8.5 | 10.7 | 7 | 9 |
| 5 | 8.5 | 10.7 | 6 | 9 |
| 6 | 8.5 | 10.9 | 6 | 9 |
| 7 | 8.7 | 10.9 | 6 | 9 |
| 8 | 8.7 | 11.3 | 6 | 10 |
| 9 | 8.7 | 11.3 | 7 | 10 |
| 10 | 9 | 11.3 | 7 | 10 |
| 11 | 9 | 11.5 | 7 | 10 |
| 12 | 9 | 11.5 | 7 | 10 |
| 13 | 9.3 | 11.5 | 7 | 10 |
| 14 | 9.3 | 11.5 | 7 | 10 |

Como puede apreciarse en la Figura 15 y la Tabla 5, durante el experimento se mostró un cambio en el estado de las plantas sometidas a la concentración de 150 ppm. Durante el desarrollo del experimento en ambas plantas se observaron síntomas foliares típicos de estrés, como es el desarrollo escaso de las plantas y clorosis de las hojas. Dichos síntomas comenzando a mostrarse a partir del día cuatro del experimento con el amarillamiento de una de las hojas de la planta “A”, además de la disminución de la firmeza en el peciolo.

A pesar de presentar dichos síntomas en diversas hojas de las plantas “A” y “B”, ambas plantas contaron con un crecimiento continuo.

Una vez finalizado el tiempo comprendido del experimento de electrofitorremediación se procedió a realizar la digestión del suelo usado, esto con el fin de poder comparar la efectividad de remoción una vez añadido el proceso electrocinético. Dicha digestión se implementó utilizando la metodología descrita con anterioridad.

8.4.1 Digestión de muestras de suelo.

Se realizó la digestión (Figura 16) de las muestras de suelo con tratamiento de electrofitorremediación y un blanco, así como también para el tejido vegetal, los resultados obtenidos de su análisis (Tabla 6) muestran una remoción significativa del cobre presente en el suelo contaminado mediante electrofitorremediación con un 91% de eficiencia de remoción, lo cual es indicativo que el tratamiento es eficiente para remoción de cobre en suelo.

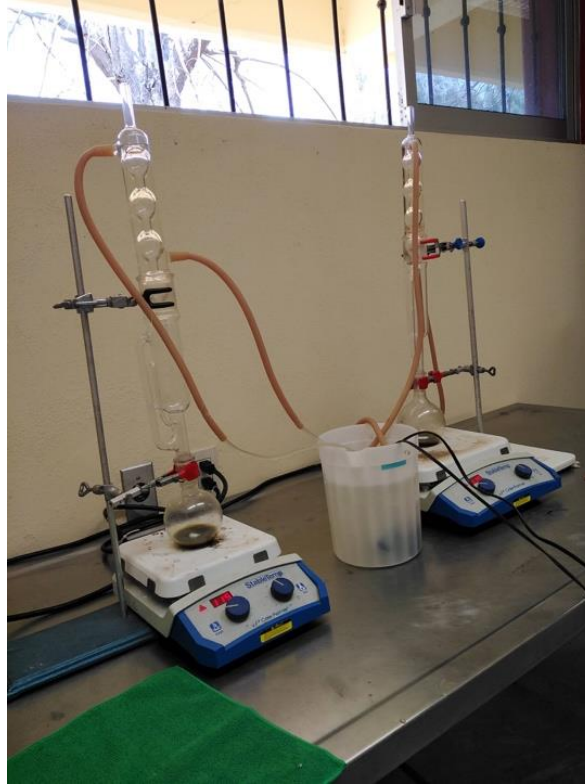


Figura 16. Digestión de muestras de suelo resultantes de fitorremediación.

Tabla 6. Resultados de digestión de muestras de suelo.

| Muestra | Concentración | mg/L / g suelo | %Eficiencia de remoción |
|-------------------------|---------------|-------------------|----------------------------|
| Blanco | 21.7391 | 7.24 | |
| Electrofitorremediación | 1.9565 | 0.65 | 91.03 |

Como es apreciable en la Tabla 6, se muestra un incremento en la eficiencia de remoción con el tratamiento de electrofitorremediación, mostrando que la adición del proceso electrocinético al de fitorremediación aumenta la eficiencia de remoción del cobre.

De manera simultanea se realizó un análisis del material vegetativo resultante del experimento de electrofitorremediación con el fin de analizar la cantidad de concentración del cobre acumulada en la especie vegetal. Como es apreciable en la Tabla 7, una concentración significativa del cobre fue acumulada en el tejido vegetal de la especie *Spinacia Oleracea* de la cual una parte de ella es utilizada por la especie para su óptimo desarrollo vegetal, sin embargo, al observar el aumento de la concentración en la planta con el tratamiento de electrofitorremediación, se observa que ese porcentaje de aumento con respecto al blanco es del 36.92%.

Tabla 7. Concentración de cobre en material vegetativo con tratamiento de electrofitorremediación.

| Tratamiento | Concentración mg/L / g planta | % Aumento de concentración |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Blanco | 2.2283 | |
| Electrofitorremediación | 3.5326 | 36.92% |

9.- CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se permite concluir que el método de electrofitorremediación tiene un porcentaje de eficiencia de remoción de cobre del 91.03%, indicando con ello que es una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados con cobre o con metales pesados.

El análisis de varianza resultante de los experimentos toxicológicos muestra que la *Spinacia Oleracea*, no muestra cambios significativos con la solución de sulfato de cobre y las diferentes concentraciones utilizadas, concluyéndose en una resistencia a estas concentraciones.

El análisis de suelo y de tejido vegetal realizado exhibe, por un lado, la remoción de cobre del suelo y la bioacumulación de cobre en la planta *Spinacia Oleracea* con un 36.92% de aumento en la concentración de cobre.

Por otro lado, a dicha remoción se le atribuyen los síntomas presentados en las especies vegetales debido a las altas concentraciones a las que fueron sometidas como es la clorosis presentada en las hojas. Debido a lo cual, se considera a la especie *Spinacia Oleracea* como una planta óptima para su uso en el tratamiento de electrofitorremediación en suelos.

Al ser una técnica novedosa su aplicación presenta limitaciones, sin embargo, los resultados obtenidos permiten replantear nuevas estrategias para obtener procesos de electrofitorremediación de metales pesados más eficientes debido a lo cual la convierten en un proceso prometedor.

10.- RECOMENDACIONES

- Tomar en cuenta las propiedades de resistencia eléctrica de la muestra de suelo a utilizar, durante el proceso. Dicha resistencia puede ser medida durante la caracterización de la muestra y tomada en cuenta durante la aplicación de corriente eléctrica.
- Realizar un diseño del reactor que facilite mantener un flujo constante de corriente eléctrica, de modo que la muestra de suelo pueda mantenerse húmedo.
- Implementación de líquido que ayude a la conductividad eléctrica así como mantener la resistencia deseada cerca de los electrodos.

11.- ANEXOS

ANEXO 1 “CURVA DE CALIBRACIÓN”

Para el análisis de las muestras de suelo con tratamiento se realizaron una serie de soluciones con concentraciones de 240, 150, 50, 20, 5, 0.025, 0.02, 0.015, 0.01 y 0.005 ppm con el fin de analizar su absorbancia (Tabla 8) y posteriormente realizar una curva de calibración (Figura 17) de modo que esta sirva para realizar la lectura de la digestión de las muestras.

Tabla 8. Absorbancia de soluciones de calibración.

| <i>Concentración (ppm)</i> | <i>Absorbancia</i> |
|----------------------------|--------------------|
| 240 | 2.118 |
| 150 | 1.501 |
| 50 | 0.5075 |
| 20 | 0.257 |
| 5 | 0.068 |
| 0.025 | 0.046 |
| 0.02 | 0.0265 |
| 0.015 | 0.054 |
| 0.01 | 0.034 |
| 0.005 | 0.011 |

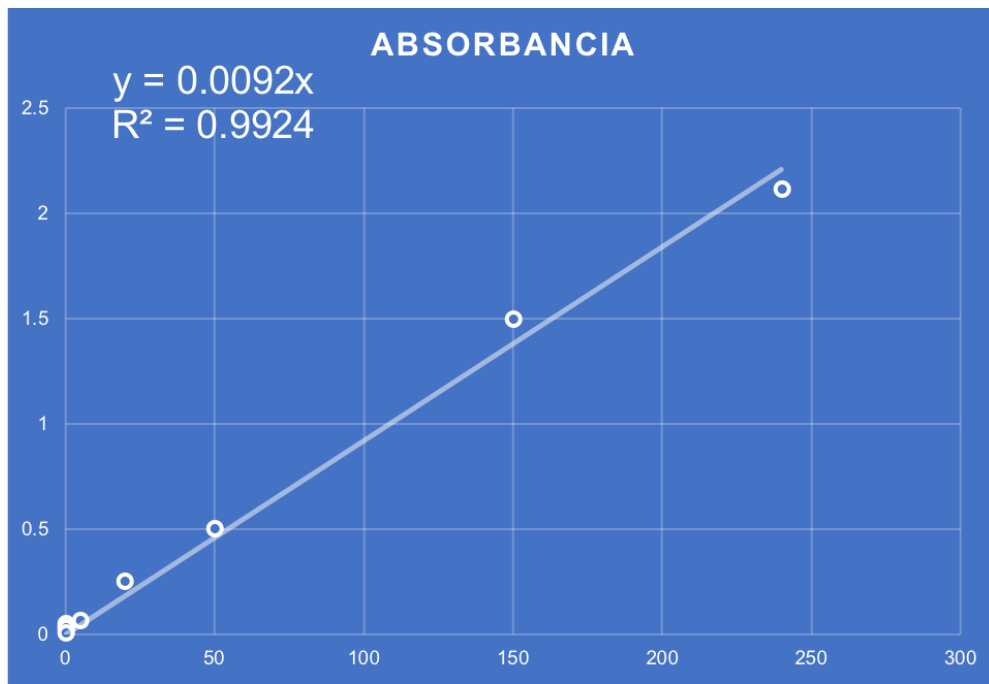


Figura 17. Curva de calibración

ANEXO 2 “ANÁLISIS DE VARIANZA Y PRUEBA DE TUKEY”

| | | Día 1 | Día 4 | Día 7 | Día 10 | Día 14 |
|--|------------------|--------|-------|-------|--------|--------|
| | Plántula A | 4.2 | 4.2 | 4.4 | 4.5 | 4.7 |
| | Plántula B | 3 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.6 |
| | Plántula C | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.6 | 4.8 |
| | Blanco | 4.5 | 4.6 | 4.8 | 4.8 | 5 |
| | Suma(xi)= | 16 | 16.4 | 16.9 | 17.3 | 18.1 |
| | Media= | 4 | 4.1 | 4.225 | 4.325 | 4.525 |
| | Suma total(x..)= | 84.7 | | | | |
| | ni= | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | N= | 20 | | | k= | 5 |
| | SCTrat = | 0.663 | | | | |
| | SCTotal= | 6.8255 | | | | |
| | SCError= | 6.1625 | | | | |

| Tabla ANOVA | | | | |
|------------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------|
| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | F |
| Entre las muestras | 0.663 | 4 | 0.16575 | 0.40344828 |
| Dentro de las muestras | 6.1625 | 15 | 0.41083333 | |
| Total | 6.8255 | 19 | | |

| | |
|--|------------|
| (Valor crítico) $F_{\alpha, k-1, N-k}$ = | 3.05556828 |
| p-valor= | 0.80323455 |

SE ACEPTA LA HIPÓTESIS NULA. NO EXISTEN DIFERENCIAS EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLÁNTULAS

PRUEBA DE TUKEY

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{CM_E / n_i}$$

| | | | Diferencia poblacional | Diferencia muestral | Decisión |
|-----------------------|------------|--|------------------------|---------------------|------------------|
| k= | 5 | | $\mu_A - \mu_B$ | 0.1 | No significativa |
| N-k= | 15 | | $\mu_A - \mu_C$ | 0.225 | No significativa |
| CME= | 0.41083333 | | $\mu_A - \mu_D$ | 0.325 | No significativa |
| ni= | 4 | | $\mu_A - \mu_E$ | 0.525 | No significativa |
| $q_{\alpha}(k, N-k)=$ | 4.37 | | $\mu_B - \mu_C$ | 0.125 | No significativa |
| | | | $\mu_B - \mu_D$ | 0.225 | No significativa |
| $T_{\alpha}=$ | 1.40050376 | | $\mu_B - \mu_E$ | 0.425 | No significativa |
| | | | $\mu_C - \mu_D$ | 0.1 | No significativa |
| | | | $\mu_C - \mu_E$ | 0.3 | No significativa |
| | | | $\mu_D - \mu_E$ | 0.2 | No significativa |

ANEXO 3 “PRODUCTOS”



El Gobierno del Estado de Michoacán, a través del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación, en colaboración con el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Morelia y el respaldo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología otorgan la presente:

CONSTANCIA

VERONICA JANETTE CEDEÑO GARCIDUEÑAS; CARLOS AUGUSTO RAMÍREZ RAMÍREZ; RICARDO RANGEL SEGURA; CARMEN CECILIA GARCÍA CASTILLO; OMAR AUGUSTO SÁNCHEZ ORTÍZ; LUIS DANIEL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ; ANGEL PANTOJA MARTÍNEZ

A:

POR LA EXPOSICIÓN DE SU PONENCIA *FITOELECTROREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON COBRE MEDIANTE EL USO DE SPINACIA OLERACEA*. EN EL EJE 1. INVESTIGACIÓN BÁSICA DE LA MESA 2: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

En el marco de las actividades académicas del



y el



Morelia, Michoacán, a 22 de Octubre de 2021


Biol. María Piedad Trujillo García
Directora General del Instituto de Ciencia
Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán


Dr. José Luis Gil Vázquez
Director del Tecnológico Nacional de México,
campus Instituto Tecnológico de Morelia

FITOELECTROREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON COBRE MEDIANTE EL USO DE *SPINACIA OLERACEA*.

Veronica Janette Cedeño Garcidueñas¹, Ricardo Rangel Segura², Carlos Augusto Ramírez Ramírez³, Garmen Cecilia García Castillo⁴, Omar Augusto Sánchez Ortiz⁵, Luis Daniel Hernández Martínez⁶, Ángel Pantoja Martínez⁷.

Resumen

Palabras Clave: (Fitoremediación, Electrocinética, Remedación).

La contaminación del suelo es un problema a nivel mundial que afecta el desarrollo de la vida, destacando en esta la contaminación por metales pesados provenientes principalmente de las descargas industriales y la industria minera. Entre los contaminantes, el cobre en grandes concentraciones tiene un significativo impacto negativo en el medio ambiente, afectando los procesos naturales de los organismos vivos, así como también circular a través de la cadena trófica provocando la bioacumulación y derivando en enfermedades.

Existen diversas técnicas de remoción de metales pesados presentes en suelo, como la remediación electrocinética y la fitorremediación, sin embargo, estos cuentan con limitaciones en su utilización por separado, como lo es la profundidad de remoción y la acumulación lenta del contaminante. En esta investigación se presenta un estudio de uso combinado de remediación electrocinética y fitorremediación para eliminar el cobre presente en suelo contaminado utilizando *Spinacia Oleracea*, electrodos de grafito y acero inoxidable y corriente alterna. Los resultados obtenidos muestran que el suelo contaminado que contenía 150 ppm de cobre tras el proceso de electroremediación disminuye significativamente su concentración.

¹ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, veronica.cg@vmorelia.tecnm.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, rangeo@umich.mx

³ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, skarlo2012@gmail.com

⁴ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, carmen.gc@vmorelia.tecnm.mx

⁵ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, omar.so@vmorelia.tecnm.mx

⁶ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, hermar.luisdan97@gmail.com

⁷ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, 10060001@vmorelia.tecnm.mx

Introducción

El suelo es de difícil y larga recuperación, debido a que tarda de miles a cientos de miles de años en formarse, siendo también de extensión limitada, por lo que es considerado un recurso natural no renovable (Silva & Correa, 2009). El suelo alberga una gran biodiversidad de organismos que impulsan los servicios ecológicos necesarios para todas las funciones de los ecosistemas terrestres. El suelo es producto de la interacción compleja de varios factores, entre ellos la roca madre, el tiempo, el clima, las plantas, animales y la topografía. En este proceso la roca madre se meteoriza por los agentes meteorológicos y debido a ello la roca se va fragmentando. Después, estos fragmentos de roca se entremezclan con restos orgánicos como heces, organismos muertos o en descomposición, fragmentos de vegetales, pequeños organismos que viven en el suelo y con el paso del tiempo todos estos materiales se van estratificando y terminan por formar el suelo (Tarbuck *et al.*, 2005). Debido a todo este proceso de formación y los procesos biogeoquímicos involucrados es considerado un recurso no renovable y la importancia de su conservación y remediación.

Hacia la década de los 90's el centro de Internacional de Referencia e Información sobre los suelos (ISRIC) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) colaboraron en la estimación global de 22 hectáreas de suelos afectadas por la contaminación, no obstante, datos más recientes indican que este número podría subestimar la naturaleza y alcance del problema (ONU, 2018). La contaminación de suelo es su gran mayoría es debida a procesos antropogénicos como las industria minera, el cultivo de alimentos, eliminación de desechos, entre otros. En el caso particular de contaminación por metales pesados proveniente de desechos con alto contenido de metales, es persistente y compleja, debido a que puede formar parte de la cadena trófica y afectar la salud humana con la consecuencia de enfermedades mortales, así como también la degradación de los ecosistemas. Es por ello que se han buscado alternativas que permitan la recuperación de los suelos mediante tecnologías fisicoquímicas, así como también las de fitoremediación, en este trabajo se plantea la remediación de suelo contaminado con cobre mediante un proceso combinado de fitoremediación y la electroremediación, que en conjunto prometen ser una alternativa efectiva para la remoción de metales pesados.

ANTECEDENTES

Las principales fuentes antropogénicas de contaminación del suelo son los agentes químicos, siendo entonces de gran importancia el saneamiento de los suelos contaminados y el desarrollo de métodos que permitan su recuperación.

En el trabajo de Vidal *et al.*, (2010) se llevó a cabo un proceso de remoción de mercurio empleando la fitoremediación con el uso del guarumo (*Cecropia peltata*) y ácido cítrico como agente quelante, obteniendo, porcentajes de remoción comprendidos entre 15.7% y 33.7%, esto debido a la gran capacidad de la planta para acumular cantidades grandes

del metal sin presentar efectos tóxicos considerables, siendo este un ejemplo de fitoremediación.

Por otro lado, en el trabajo de Putra *et al.*, (2013) realizaron un estudio de un sistema de fitoremediación asistido con electrocinética (sistema EAPR) en la eliminación del plomo presente en suelos utilizando azul de Kentucky, obteniendo como resultados la acumulación de plomo en las raíces de la planta.

Otro trabajo a destacar de fitoelectroremediación es el presentado por Aboughalma *et al.*, (2008) quienes estudiaron el mejoramiento electrocinético de la fitoremediación implementado en suelo contaminado con Zn, Pb, Cu y Cd utilizando plantas de patata, y aplicando corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). Obteniendo una mayor acumulación general del metal en las raíces de las plantas tratadas con campos eléctricos que en el control. Siendo mayor la absorción de Zn en los brotes de las plantas bajo tratamiento con AC comparado con el control y el tratamiento con DC. La acumulación de Zn y Cu en las raíces de las plantas bajo el tratamiento de AC y DC fue similar, y ambas fueron mayores en comparación con el control. El contenido de Cd en las raíces de las plantas bajo los tres tratamientos se encontró que era más alto que el del suelo. Por último, se encontró que la acumulación de Pb en las raíces y la absorción en los brotes fue menor en comparación con su contenido en el suelo.

Materiales y Métodos

Como primera parte de la metodología se procedió a la caracterización del suelo respecto a algunas de sus propiedades fisicoquímicas, tales como, pH, conductividad y textura. Posterior a ello, se realizó la germinación de las plántulas de *Spinacia Oleracea*, las cuáles se dejaron crecer durante un periodo de 30 días. Una vez finalizado dicho periodo se aplica una corriente alterna (AC) al suelo contaminado con 150 ppm, dónde se tienen las plantas de espinaca presentes, es necesario resaltar que se debe conservar un blanco para su posterior comparación.

En la Fig. 1, se puede apreciar la configuración utilizada de los electrodos. Los electrodos empleados son de grafito utilizados como ánodo, y como cátodo una rejilla de acero inoxidable. El campo eléctrico fue aplicado durante un periodo de 14 días por periodos intermitentes (aplicados 8 hrs al día, en dos periodos de 4 horas) hasta la cosecha de las plantas, y la corriente se mantuvo a 70 mA. El análisis del contenido de cobre se efectuó a través de dos etapas, la primera de ellas utilizando una digestión ácida (agua regia), con la finalidad de extraer tanto del suelo como de las espinacas el cobre presente en las muestras. La segunda etapa consistió en cuantificar esa cantidad de cobre, a través del método colorimétrico de batocuproína.

del metal sin presentar efectos tóxicos considerables, siendo este un ejemplo de fitoremediación.

Por otro lado, en el trabajo de Putra *et al.*, (2013) realizaron un estudio de un sistema de fitoremediación asistido con electrocinética (sistema EAPR) en la eliminación del plomo presente en suelos utilizando azul de Kentucky, obteniendo como resultados la acumulación de plomo en las raíces de la planta.

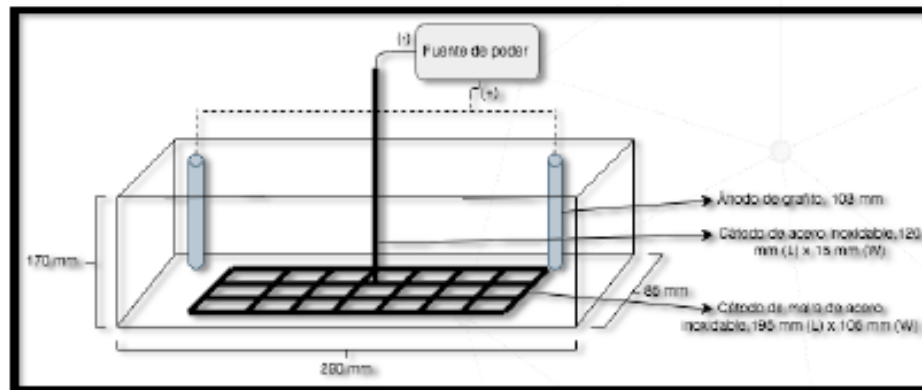
Otro trabajo a destacar de fitoelectroremediación es el presentado por Aboughalma *et al.*,(2008) quienes estudiaron el mejoramiento electrocinético de la fitoremediación implementado en suelo contaminado con Zn, Pb, Cu y Cd utilizando plantas de patata, y aplicando corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). Obteniendo una mayor acumulación general del metal en las raíces de las plantas tratadas con campos eléctricos que en el control. Siendo mayor la absorción de Zn en los brotes de las plantas bajo tratamiento con AC comparado con el control y el tratamiento con DC. La acumulación de Zn y Cu en las raíces de las plantas bajo el tratamiento de AC y DC fue similar, y ambas fueron mayores en comparación con el control. El contenido de Cd en las raíces de las plantas bajo los tres tratamientos se encontró que era más alto que el del suelo. Por último, se encontró que la acumulación de Pb en las raíces y la absorción en los brotes fue menor en comparación con su contenido en el suelo.

Materiales y Métodos

Como primera parte de la metodología se procedió a la caracterización del suelo respecto a algunas de sus propiedades fisicoquímicas, tales como, pH, conductividad y textura. Posterior a ello, se realizó la germinación de las plántulas de *Spinacia Oleracea*, las cuáles se dejaron crecer durante un periodo de 30 días. Una vez finalizado dicho periodo se aplica una corriente alterna (AC) al suelo contaminado con 150 ppm, dónde se tienen las plantas de espinaca presentes, es necesario resaltar que se debe conservar un blanco para su posterior comparación.

En la Fig. 1, se puede apreciar la configuración utilizada de los electrodos. Los electrodos empleados son de grafito utilizados como ánodo, y como cátodo una rejilla de acero inoxidable. El campo eléctrico fue aplicado durante un periodo de 14 días por periodos intermitentes (aplicados 8 hrs al día, en dos periodos de 4 horas) hasta la cosecha de las plantas, y la corriente se mantuvo a 70 mA. El análisis del contenido de cobre se efectuó a través de dos etapas, la primera de ellas utilizando una digestión ácida (agua regia), con la finalidad de extraer tanto del suelo como de las espinacas el cobre presente en las muestras. La segunda etapa consistió en cuantificar esa cantidad de cobre, a través del método colorimétrico de batocuproína.

Figura 1. Configuración de electrodos en el reactor



Resultados

La caracterización del suelo permite determinar que el suelo tiene un pH de 7.7, una conductividad eléctrica 751 μS , con una textura franco arcilloso. Los resultados obtenidos enmarcan que el contenido de cobre en el suelo es de 3.8 ppm aproximadamente, mientras que la bioacumulación de cobre en los tejidos de la planta es de 124.71 ppm aproximadamente. En cuanto al pH del suelo se mantuvo dentro del rango de lo neutro. Al observar estas cifras se puede comentar que el proceso de electrocinética está permitiendo la disposición del cobre en las plantas, las cuales al tener disponibles estos iones los capturan y bioacumulan en sus tejidos. Por otro lado, el mantenimiento del pH neutro en el suelo, está directamente relacionado con el uso de la AC, con la cual se sabe que el pH no varía significativamente.

Conclusiones

A pesar de que la fitoremediación es una metodología superficial, la combinación de ésta con electrocinética permite el movimiento de iones metálicos, los cuales son bioacumulados en las plantas, en este caso, las espinacas mostraron una gran bioacumulación de cobre en sus tejidos, permitiendo visualizar que la electrofitoremediación es una metodología prometedora en la remediación de suelos contaminados con metales pesados.

Referencias

Aboughalma, H., Bi, R., & Schlaak, M. (2008). Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances*

and *Environmental Engineering*, 43(8), 926–933.
<https://doi.org/10.1080/10934520801974459>

ONU. (2018). *La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro* | FAO Stories | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/11269771>

Putra, R. S., Ohkawa, Y., & Tanaka, S. (2013). Application of EAPR system on the removal of lead from sandy soil and uptake by Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.). *Separation and Purification Technology*, 102, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.09.025>

Silva, S., & Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13–34. <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2>

Tarbut, Edward J.; Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. (Pearson Educación S. A. (ed.); 8ª).

Vidal, J., Marrugo Negrete, J., Jaramillo, B., & Perez, L. (2010). Biorremediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Congreso de Séptimo*, 1–35.

12.- BIBLIOGRAFÍA

- Aboughalma, H., Bi, R., & Schlaak, M. (2008). Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 43(8), 926–933.
<https://doi.org/10.1080/10934520801974459>
- Acar, Y. B., & Alshawabkeh, A. N. (1993). Principles of Electrokinetic Remediation. *Environmental Science and Technology*, 27(13), 2638–2647.
<https://doi.org/10.1021/es00049a002>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2016). *Cromo (Chromium) | ATSDR*.
https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts7.html#bookmark4
- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. In B. J. Alloway (Ed.), *Arsenic. Blackie Academic and Professional, London* (3rd ed.). Springer Netherlands.
<https://www.springer.com/gp/book/9789400744691>
- Antúnez, A., Felmer, B. S., Vidal, E. M., & Morales, S. R. (2015). Propiedades físico - hídricas del suelo en el cultivo del maíz grano. *Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. No. 312*, 31–50.
<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7894>
- Arias, L., Fuentes, L., Gil, R., Niño, N., & Rodríguez, M. (2010). *El cultivo de la Espinaca y su manejo fitosanitario en Colombia. 11*, 42.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13123>
- ATSDR. (2004). *Resumen de Salud Pública: Cobre*. www.atsdr.cdc.gov/es
- ATSDR. (2016a). *Níquel (Nickel) | ToxFAQ | ATSDR*.
https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts15.html#bookmark4

- ATSDR. (2016b, May 6). *Cinc (Zinc) | PHS | ATSDR*.
https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html
- Aulianida, D., Liestyasari, S. I., & Ch, S. R. (2015). SEMARNAT. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Bayón, S. (2015). *Aplicación de la fitorremediación a suelos contaminados por metales pesados*. 23. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/47872/1/BAYÓN SANZ, SARA.pdf>
- Bernal, M. P., Clemente, R., Vazquez, S., & Walker, D. J. (2007). *Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar*.
http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=483&Id_Categoria=2&tipo=portada
- Brandi, J., & Wilson Wilde, L. (2013). Standard Methods. *Encyclopedia of Forensic Sciences: Second Edition*, 522–527. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382165-2.00237-3>
- Carpenter, S., Caraco, N. F., Corell, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Issues in Ecology*. <https://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2013/03/issue3.pdf>
- Cartaya, O. E., Reynaldo, I., Peniche, C., & Garrido, M. L. (2011). Empleo de polímeros naturales como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 27(1), 41–46.
- Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B., & Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). AFECTACIONES Y CONSECUENCIAS DE LOS DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS AGRÍCOLAS DE ACATZINGO, PUEBLA, MÉXICO. *Centro Interdisciplinario de Posgrados. Universidad Popular Autónoma Del Estado de Puebla.*, 11, 539–550. <http://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v11n4/v11n4a6.pdf>
- Cortés-Jiménez, E. V., Mugica-Álvarez, V., González-Chávez, M. C. A., Carrillo-González, R., Gordillo, M. M., & Mier, M. V. (2013). Natural Revegetation of Alkaline Tailing Heaps At Taxco, Guerrero, Mexico. *International Journal of Phytoremediation*, 15(2), 127–141. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.683208>

- De la Rosa Perez, D. A., Teutli León, M. M. M., & Ramírez Islas, M. E. (2007). ELECTORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS, UNA REVISIÓN TÉCNICA PARA SU APLICACIÓN EN CAMPO. In *Rev. Int. Contam. Ambient* (Vol. 23, Issue 3). moz-extension://1d8fc7cf-4ecd-1a44-b8d5-9c772ea21853/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Fwww.scielo.org.mx%2Fpdf%2Frica%2Fv23n3%2Fv23n3a3.pdf
- Delgadillo López, A. E., González Ramírez, C. A., Prieto García, F., Villagómez Ibarra, J. R., & Acevedo Sandoval, O. (2011). *FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN*. Tropical and Subtropical Agroecosystems. moz-extension://1d8fc7cf-4ecd-1a44-b8d5-9c772ea21853/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Fwww.scielo.org.mx%2Fpdf%2Ftsa%2Fv14n2%2Fv14n2a2.pdf
- Díaz, E. (2015). Propiedades físicas del suelo. *Poblacion y Muestra*, 67. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/31396/secme-20123.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Docampo, R. (2014). LA IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y SU MANEJO EN PRODUCCIÓN FRUTÍCOLA. *INIA*, 67, 81–89. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1199/1/128221131113111309.pdf>
- Frumin, G. T., & Gildeeva, I. M. (2014). Eutrophication of water bodies - A global environmental problem. *Russian Journal of General Chemistry*, 84(13), 2483–2488. <https://doi.org/10.1134/S1070363214130015>
- Fundación Aquae. (2017). *Tipos de contaminación según sus características*. <https://www.fundacionaquae.org/tipos-contaminacion/>
- González, M. I., del Pozo, A., Cotroneo, D., & Pertierra, R. (2004). Días a floración en espinaca (*Spinacia oleracea* L.) en diversas épocas de siembra: respuesta a la temperatura y al fotoperíodo. *Agricultura Técnica*, 64(4). <https://doi.org/10.4067/s0365-28072004000400001>

- Hernández Laura, G., Ramírez Marissa, V., & Cruz Víctor, R. (2011). *Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos.*
- Ibarra-Castillo, D. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos Agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura Técnica En México*, 35(3), 267–276.
- Instituto Geográfico Nacional. (2016). *Contaminación en España*. Ministerio de Fomento. moz-extension://1d8fc7cf-4ecd-1a44-b8d5-9c772ea21853/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.ign.es%2Fespmmap%2Fmapas_conta_bach%2Fpdf%2FContam%2520_mapa_01_texto.pdf
- Intagri, S. C. (2018). *Disponibilidad de Nutrientes y el pH del Suelo*. Artículos Técnicos de INTAGRI. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrientes-y-el-ph-del-suelo>
- Iturbe, R., Flores, C., Castro, A., & Torres, L. G. (2007). Sub-soil contamination due to oil spills in zones surrounding oil pipeline-pump stations and oil pipeline right-of-ways in Southwest-Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 133(1–3), 387–398. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9593-y>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La Materia Orgánica, Importancia Y Experiencia De Su Uso En La Agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49–61. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292006000100009>
- Kaifer Brasero, M. J., Aguilar Peña, A., Arana Jimenez, E., Balseiro Bonillo, C., Torá Mouvet, I., Caleyá Sánchez, J. M., & Pijls, C. (2004). *GUÍA DE TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS*. Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Del Territorio. moz-extension://1d8fc7cf-4ecd-1a44-b8d5-9c772ea21853/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Feca-suelo.com.pe%2Fwp-content%2Fuploads%2F2015%2F07%2FA-Guia-de-Tecnologias-de-Recuperacion-de-Suelos-Contaminados.pdf
- Kamunde, C. N., & Wood, C. M. (2004). ENVIRONMENTAL CHEMISTRY,

PHYSIOLOGICAL HOMEOSTASIS, TOXICOLOGY, AND ENVIRONMENTAL REGULATION OF COPPER, AN ESSENTIAL ELEMENT IN FRESHWATER FISH. In *AUSTRALASIAN JOURNAL OF ECOTOXICOLOGY* (Vol. 10). mozilla-extension://1d8fc7cf-4ecd-1a44-b8d5-9c772ea21853/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.zoology.ubc.ca%2F~woodcm%2FWoodblog%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F07%2FKamunde-Wood.Aus_.Ecotox.pdf

Kemp, D. D. (1998). *The Environment Dictionary*. Routledge.

<https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=bRA1sSETcRYC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Kemp,+D.D.+1998.+The+environment+dictionary&ots=YmbJM5T9lo&sig=utAVrXuS6D9vuC8f9PxUPdAwAbw#v=onepage&q&f=false>

LENNTECH. (2017). *Cobre (Cu) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*. <https://www.lennotech.es/periodica/elementos/cu.htm>

Lorenz, G. (2012). Guía de Evaluación Ecológica de Suelos. *Universidad Nacional de Santiago Del Estero*, 3380, 1–11. <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-8-Lorenz.pdf>

Mackinlay Llanza, F., Urréjola Madriñán, S., & Cameselle Fernández, C. (2017).

Recuperación de suelos contaminados en campos de tiro por electrorremediación y fitorremediación. *Universidad de Vigo*, 2014–2015.

Martínez Sepúlveda, J. A., Sánchez Yáñez, J. M., Volke Sepúlveda, T., Vallejo Quintero, V. E., Pérez Junco, L. M., Duarte Bautista, P. A., Umbacía, M., Márquez-Benavides, L., Villaseñor Camacho, J., Castañeda García, L. F., & Reinaldo Casallas, M. (2019). Remediación de suelos contaminados: fundamentos y casos de estudio. In Ean (Ed.), *Remediación de suelos contaminados: fundamentos y casos de estudio* (1ª). <https://doi.org/10.21158/9789587566116>

McBride, M. B. (1994). The Chemistry of Soil Constituents. In *Clays and Clay Minerals* (Vol. 27, Issue 4). Oxford University Press, Inc.

<https://doi.org/10.1346/ccmn.1979.0270417>

- Meza-Figueroa, D., Maier, R. M., de la O-Villanueva, M., Gómez-Alvarez, A., Moreno-Zazueta, A., Rivera, J., Campillo, A., Grandlic, C. J., Anaya, R., & Palafox-Reyes, J. (2009). The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico. *Chemosphere*, 77(1), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.068>
- Mireles, F., Davila, J. I., Pinedo, J. L., Reyes, E., Speakman, R. J., & Glascock, M. D. (2012). Assessing urban soil pollution in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Mexico by instrumental neutron activation analysis. *Microchemical Journal*, 103(January), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.02.009>
- Natalia Rodriguez Eugenio;, Michael McLaughlin;, & Daniel Pennock; (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. In *Organizacion de las Naciones Unidas para la alimentacion y la agricultura FAO*. <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
- Navarro, S. N. G. (2012). *Química Agrícola*. 66, 37–39.
- OMS. (2018). *Arsénico*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- ONU. (2018). *La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro | FAO Stories | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1126977/>
- Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura. (2016). Estado mundial del recurso del suelo (EMRS) - Resumen Tecnico. In *Fao*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Ortiz-Cano, H. G., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Flores-Hernández, A., & López-Ariza, B. (2009). Phytoextraction of lead and cadmium in contaminated soils using pigweed (*Amaranthus hybridus* L.) and mycorrhiza. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 15(2), 161–168. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.15.022>
- Ortiz Bernand, I., Sanz García, J., Dorado Valiño, M., & Villar Fernandez, S. (2007).

- Técnicas de recuperación de suelos contaminados. *Universidad de Alcalá. Dirección General de Universidades e Investigación.*, 109.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+reucpe+raci?n+de+suelos+contaminados#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+recuperaci?n+de+suelos+contaminados#0>
- Ortiz Silla, R. (2015). Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología. *Universidad de Murcia*, 34, 7.
- Putra, R. S., Ohkawa, Y., & Tanaka, S. (2013). Application of EAPR system on the removal of lead from sandy soil and uptake by Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.). *Separation and Purification Technology*, 102, 34–42.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.09.025>
- Ramírez Niño, M. A., & Navarro Ramírez, M. A. (2015). Heavy Metal Analysis on Soils Irrigated with Water from the Guatiquía River. *Análisis de Metales Pesados En Suelos Irrigados Con Agua Del Río Guatiquía*, 6(2), 167–175.
<http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v6n2/v6n2a06.pdf>
- Ramos-Arroyo, Y. R., & Siebe-Grabach, C. D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: Estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1), 54–74.
- Ravera, M., Ciccarelli, C., Gastaldi, D., Rinaudo, C., Castelli, C., & Osella, D. (2006). An experiment in the electrokinetic removal of copper from soil contaminated by the brass industry. *Chemosphere*, 63(6), 950–955.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.08.068>
- S.C., I. (2017). *La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos*. Artículos Técnicos de INTAGRI. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>
- Sánchez Sánchez, V., Rodríguez Romero, L., & López-Bellido Garrido, F. J. (2020). Electrokinetic-assisted phytoremediation of soils polluted by organic pesticides.

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA, 196.

Secretaría de cultura, recreación y deporte; (2020). *La contaminación ambiental*.

<https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/es/bogotanitos/biodiverciudad/la-contaminacion-ambiental>

Silva, S., & Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13–34. <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2>

Soil Science Society of America. (2020). *About Soils | Soil Science Society of America*. <https://www.soils.org/about-soils>

Solutions, L. W. T. (2017). *Cadmio (Cd) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>

Tarbutck, Edward J.; Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. (Pearson Educación S. A. (ed.); 8ª).

Vidal, J., Marrugo Negrete, J., Jaramillo, B., & Perez, L. (2010). Biorremediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Congreso de Séptimp*, 1–35.

World Health Organization. (2018). *El mercurio y la salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>

World Health Organization. (2019, July 23). *Intoxicación por plomo y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

Yaguana, G., Sanchez, F., Aguilar, M., & Pozo, E. (2019). Contaminación de suelos : el caso de los plaguicidas. *FINCAYA Emprende*, 12, 1–10.