



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja



MODALIDAD PRESENCIAL
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE ELECTORREMEDIACIÓN DE
SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS**

*Trabajo de fin de carrera previa a
la obtención del título de
Ingeniero Civil*

AUTOR: JORGE FRANCISCO GRANDA LASO

DIRECTOR: ING. EDUARDO CARRIÓN CORONEL

LOJA - ECUADOR

2011



CERTIFICACIÓN

Ing. Eduardo Carrión Coronel

DIRECTOR DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

CERTIFICA:

Haber dirigido, corregido y supervisado en todas sus partes, el desarrollo del presente trabajo de fin de carrera previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**, titulado “**EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE ELECTORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS**”, con autoría del señor Jorge Francisco Granda Laso y una vez que este cumple con todas las exigencias y los requisitos legales establecidos por la Universidad Técnica Particular de Loja, autoriza su presentación para los fines legales pertinentes.

Loja, Febrero de 2011

Ing. Eduardo Carrión Coronel



AUTORIA

En el presente trabajo de fin de carrera las ideas, principios, conocimientos y todo lo expuesto con cada una de sus investigaciones, análisis, evaluaciones, conclusiones y recomendaciones emitidas, es de responsabilidad del autor que firma a continuación, la cual a su vez autoriza a la escuela de Ingeniería Civil hacer uso del presente documento en lo conveniente.

Además, la información que fue utilizada en esta investigación perteneciente a otros autores está adecuadamente especificada en fuentes de referencia y apartados bibliográficos.

.....

Jorge Francisco Granda Laso



CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Jorge Francisco Granda Laso, expongo conocer y consentir la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja en el cuál textualmente se expresa lo siguiente: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

.....

Jorge Francisco Granda Laso



DEDICATORIA

Con todo mi cariño a mis queridos padres quienes me han apoyado incondicionalmente durante todo el proceso de mi formación profesional inclusive en los momentos más difíciles de mi carrera con el único fin de que siga adelante y así poder alcanzar esta meta tan anhelada.

Además de mis padres también quiero dedicar este trabajo a mi esposa e hijo que son las personas más importantes en mi vida, a mis hermanos, quienes juntos han sido un pilar fundamental para seguir adelante y me han ayudado a encaminar mi vida, gracias por brindarme siempre toda su confianza, respeto y amor, los quiero mucho.

A amigos y compañeros que de una u otra manera siempre me han apoyado, gracias por compartir conmigo los buenos y malos momentos todo este tiempo.

.....

Jorge Francisco Granda Laso



AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a DIOS, quien durante toda mi vida ha sido mi fortaleza y guía, para tomar las mejores decisiones, a todas y cada una de las personas que de una u otra manera me han ayudado al desarrollo de este proyecto de fin de carrera, de manera muy especial a mi Director, Ing. Eduardo Carrión quien con su ayuda, ofreciéndome su apoyo y conocimientos me guió en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A todos ustedes

MUCHAS GRACIAS



ÍNDICE

	Pág.
Certificación de director	ii
Autoría	iii
Cesión de derechos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de Contenidos	vii
Resumen	xi

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCE

1.	Introducción general	1
1.1	Justificación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2

CAPÍTULO II:

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1	Electrorremediación	3
2.1.1	Principios Básicos de la electroremediación	5
2.1.2	Factores que influye en el proceso de electroremediación	7
2.2	Suelo	8
2.2.1	Importancia del Suelo	9
2.2.2	Características de los diferentes tipos de suelos	11
2.3	Contaminación del suelo con metales pesados	13
2.3.1	Plomo	16
2.3.2	Arsénico	19
2.3.3	Zinc	20



CAPÍTULO III:

MATERIALES EQUIPO Y METODOS

3.1	Diseño y construcción de equipo	23
3.2	Preparación de la muestra, electrolito y calibración de equipo	24
3.2.1	Toma de muestras y condiciones iniciales	24
3.2.2	Preparación del electrolito	26
3.2.3	Medición de pH	26
3.2.4	Humectación de la muestra	27
3.2.5	Calibración del equipo	27
3.2.6	Diagrama de procedimiento empleado en los experimentos	28
3.3	Método Estadístico	29
3.3.1	Diseño Experimental	29
3.3.1.1	El Análisis de Variancia. ADEVA o ANOVA	29
3.3.1.2	Grados de Libertad	30
3.3.1.3	Prueba de Tukey	30
3.3.2	Experimentos Factoriales	31
3.3.3	Interacción	32
3.4.	Cuantificación de metales después de la aplicación de la técnica	34

CAPITULO IV:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Resultados y Discusión	35
4.2	Variación de Factores	39
4.3	Interpretación de interacciones en la investigación	39
4.3.1	Interacción distancia-electrolito con tiempo	40
4.3.2	Interacción distancia-tiempo con electrolito	41
4.3.3	Interacción electrolito-tiempo con distancia	43
4.4	Criterios de remediación o restauración del suelo	44

CAPÍTULO V:



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	46
5.2	Recomendaciones	48

CAPÍTULO VI:

BIBLIOGRAFIA

6.1	Bibliografía	49
6.2	Referencias de internet	52

ANEXO

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Esquema del proceso de electroremediación	5
Fig. 2	Esquema de electrólisis del agua	6
Fig. 3	La formación del suelo	8
Fig. 4	Suelo arcilloso	11
Fig. 5	Suelo limos	12
Fig. 6	Suelo arenoso	12
Fig. 7	Cubeta de vidrio con sus electrodos	23
Fig. 8	Celda de electroremediación estática	24
Fig. 9	Bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel	26
Fig. 10	Preparación de muestra	27
Fig. 11	Interacción diferencia en la magnitud	33
Fig. 12	Interacción diferencia en la dirección	33
Fig. 13	Gráfica comparativa de concentración residual de metales pesados-Ácido acético	37
Fig. 14	Gráfica comparativa de concentración residual de metales pesados- Ácido fosfórico	38
Fig. 15	Gráficas del plomo de la relación distancia frente al tiempo	40
Fig. 16	Gráficas del arsénico de la relación distancia frente al tiempo	40
Fig. 17	Gráficas del zinc de la relación distancia frente al tiempo	41



Fig. 18 Gráficas del plomo de la relación distancia frente al electrolito	41
Fig. 19 Gráficas del arsénico de la relación distancia frente al electrolito	42
Fig. 20 Gráficas del zinc de la relación distancia frente al electrolito	42
Fig. 21 Gráficas del plomo de la relación electrolito frente al tiempo	43
Fig. 22 Gráficas del arsénico de la relación electrolito frente al tiempo	43
Fig. 23 Gráficas del zinc de la relación electrolito frente al tiempo	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Análisis de laboratorio de Plomo, Arsénico y Zinc	25
Tabla 2: Parámetros físico-químicos y Contenido de Plomo, Arsénico y Zinc	25
Tabla 3: Notación para representar factorial con sus niveles	31
Tabla 4. Análisis de Varianza (ADEVA)	32
Tabla 5: Análisis de laboratorio	34
Tabla 6: Condiciones de trabajo para cada tratamiento	35
Tabla 7. Resultados del análisis de muestras después del proceso de remediación	35
Tabla 8: Análisis comparativo Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y los resultados del proceso de remediación	45



RESUMEN

En muchos lugares, la contaminación por metales pesados en los suelos es un problema muy grande por la producción de desechos peligrosos provocando desequilibrio al medio ambiente y generando suelos con limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de vegetación y riesgos a la salud. Las actividades mineras generan una gran cantidad de residuos, que se depositan en la superficie. En el sector “El Pache” existen aproximadamente 70 plantas de tratamiento de minerales, que se dedican a la recuperación de oro y plata principalmente y en pocos casos concentran sulfuros de cobre. Gran parte de ellas se ubican a las orillas del río Calera, lo que ha provocado altos niveles de contaminación ambiental debido a que los relaves son almacenados en algunos casos de forma incipiente y en otros, con mayor grado de responsabilidad ambiental (E Carrión 2010).

El objetivo del presente estudio es evaluar la técnica de electroremediación de suelos contaminados con metales pesados (plomo, arsénico y zinc), para lo cual se diseñó y construyó una celda de electroremediación. Para el estudio se analizaron conjuntamente medidas de pH, concentración de contaminantes. Los factores considerados fueron los siguientes; tres distancias entre electrodos, dos tiempos de tratamiento y dos tipos de electrolitos; en los resultados se determinó su influencia en la concentración final, de estos metales en las muestras de suelos remediados. La metodología consistió en utilizar muestras obtenidas del proyecto de investigación realizado por el Ing. Eduardo Carrión denominado “EVALUACIÓN DEL CONTENIDO Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE METALES PESADOS EN SUELO SUPERFICIAL CON RESIDUOS DE RELAVES DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO MINERAL A LO LARGO DEL SECTOR “EL PACHE”, DISTRITO MINERO “PORTOVELO-ZARUMA” (ECUADOR). Las muestras con mayor concentración en plomo, arsénico y zinc fueron seleccionadas para realizar el proceso de electroremediación. Se comprobó que, para las condiciones experimentales utilizadas, el tratamiento con menor concentración después de aplicada la técnica de electroremediación, es el tratamiento T12 (15 cm, 24 horas y ácido fosfórico) para el plomo y zinc; el tratamiento T8 (10 cm, 24 horas y ácido fosfórico) para el arsénico; presentan una eficiencia del 99.9% para la movilización de metales pesados.



1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado y la producción de desechos principalmente mineros, ha provocado la presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente, provocando numerosos efectos sobre la salud y el equilibrio de los ecosistemas. Se incorporan con los alimentos o como partículas que se respiran y se van acumulando en el organismo (bioacumulación), hasta llegar a límites de toxicidad.

Estos desechos, debido al lento desarrollo, a la ineficiencia o inexistencia de las técnicas de manejo, han generado una gran cantidad de sitios contaminados con metales pesados, compuestos orgánicos y otros materiales peligrosos (Virkyute *et al.* 2002). En los últimos años se han desarrollado diversas tecnologías para la remediación de suelos contaminados aplicándose exitosamente. Sin embargo, en nuestro país este tipo de investigación no ha tenido la importancia que requiere. La remediación de nuestros suelos demanda la investigación detenida de los factores que influyen en la eficiencia y eficacia de la técnica y método a ser aplicado. Las variables tanto físicas como químicas son complejas por lo que las técnicas en investigación cada día van sufriendo modificaciones, la remediación, específicamente la electrorremediación también tiene que tener en cuenta estas variables para su análisis.

La electrorremediación es una alternativa para el tratamiento y recuperación de suelos contaminados con metales pesados. En el país especialmente en el sector minero se requiere de la aplicación e investigación de esta técnica y otras.

1.1.JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento de los recursos naturales en especial el de los suelos y sus riquezas ha sido fundamental para el desarrollo de los pueblos. Actualmente la explotación y uso de los componentes (compuestos orgánicos, inorgánicos y minerales) de estos recursos ha generado desechos y destrucción de suelos importantes para el beneficio del hombre que cada día ve aminorar sus posibilidades de subsistencia y de armonía con la naturaleza.



Por tal razón es necesario trabajar en las investigaciones que contribuyan a minimizar los efectos de contaminación ambiental. Una de las técnicas a aplicar es la electroremediación que por considerar muchas de las variantes físico-químicas tiene un gran porcentaje de efectividad.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la remoción de metales pesados que contaminan un suelo al utilizar la técnica de electrorremediación.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el estado del arte de la electrorremediación.
- Diseñar y construir el equipo de electrorremediación
- Aplicar la tecnología en laboratorio
- Validar los resultados con análisis estadístico (mejor combinación de factores aplicados a la electrorremediación)



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. ELECTORREMEDIACIÓN

“La electrorremediación es una tecnología utilizada para restaurar suelos contaminados y de contención de la contaminación; se basa en la generación de un campo eléctrico mediante una matriz de electrodos en un suelo contaminado saturado.

Algunos autores pueden definirla como la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente directa, que requiere el empleo de electrodos (ánodo y cátodo) los cuales son colocados en pozos excavados en el suelo, usualmente estos se humectan con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento”.

Las especies cargadas presentes en el suelo migran bajo la acción de este campo. Las cargas positivas se movilizan hacia el cátodo y se acumulan en el mismo, y las negativas en el ánodo. La oxidación de agua en el ánodo genera protones H^+ , que se mueven hacia el cátodo creando un frente ácido. Este favorece la desorción de los cationes del suelo y fuerza la puesta en disolución de contaminantes precipitada como carbonatos, hidróxidos, etc. Por otro lado, los iones OH^- generados en el cátodo por la reducción del agua provocan la precipitación de los metales (Pazos *et al.*, 2006) ”

Durante el tratamiento, los contaminantes pueden ser transportados por electromigración (movimiento de iones hacia el electrodo de carga opuesta), electroósmosis (movimiento del agua respecto a la superficie cargada de las partículas del suelo), electrólisis (movimiento de iones como respuesta a una diferencia de potencial) y electroforesis (desplazamiento iónico en suspensión). (Acar and Alshwabkeh, 1993).

La técnica resulta eficaz para el tratamiento de suelos de baja permeabilidad hidráulica que son difíciles de recuperar por otros medios y está especialmente indicada para metales solubles o complejados en el suelo en forma de óxidos, hidróxidos y carbonatos. Sus ventajas incluyen bajo consumo energético, un control sobre la dirección del flujo del agua



y de los contaminantes disueltos y la acumulación de los contaminantes en los electrodos para su posterior eliminación (Page and Page, 2002), utilizando resinas de intercambio iónico o mediante bombeo (Smith *et al.*, 1995) o redisolviéndolos invirtiendo la polaridad durante pequeños intervalos de tiempo (Pazos *et al.*, 2006).

La electroremediación puede utilizarse *in situ*. Aunque se desarrolló para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados, experimentos realizados han puesto de manifiesto que la electrorremediación puede ser utilizada para la eliminación de compuestos orgánicos y que puede combinarse con otras técnicas como la biodegradación

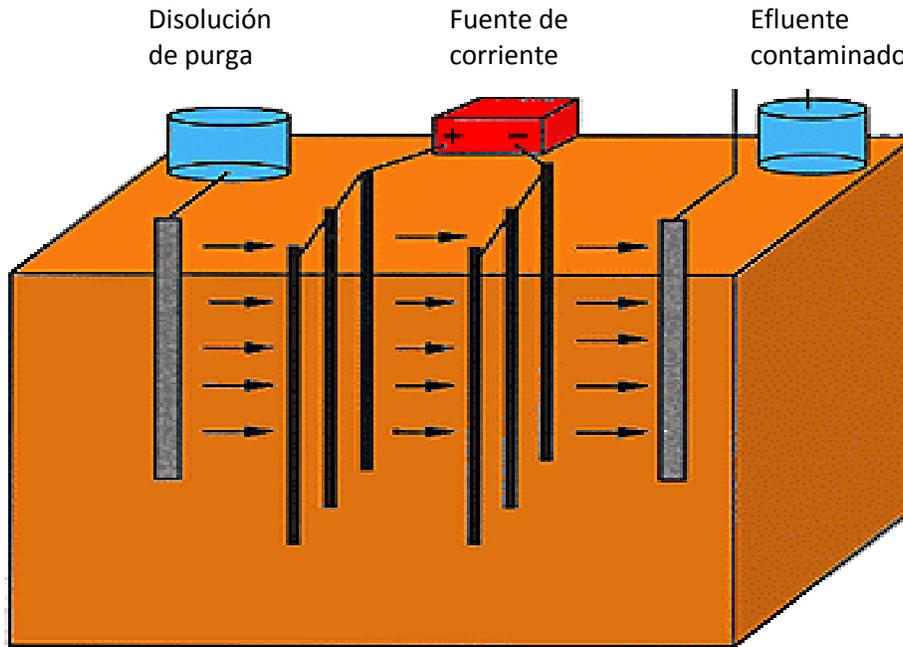
El núcleo de una instalación electrocinética *in situ*; consiste en una serie de electrodos y sus alojamientos. Estos pueden ser instalados, en principio, a cualquier profundidad, tanto vertical como horizontalmente. Aunque los alojamientos del cátodo y ánodo se conectan entre sí, éstos forman dos sistemas de circulación separados (uno para el ánodo, otro para el cátodo) que se rellenan de diferentes soluciones químicas. Es en estas disoluciones en las que se “capturan” los contaminantes, los cuales se conducen posteriormente a un sistema de tratamiento conectado al sistema de circulación.

Una célula electrolítica constituye un sistema que incluye una fuente de energía (corriente eléctrica), dos electrodos y una solución electrolítica en la que tiene lugar el flujo de iones (electromigración).

El electrodo cargado negativamente, al aplicar la corriente eléctrica, se denominará cátodo, siendo el ánodo el positivo. El sentido convencional de la corriente aplicada es desde el ánodo hacia el cátodo, en sentido contrario al flujo de electrones en los electrodos. En el seno de la matriz del suelo, los iones positivos presentes en el agua de saturación (electrolito) se moverán hacia el cátodo; los iones negativos, por su parte, se moverán hacia el ánodo. Este movimiento de iones bajo un campo eléctrico es lo que se denomina electromigración.



Fig. 1: Esquema del Proceso de Electrorremediación.



Fuente: (Xavier Domenech 1995)

La descontaminación electrocinética tratará de potenciar los fenómenos de electromigración para dar lugar a la movilidad de los contaminantes (en forma de especies cargadas). Los contaminantes movilizadose “capturarán”, como ya se ha indicado, en las correspondientes soluciones anódica y catódica que serán evacuadas del suelo.

2.1.1. Principio básico de la electrorremediación

El principio en que se basa la electrorremediación es la electrólisis, proceso en que las reacciones redox sólo tienen lugar si se les suministra energía por medio de una corriente eléctrica aplicada desde el exterior, que significa separación por electricidad.

La electrólisis se realiza en las celdas electrolíticas, que son unos depósitos que contienen el electrolito disuelto o fundido y dos electrodos. Los electrolitos disueltos o fundidos conducen la corriente eléctrica por medio de los iones positivos y negativos, al mismo tiempo que se produce algún cambio químico en los electrodos.

En cada electrodo de una celda electrolítica se produce una de las semirreacciones del proceso redox:



- En el ánodo o electrodo positivo se descargan los aniones. Se produce la oxidación.
- En el cátodo o electrodo negativo se descargan los cationes. Se produce la reducción.

Un ejemplo importante de este tipo de proceso es la electrólisis del agua. El agua es una sustancia muy estable que se descompone en sus elementos mediante corriente eléctrica.

Corriente eléctrica Forzada

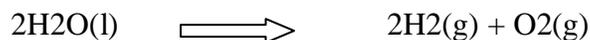
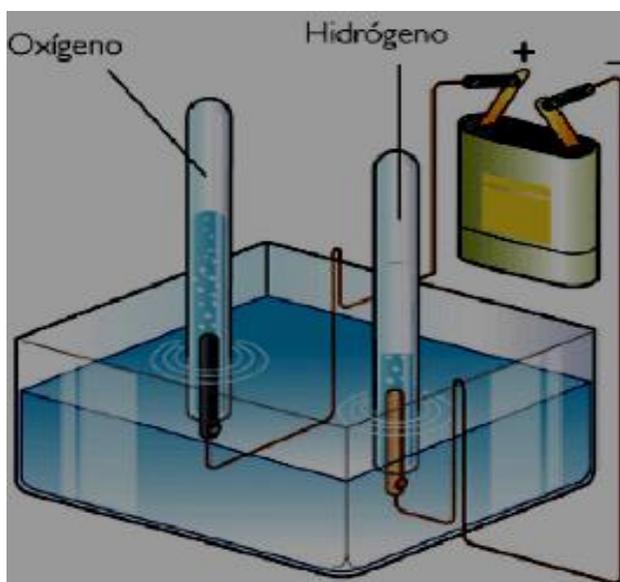


Fig. 2: Esquema de electrólisis del agua.



Fuente: www.irnase.csic.es/castellano/agro.php

La electrólisis del agua para producir hidrógeno y oxígeno se verifica al hacer pasar una corriente a través de una solución acuosa. Así, al cargar un acumulador de plomo o "pasarle carga" se producen mezclas potencialmente explosivas de H₂ y O₂ debido al flujo de corriente a través de la solución en la batería. Por eso es muy importante no producir una chispa cerca de ella al efectuar este proceso.



2.1.2 Factores que influye en el proceso de electroremediación

Varios factores fisicoquímicos influyen en el transporte de los contaminantes y así la efectiva remediación del suelo contaminado; estos factores se expresan de la siguiente manera (*De La Rosa-Pérez- Teutli-León- Ramírez-Islas 2007*)

- a. **pH.-** Promueve reacciones de los metales con sustancias que se encuentran en el suelo. Regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electroremediación, de existir metales pesados absorbidos, estos son solubilizados por el frente ácido y transportado hacia el cátodo.
- b. **Contenido de agua.-** Genera el movimiento del electrolito, el grado de saturación del suelo es indispensable para el proceso de electroremediación.
- c. **Conductividad eléctrica.-** Es la capacidad de un medio o espacio físico para permitir el paso de corriente eléctrica, para cada tipo de suelo hay un valor de conductividad eléctrica. En electroremediación los cambios de pH del suelo modifican la conductividad global del medio por lo que se forman perfiles de voltaje. En experimentos con suelos contaminados se incrementa con tiempo, debido a la penetración de los frentes ácido y alcalino, y la solubilidad de las especies iónicas o el aumento de la temperatura.
- d. **Potencial zeta ζ .-** Se la define como la medida que determina la carga de un coloide, en función de la naturaleza y superficie, composición del medio en que está suspendido.
- e. **Naturaleza y química del suelo.-** En electroremediación de suelos contaminados influyen las siguientes características del suelo: la capacidad de adsorción; intercambio iónico y de amortiguamiento del pH en el caso de suelos arcillosos y limosos por su mayor superficie de contacto, lo que permite una mayor facilidad en la adsorción.
- f. **Naturaleza del contaminante.-** El tipo de contaminante influye significativamente en la técnica de electroremediación, los contaminantes



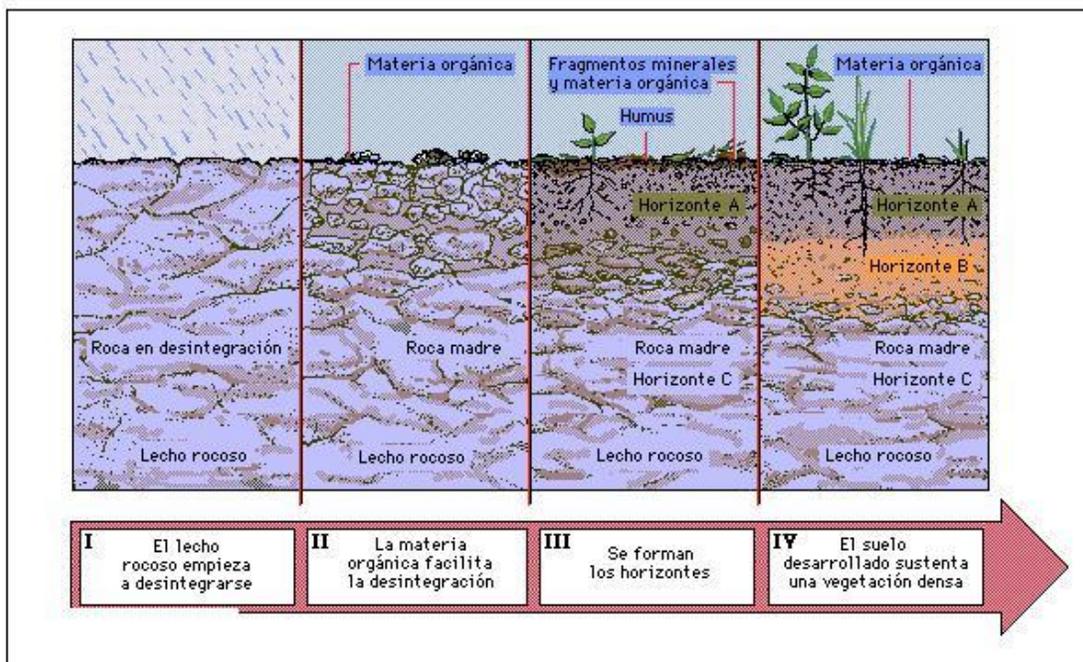
pueden ser sólidos precipitados, disueltos y adsorbidas a partículas del suelo o adsorbidas en materia orgánica.

- g. Naturaleza y arreglo de los electrodos.-** La estructura de los electrodos debe ser porosa que permita un buen contacto con los electrolitos y para poder liberar los gases producidos por la electrólisis. La forma, tamaño y arreglo de los electrodos, la distancia entre ellos afectan la tasa de remoción de contaminantes.

2.2. SUELO

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

Fig. 3: *Proceso de transformación del suelo*



Fuente: www.botanical.online.com

A lo largo de su evolución o edafogénesis, en el suelo se van diferenciando capas verticales de material generalmente no consolidado llamados horizontes, formados por



constituyentes minerales y orgánicos, agua y gases, y caracterizados por propiedades físicas (estructura, textura, porosidad, capacidad de retención de agua, densidad aparente), químicas y físico-químicas (pH, potencial redox, capacidad de intercambio catiónico) que los diferencian entre sí y del material original. El conjunto de horizontes constituye el perfil del suelo y su estudio permite dilucidar los procesos de formación sufridos durante su evolución y llevar a cabo su clasificación dentro de las distintas unidades de suelos (M.Seoánez.1998).

2.2.1 Importancia del suelo

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

- El suelo proporciona los nutrientes, el agua y el soporte físico necesarios para el crecimiento vegetal y la producción de biomasa en general, desempeñando un papel fundamental como fuente de alimentación para los seres vivos.
- Es un componente esencial del ciclo hidrológico, actuando como elemento distribuidor de las aguas superficiales y contribuyendo al almacenaje y recarga de las aguas subterráneas.
- El suelo, a través de su poder de amortiguación o desactivación natural de la contaminación, filtra, almacena, degrada, neutraliza e inmoviliza sustancias orgánicas e inorgánicas tóxicas, impidiendo que alcancen las aguas subterráneas y el aire o que entren en la cadena alimenticia.
- Es el hábitat natural biológico de muchos organismos de todo tipo y constituye un elemento de reserva genética.
- Desarrolla un importante papel como fuente de materias primas.



- Sirve de plataforma para el desarrollo de las actividades humanas como soporte de la estructura socioeconómica y forma parte del paisaje y del patrimonio cultural.
- El suelo es un elemento frágil del medio ambiente, un recurso natural no renovable puesto 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. Por ello, es de suma importancia concienciar a la opinión pública sobre este aspecto y establecer medidas ambientales y políticas de actuación que garanticen la protección y conservación de los suelos.

“La degradación del suelo se puede definir como todo proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios. Aunque se puede producir por causas naturales, la degradación del suelo es fundamentalmente la consecuencia directa de su utilización por el hombre, bien como resultado de actuaciones directas, como actividades agrícolas, forestales, ganaderas, agroquímicas y riego, o por acciones indirectas, como son las actividades industriales, eliminación de residuos, transporte, etc. Estos procesos de degradación se pueden clasificar en función de su naturaleza y del tipo de consecuencias negativas que provocan en las propiedades del suelo: biológicos, como la disminución del contenido en materia orgánica incorporada en el suelo; físicos, como el deterioro de la estructura del suelo por compactación y aumento de la densidad aparente, disminución de la permeabilidad y de la capacidad de retención de agua o pérdida de suelo por erosión; y químicos, como la pérdida de elementos nutrientes, acidificación, salinización, sodificación y aumento de la toxicidad. Estos últimos son los que se engloban dentro del término contaminación”. (FAO-PNUMA 1983),



2.2.2 Características de los diferentes tipos de suelos

Existen los siguientes tipos de suelos (Seoáñez Mariano.1998):

Fig. 4: Suelo arcilloso.



Fuente: www.profesorenlinea.ch

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

Desde un punto de vista de la textura, tiene consistencia plástica y puede ser modelado. Son suelos que, para la agricultura, se conocen como suelos húmedos y pesados. Son muy impermeables dado que no dejan pasar el agua o el aire, todo ello propicia que sean suelos donde el agua se estanque con facilidad por lo que en este tipo de suelo se necesita realizar un sistema de drenaje adecuado porque, después de las lluvias el agua queda retenida en la superficie. Presentan un color marrón oscuro.

Los suelos arcillosos, al secarse, quedan muy compactos y duros y se caracterizan por la aparición de grietas. La ventaja principal es que son suelos que conservan fácilmente la forma que se le da al trabajarlos.

Se trata de un suelo arcilloso, cuando tomamos un pedazo del mismo en las manos, se hace fácilmente una bola. Igualmente, si colocamos un trozo de esta materia entre los dedos



pulgar e incide y al trabajar con ambos dedos, se realiza cintas de hasta 5 cm con este tipo de tierra.

Fig. 5: *Suelo limoso.*



Fuente: www.profesorenlinea.ch

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

Se trata de suelos limosos porque, al igual que los arcillosos, permiten formar bolas aunque estas se rompen con facilidad. A diferencia de los arcillosos no permiten formar cintas entre los dedos.



Fig. 6 *Suelo arenoso*



Fuente: www.profesorenlinea.ch

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

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

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



Suelos gredosos: Un suelo gredoso es aquel que procede de la descomposición de las cretas o piedras calizas que contienen mucho carbonato cálcico. Es un tipo de tierra ligero y con un buen drenaje. Presenta un color marrón claro o blanquecino.

- Suelos pantanosos: Se considera que un suelo es pantanoso a aquel que se ha formado en lugares que se encuentran habitualmente inundados. Son suelos que tienen muy poca riqueza mineral y con una acidez muy elevada. Su color es negro.

2.3. CONTAMINACION DEL SUELO CON METALES PESADOS

Metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Los más importantes son:

- Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn).

Metales tóxicos son aquellos cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas. Los términos metales pesados y metales tóxicos se usan como sinónimos pero sólo algunos de ellos pertenecen a ambos grupos.

Algunos metales son indispensables en bajas concentraciones, ya que forman parte de sistemas enzimáticos, como el cobalto, zinc, molibdeno, o como el hierro que forma parte de la hemoglobina. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones.

El desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado y la producción de desechos principalmente urbanos, ha provocado la presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente, provocando numerosos efectos sobre la salud y el equilibrio de los ecosistemas. Se incorporan con los alimentos o como partículas que se respiran y se van acumulando en el organismo, hasta llegar a límites de toxicidad. Si la incorporación es lenta se producen intoxicaciones crónicas, que dañan los tejidos u órganos en los que se acumulan (Harte., C.Holden, R.Schneider, C.Shirey, 1991- Fergusson, J.F., 1990).

En el suelo existen unos elementos minoritarios que se encuentran en muy bajas concentraciones y al evolucionar la vida adaptándose a estas disponibilidades, ha ocurrido



que las concentraciones más altas de estos elementos se han vuelto tóxicas para los organismos. Dentro de este grupo de elementos son muy abundantes los denominados metales pesados.

Se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 gr/cm³ cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; es este el caso del As, B, Ba y Se.



Dentro de los metales pesados hay dos grupos:

- Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
- Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi.

Las concentraciones anómalas que se presentan en un suelo pueden ser por causas naturales (por ejemplo, los suelos desarrollados sobre serpentinas, con altos contenidos en elementos como Cr, Ni, Cu y Mn); los metales pesados son muy estables en el suelo y en el proceso natural de transformación de las rocas para originar a los suelos suelen concentrarse, pero, en general, sin rebasar los umbrales de toxicidad y además los metales pesados presentes en las rocas se encuentran bajo formas muy poco asimilables para los organismos.

Las rocas ígneas ultrabásicas (como las peridotitas y las serpentinas) presentan los más altos contenidos en metales pesados, seguidas de las ígneas básicas (como los gabros y basaltos). Las menores concentraciones se encuentran en las rocas ígneas ácidas (como el granito) y en las sedimentarias (como las areniscas y las calizas). Los porcentajes más altos se dan para el Cr, Mn y Ni, mientras que el Co, Cu, Zn y Pb se presentan en menores cantidades, siendo mínimos los contenidos para el As, Cd y Hg.

En los suelos, los más abundantes son el Mn, Cr, Zn, Ni y Pb (1 a 1500) mg/kg; el Mn puede llegar a 10000 mg/kg. En menores concentraciones se encuentran el Co, Cu y As (0.1 a 250) mg/kg y con mínimos porcentajes el Cd y Hg (0.01 a 2) mg/kg, según (*Bowen 1979*)

El contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana incrementa el contenido de estos metales en el suelo en



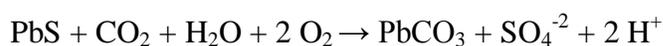
cantidades considerables, siendo esta, sin duda, la causa más frecuente de las concentraciones tóxicas.

De hecho esto sucede debido a los vertidos de origen antropogénico, procedentes de vertidos industriales, de actividades mineras, de la aplicación de plaguicidas o también del tráfico rodado. Como resultado, se emiten grandes cantidades de partículas que, después de un cierto tiempo de permanencia en la atmósfera, precipitan en los suelos lejos del lugar donde han sido vertidas (Alloway B.J. 1995b).

En la presente investigación los metales seleccionados para evaluar el método de electroremediación fueron el plomo, arsénico y zinc, esto debido a que su contenido en las muestras analizadas superan los límites máximos permisibles por la NORMA ECUATORIANA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO Y CRITERIOS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS, LIBRO VI ANEXO 2.

2.3.1 Plomo

El plomo se encuentra presente en un gran número de minerales, siendo la forma más común el sulfuro de plomo (galena: PbS). También son comunes, aunque en orden decreciente, la cersusita (PbCO₃) y la anglesita (PbSO₄). El plomo es un metal difícilmente movilizable, y bajo condiciones oxidantes la galena da origen a minerales tales como la cersusita y anglesita:



Así, el principal riesgo relacionado con la minería del plomo no radica en la posible puesta en solución de este metal (precipita rápidamente como carbonato o sulfato), sino en lo que concierne a los procesos metalúrgicos de las menas (compuestos minerales) de plomo (fundiciones). Cabe destacar que el problema con el plomo no es nuevo (ni siquiera de comienzos de la revolución industrial). Estudios en Suecia revelan que por lo menos el 50 % de la contaminación en suelos del país fue depositada en períodos anteriores al año 1800.

El particulado de plomo relacionado con problemas metalúrgicos constituye el problema principal, pero existen otras fuentes que entrañan también una peligrosidad extrema. En los



años 90 se constató en la ciudad de Antofagasta (Chile) que había niños que presentaban altos contenidos de plomo en la sangre. La fuente del problema pudo ser determinada, y eran minerales y concentrados de plomo que se acumulaban sin protección en las instalaciones portuarias (pertenecientes a Bolivia), para su posterior envío. Esto nos lleva a encaminar nuestra mirada no solo a las fundiciones, sino también a las zonas donde se acumulan minerales o concentrados de plomo.

El particulado fino de plomo (10 a 100) μm puede ser extremadamente peligroso por las siguientes razones:

- Se adhiere más fuertemente a la piel.
- Es más soluble que el particulado grueso en el tracto gastrointestinal.
- Es fácilmente absorbible a través del sistema respiratorio.

El plomo es un metal carente de valor biológico, es decir, no es requerido para el funcionamiento normal de los seres vivos. Debido a su tamaño y carga, el plomo puede substituir al calcio (Pb^{2+} : 0.84 Å; Ca^{2+} : 0.99 Å), y además de manera preferente, siendo su sitio de acumulación, los tejidos óseos. Esta situación es particularmente alarmante en los niños, que debido a su crecimiento incorporan altas cantidades de calcio. Altas dosis de calcio hacen que el plomo sea "*removido*" de los tejidos óseos, y que pase a incorporarse al torrente sanguíneo. Una vez ahí puede inducir nefrotoxicidad, neurotoxicidad, e hipertensión. Niveles de plomo en la sangre de 0.48 $\mu\text{g}/\text{l}$ pueden inducir en los niños:

- Daño durante el desarrollo de los órganos del feto.
- Daño en el sistema nervioso central.
- Reducción de las habilidades mentales e iniciación de desordenes del comportamiento.
- Daño en las funciones del calcio (anteriormente mencionado).
- A su vez, niveles del orden de 1.2 $\mu\text{g}/\text{l}$ pueden inducir:



- Descenso del coeficiente intelectual (CI). Problemas de desarrollo cognitivo y del comportamiento.
- Déficits neurológicos que pueden persistir hasta la adolescencia.
- Elevación de los umbrales auditivos.
- Peso reducido en recién nacidos. Desarrollo cognitivo temprano anormal.

En adultos que trabajan en ambientes expuestos a la contaminación con plomo, el metal puede acumularse en los huesos, donde su vida media es superior a los 20 años. La osteoporosis, embarazo, o enfermedades crónicas pueden hacer que éste plomo se incorpore más rápidamente a la sangre. Los problemas relacionados con la sobreexposición al plomo en adultos incluyen:

- Daño en los riñones.
- Daño en el tracto gastrointestinal.
- Daño en el sistema reproductor.
- Daño en los órganos productores de sangre.
- Daños neurológicos.
- Abortos.



2.3.2 Arsénico

El arsénico se encuentra presente en más de 200 especies minerales, siendo la arsenopirita (FeAsS), la enargita (Cu_3AsS_4), y la tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) las más comunes. Por razones no determinadas, la arsenopirita es muy común en los yacimientos minerales europeos (p.ej., sulfuros masivos de la faja pirítica de España-Portugal), mientras que la enargita lo es en los yacimientos de la cadena andina, donde constituye una mena principal de cobre (pórfidos cupríferos y epitermales de Au-Ag). La solubilización de las formas sulfuradas de arsénico no es fácil. Esto es claro en el caso de la arsenopirita, la que por ser en ocasiones portadora de inclusiones de oro, ha constituido un tema de numerosos estudios con resultados poco claros hasta la fecha. La reacción fundamental en medio ácido es:



Si además hay pirita en la mena, entonces el sulfato férrico producido actuará de la siguiente manera, ayudando a la oxidación-lixiviación del arsénico:



El arsénico puede precipitar finalmente como FeAsO_4 .

Sin restarle importancia al problema de la solubilización de especies minerales arsenicales, la principal fuente de contaminación está relacionada, al igual que en el caso de plomo, con el tratamiento metalúrgico de los minerales de arsénico. En concreto, los procesos de fundición de concentrados de cobre, que incluyan la presencia de minerales arsenicales (ejemplo, enargita), pueden dar lugar a intensos problemas de contaminación por vía aérea (arsénico que escapa por las chimeneas), en la forma de As_2O_3 . El arsénico que así escapa se deposita luego en los suelos del entorno de la fundición. Dependiendo del volumen de las emisiones y el régimen de vientos, el problema puede extenderse por decenas de kilómetros y más.

El arsénico en los suelos puede ser disuelto y adsorbido/absorbido por las arcillas o la materia orgánica. Muchos de estos procesos son mediados por la materia orgánica la que puede producir transformaciones del tipo:



Cambios de redox que inducen la transformación arsenito-arsenato.

- La reducción y metilación del arsénico.
- La biosíntesis de compuestos de arsénico.

Las formas solubles del arsénico son fuertemente tóxicas. La ingestión de grandes dosis lleva a problemas gastrointestinales, cardiovasculares, disfunciones del aparato nervioso, y finalmente a la muerte. Recordemos que el arsénico ha sido uno de los venenos de largo plazo más utilizados en la historia de la humanidad, siendo Napoleón (el emperador de Francia), la víctima más famosa. Dosis bajas pero sostenidas (ejemplo, causas laborales) superiores a 0.75 mg/m^3 por año (ejemplo, 15 años con concentraciones de $50 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) pueden llevar al desarrollo de cánceres.

La vida acuática y terrestre muestra una amplia gama de sensibilidades a las distintas especies arsenicales. En general las formas inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas, y el arsenito más peligroso que el arsenato. Los arsenitos pueden fijarse a las proteínas, mientras que el arsenato afecta a la fosforilización oxidativa (en relación con Ciclo de Krebs).

Los organismos marinos contienen residuos arsenicales que van desde (< 1 a 100) mg/kg , los cuales se encuentran como arsenoazúcares (en las algas) o arsenobetaina (en invertebrados y peces). Las plantas terrestres pueden acumular arsénico por captación a través de las raíces, o por adsorción de arsénico aerotransportado, en las hojas.

2.3.3. Zinc

El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un (0.0005 a 0.02)%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la blenda, marmatita o esfalerita de zinc, ZnS . Es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales. La deficiencia de zinc en la dieta humana deteriora el crecimiento y la madurez y produce también anemia. La insulina es una proteína que contiene zinc. El zinc está presente en la



mayor parte de los alimentos, especialmente en los que son ricos en proteínas. En promedio, el cuerpo humano contiene cerca de dos gramos de zinc.

Es un metal químicamente activo. Puede encenderse con alguna dificultad produciendo una flama azul verdosa en el aire y liberando óxido de zinc en forma de humo. El zinc metálico en soluciones ácidas reacciona liberando hidrógeno para formar iones de zinc, Zn^{2+} . Se disuelve también en soluciones fuertemente alcalinas para formar iones dinegativos de tetrahidroxozincatos, $Zn(OH)_4^{2-}$, escrito algunas veces como ZnO_2^{2-} . en las fórmulas de los zincatos.

El zinc existe de forma natural en el aire, agua y suelo, pero las concentraciones están aumentando por causas no naturales, debido a la adición de zinc a través de las actividades industriales, como es la minería, la combustión de carbón y residuos y el procesado del acero. La producción mundial de zinc está todavía creciendo. Esto significa básicamente que más y más zinc termina en el ambiente.

El contenido de zinc en el suelo varía mucho y al igual que su distribución en el perfil, depende de la naturaleza de la roca madre, del proceso de formación y revolución del suelo, de su contenido en materia orgánica y arcilla, de la textura, de la capacidad de cambio y del pH.

En los últimos años, las concentraciones de zinc en los suelos han aumentado gradualmente, particularmente en países industrializados como consecuencia de las actividades humanas. Se han dado niveles de zinc total en los suelos de varias centenas y millares de mg Zn/kg.

Por otra parte, el zinc pertenece al grupo de metales pesados potencialmente más peligrosos para la biosfera. La mayoría de lo concerniente a las concentraciones excesivas de zinc en suelo se relaciona con su posible captación por las plantas y los consiguientes efectos adversos en los cultivos, en el ganado y en las dietas humanas. Junto con el Cu, Ni y Cr, el Zn es fundamentalmente fitotóxico, así que la problemática ligada a este metal está directamente relacionada con los efectos en el rendimiento del cultivo y en la fertilidad del suelo.



Finalmente, el zinc puede interrumpir la actividad en los suelos, con influencias negativas en la actividad de microorganismos y lombrices, la descomposición de la materia orgánica posiblemente sea más lenta debido a esto.



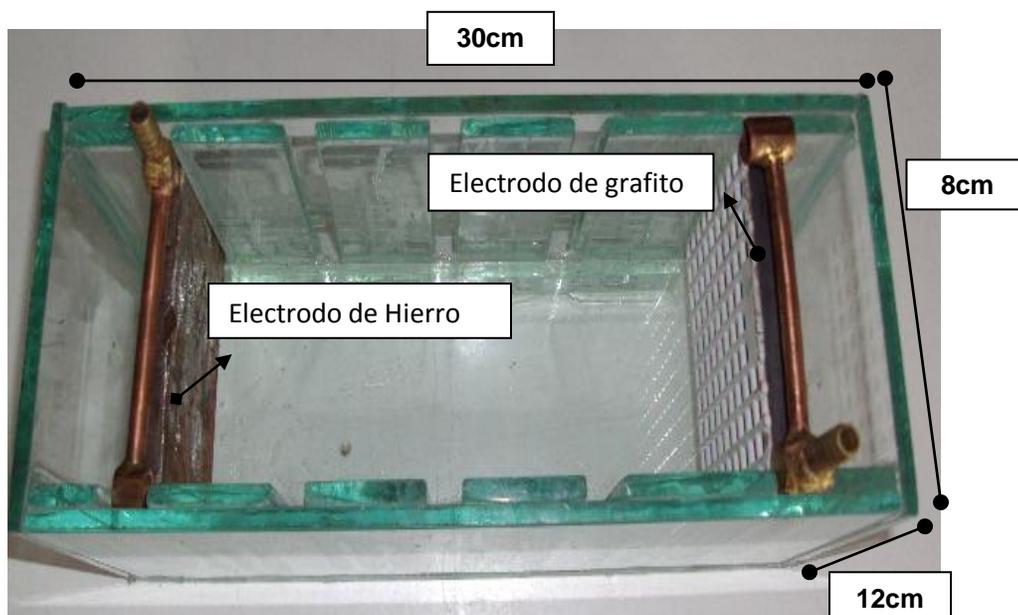
3. MATERIALES, EQUIPO Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE ELECTROREMEDIACION

Para realizar la evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales pesados, se procedió a diseñar el equipo, basado en el principio de electrólisis, la construcción del equipo (celda de electrorremediación estática Fig. 7.) consta de:

1. Una cubeta de vidrio en donde se depositará el suelo a remediar, cuyas dimensiones son 30 cm de largo, 8 cm de ancho, y altura de 12 cm; la equidistancia para la colocación de electrodos es de 5 cm.

Fig. 7: *Cubeta de vidrio con sus electrodos.*

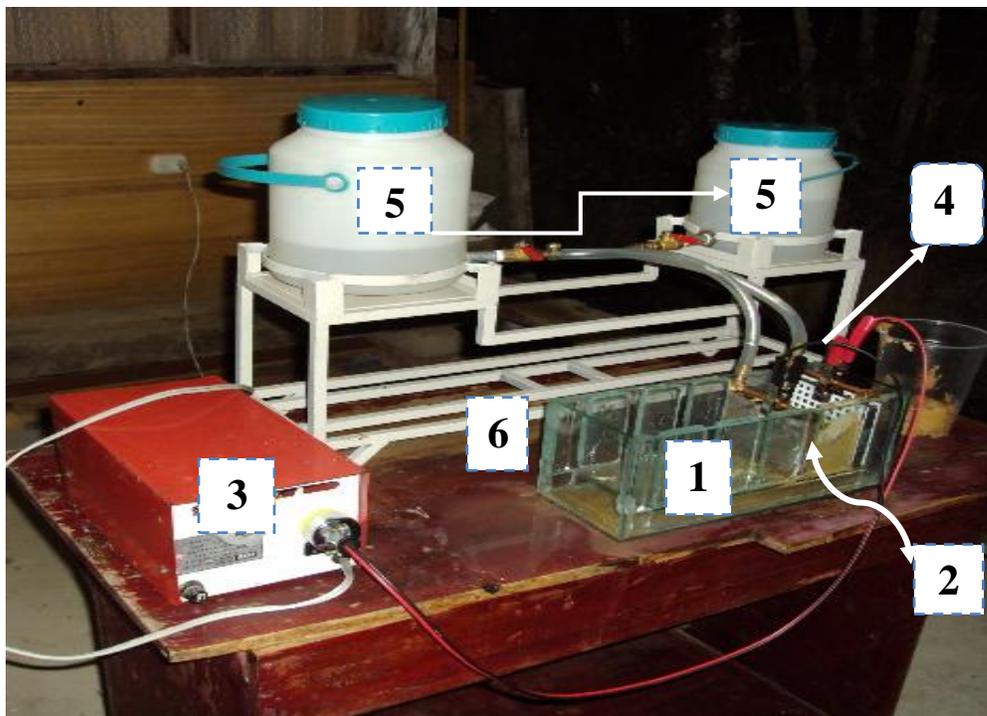


Fuente: *El autor*

2. Electrodos de grafito y de hierro: El electrodo de grafito por su característica quebradiza está protegido con mallas plásticas; los dos electrodos tienen las mismas dimensiones (10, 8 y 1) cm largo, ancho y espesor respectivamente.
3. Una fuente de energía, con rango de voltaje desde 10V hasta 50V en intervalos de 5V.

4. Dos conductores eléctricos (rojo carga positiva y negro carga negativa)
5. Depósitos para el electrolito con capacidad de (2 y 3) litros: tienen conectado dos válvulas y cañerías (diámetro interior 8 mm) para regular el caudal.
6. Soporte para traslado

Fig. 8: Celda de electrorremediación estática



Fuente: *El autor*

3.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA, ELECTROLITO Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.

3.2.1 Toma de muestras y condiciones iniciales

Las muestras utilizadas para la aplicación de la electrorremediación fueron obtenidas del proyecto de investigación denominado “EVALUACIÓN DEL CONTENIDO Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE METALES PESADOS EN SUELO SUPERFICIAL CON RESIDUOS DE RELAVES DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO MINERAL A LO LARGO DEL SECTOR “EL PACHE”, DISTRITO MINERO “PORTOVELO-ZARUMA” (ECUADOR). (Ing. Eduardo Carrión, 2010)



Las muestras se tomaron por cuarteo en diversas porciones (muestra bruta), se mezclaron, y se dejaron secar al ambiente. Una vez secas se separaron de elementos gruesos, se redujo el tamaño de los agregados y se tamizaron a través de una malla de 2mm. Todos los datos obtenidos están referidos a cantidad de muestra seca. Para el análisis de metales pesados las muestras de suelo tamizadas, fueron pulverizadas en un molino de discos; y se aplicó el método de Fluorescencia de Rayos X para determinar la cantidad inicial de metales pesados (plomo, zinc y arsénico) (E. Carrión 2010). El pH se determinó con bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel.

Cuadro 1: *Análisis de laboratorio de Plomo, Arsénico y Zinc.*

PARÁMETRO	MÉTODO
Granulometría	Tamizado
Textura	Hidrómetro
Contenido de materia orgánica	Walkley Black
pH	Bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel
Plomo, Arsénico y Zinc	Fluorescencia de Rayos X

Fuente: (Eduardo Carrión, 2010)

Cabe indicar que las muestras para el análisis pertenecen al sector “El Pache”, distrito minero Portovelo-Zaruma provincia de El Oro. Las principales características físico-químicas del suelo del sector “El Pache” que se determinaron fueron: textura (% de arena, % de limo y % de arcilla), contenido de materia orgánica y pH. Los valores que se presentan en la Tabla 2 corresponden a muestras con la mayor contaminación de plomo, arsénico y zinc, que sirvieron para la aplicación de la técnica en estudio.

Tabla 1: *Parámetros físico-químicos y Contenido de Plomo, Arsénico y Zinc.*

MUESTRA	Arena %	Limo %	Arcilla %	Mo %	pH	Plomo (ppm)	Arsénico (ppm)	Zinc (ppm)
10	55.20	41.20	3.60	0.80	4,00	6695	454	954
12	61.60	34.40	4.00	0.90	6,50	2732	1881	5674
15	59.20	34.00	6.80	0.70	5,50	5625	2213	995
22	62.00	32.00	6.00	2.70	3,50	3513	6598	4530
35	55.20	35.60	9.20	2.00	6,50	3840	18460	2686
39	62.40	27.20	10.40	1.80	3,00	8780	18956	10727
40	64.40	30.40	5.20	2.30	2,00	7005	13026	1037

Fuente: (El Autor)



3.2.2 Preparación del electrolito

El electrolito se prepara de la siguiente manera:

Se calcula la cantidad del ácido acético (CH_3COOH) 0.3M y de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 0.01M que se necesita para el proceso, Anexo 2.

La cantidad de ácido requerido, se mide en una pipeta de 10ml con la ayuda de una pera; se coloca previamente en un balón de aforo una cierta cantidad de agua destilada para amortiguar la reacción del ácido concentrado (Nunca se agrega agua al ácido sino ácido al agua para evitar reacción explosivas) para terminar el aforo se agrega a la dilución agua hasta encerrar. Se utilizó 500ml de electrolito para cada tratamiento; (10% del peso de la muestra en ácido para humectar).

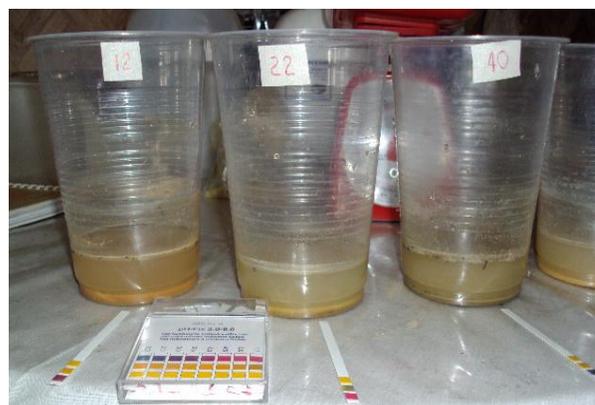
3.2.3 Medición de pH

Fig. 9: *Proceso de medición de pH con bandas*

a) *Bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel*



b) *Medición de pH*

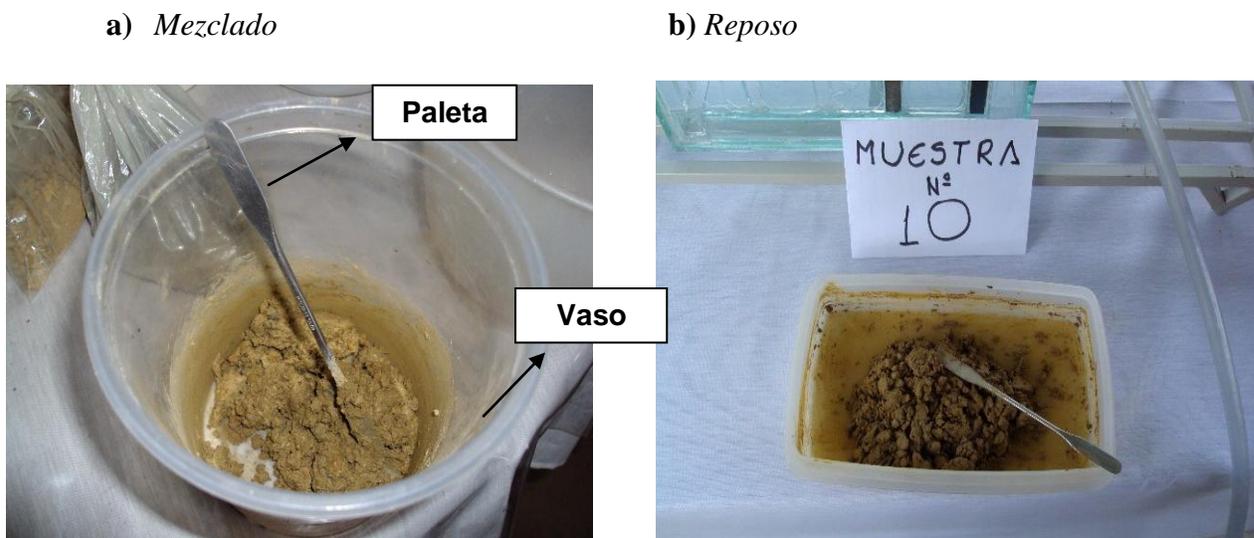


Fuente: *El Autor*

El pH se registró utilizando Bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel bandas multicolores con intervalos de precisión de 0.5; para lo cual se procedió a pesar 10gr de muestra y se disolvió en 100ml de agua destilada agitándose a intervalos de 10min durante una hora. Se deja reposar y se mide el pH.

3.2.4 Humectación de la muestra

Fig. 10 Preparación de muestra.



Fuente: *El Autor*

La humectación se la realiza agregando a la muestra ya pesada (200g) en un depósito, la cantidad de 20ml (10% del peso de la muestra) de electrolito mezclándola con ayuda de una paleta describiendo movimientos circulares durante 5 minutos. Luego se deja reposar durante 6 horas antes de ubicarla en la celda de electroremediación.

3.2.5 Calibración del equipo

Antes de ubicar la muestra en la celda de electroremediación se debe considerar lo siguiente:

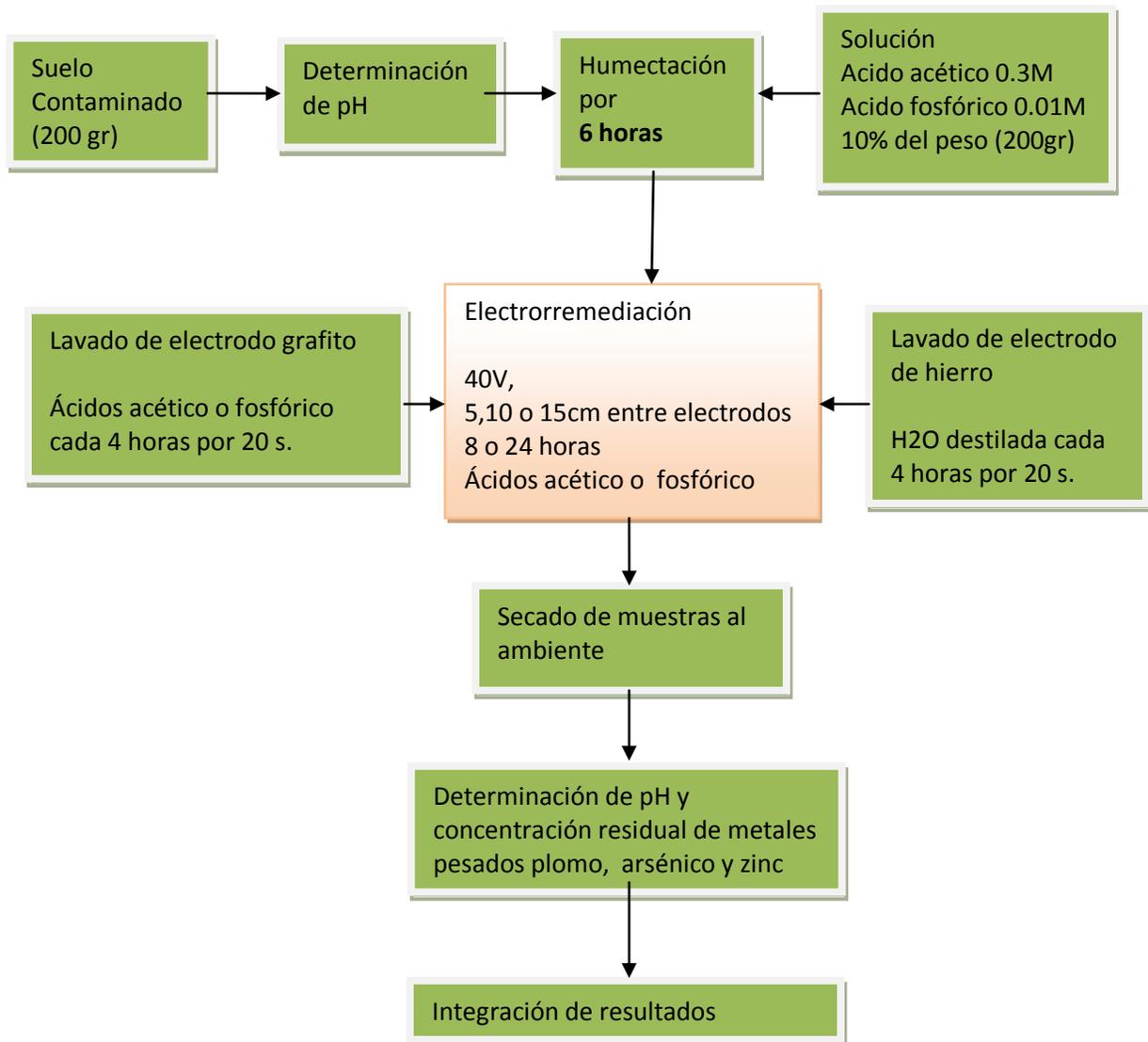
- Al ubicar el electrolito se debe poner los 480ml Anexo 2, sobre el nivel inferior del orificio de la válvula de salida ubicada en cada depósito.
- Las cañerías de los electrolitos deben estar conectados de la siguiente manera: la cañería del ácido al electrodo de grafito y la cañería del agua destilada al electrodo de hierro.
- Las válvulas de los electrolitos se abrirán hasta la marca señalada cada 4 horas durante 20 segundos para el lavado del electrodo.



- Ubicada la muestra en la celda de electroremediación, se conecta los terminales en cada electrodo el positivo (rojo) en el grafito, y el negativo (negro) al de hierro.
- Se procede a encender la fuente con un voltaje de 40V, que fue el voltaje que se utilizó para esta investigación. Se consideró este voltaje por investigaciones anteriores.

3.2.6 Diagrama del procedimiento empleado en los experimentos

Fig. 11: Diagrama del proceso de electroremediación



Fuente: Autor



3.3 MÉTODO ESTADÍSTICO

3.3.1 Diseño Experimental

La experimentación tiene por objeto comprobar en la práctica, una hipótesis formulada sobre un valor de un procedimiento, factor o elemento. Generalmente se usa un testigo, que no recibe el tratamiento, cuyo efecto se desea medir.

De lo expuesto se deduce que diseñar un experimento, significa planear un trabajo de modo que reúna información que sea pertinente al problema bajo investigación.

La selección de los tratamientos tiene una importancia decisiva en la precisión de un experimento. Se puede incrementar el grado de precisión, al probar más de una variable en lugar de diseñar un ensayo para cada variable. El criterio general es que, por lo menos se debe tener tres tratamientos que dará una idea de la curva de rendimiento. El número y la naturaleza de los tratamientos a estudiarse determinan el tipo de diseño que debe usarse.

3.3.1.1 El Análisis de Variancia. ADEVA o ANOVA

Es en esencia un procedimiento aritmético que consiste en desdoblarse una suma de cuadrados total (variación total) en fuentes de variancia reconocidas, incluyendo la variación que no se ha podido medir (proveniente de la variabilidad inherente al material experimental), fuente de variación a la que se conoce como error experimental.

El ADEVA es utilizado en todos los campos de investigación, cuando los datos son medidos cuantitativamente es decir, cuando las observaciones se hallan en forma de números. Su uso ha significado una gran expansión para el diseño experimental y, como veremos adelante, cada diseño tiene su propio ADEVA.

Las suposiciones básicas del ADEVA, a partir del cual se efectuarán las pruebas de significación son:

- Los efectos de tratamientos y los efectos ambientales, son aditivos (se suman entre sí) y,



- El error experimental constituye un elemento al azar, normal e independiente distribuido, con media cero y variancia común.

3.3.1.2 Grados de Libertad

Es el número de comparaciones independientes menos uno, que pueden hacerse en un juego de datos. En general, el número de grados de libertad de una muestra de datos, dado por $n - 1$, es el total de observaciones menos uno.

Dentro del ADEVA y para obtener el valor de F (que denota la significación entre tratamientos), se divide el cuadrado medio (CM) de tratamientos para el cuadrado del error. Al comparar el valor de F calculado con el valor de F tabular Anexo 4, para el numero de grados de libertad de tratamientos y del error, podemos establecer si existe significación o no; habrá significación en caso de que el valor de F calculado sea mayor que el tabular, al nivel de significación escogido (generalmente del 5% y del 1%), podemos rechazar la hipótesis nula de que no existe diferencia significativa entre los tratamientos y aceptamos la hipótesis alternativa. El siguiente paso sería efectuar las comparaciones entre medias de tratamientos, a fin de conocer cuál de ellos es el superior.

3.3.1.3 Prueba de Tukey

La prueba Tukey es una prueba de comparación y consiste en calcular el valor D (amplitud estandarizada de comparación), que es el producto de S_x (desviación estándar) y un factor Q (rangos mínimos de significación), tomado de la tabla de Rangos Mínimos de Duncan de puntos de porcentaje de rangos mínimos, para el 5% y 1% de probabilidades; y de acuerdo a los grados de libertad del error y del numero de tratamientos involucrados Anexo 4 pág. 2.

$$S_x = \sqrt{\frac{CM}{r}}$$

Donde:

S_x = Desviación estándar



CM = Cuadrado medio del error

r = Número de repeticiones

$$D = Q(\text{gl de error})Sx$$

Donde:

D = Amplitud estandarizada de comparación

Q (gl de error) = Rangos mínimos de significación con los grados de libertad del error

Para que dos medias sean declaradas significativas, la diferencia entre ellas debe sobrepasar el valor D.

Esta prueba toma en cuenta el número de tratamientos y mientras el número de tratamientos aumenta, el valor D también aumenta, por esta razón se considera la prueba de Tukey más estricta que Duncan (prueba que se utilizaba anteriormente en los análisis matemáticos de experimentación) y la diferencia media significativa (esta solo compara las medias de experimentación)

3.3.2 Experimentos factoriales

Factorial se refiere a un modo especial de formar combinaciones de tratamientos o factores. Un factor es una clase de tratamiento en que puede tener varios niveles. Se usan los experimentos factoriales en trabajos exploratorios, cuando no se conoce mucho sobre los niveles adecuados de un factor. Para la presente investigación se trabajó con el siguiente diseño Cuadro 2 y su análisis de varianza cuadro 3:

Factor A: Distancia entre los electrodos con 3 niveles $a_0 = 5\text{cm}$, $a_1 = 10\text{cm}$ y $a_2 = 15\text{cm}$

Factor B: Tiempo de recuperación con 2 niveles $b_0 = 8$ horas y $b_1 = 24$ horas

Factor C: Tipo de electrolito con 2 niveles $c_0 = \text{ácido acético}$ y $c_1 = \text{ácido fosfórico}$

Repeticiones R1, R2: Muestras de suelo contaminadas



Cuadro 2: Formato para un diseño factorial 2^3 con sus niveles.

Combinación de Tratamientos	Repeticiones	
	Muestra de suelo	
	R1	R2
a0b0c0		
a0b0c1		
a0b1c0		
a0b1c1		
a1b0c0		
a1b0c1		
a1b1c0		
a1b1c1		
a2b0c0		
a2b0c1		
a2b1c0		
a2b1c1		

Fuente: Germán González, 1985 – El autor

Cuadro 3. Formulas para cálculo de análisis de varianza (ADEVA).

Factor de Varianza	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	
				Fc	Ft
Total	t-1	SCT - Fc	SCT/t-1	Fc	Ft
Repeticiones	r-1	SCR - Fc	SCR/r-1		
Factor A	a-1	SCA - Fc	SCA/a-1		
Factor B	b-1	SCB - Fc	SCB/b-1		
Factor C	c-1	SCC - Fc	SCC/c-1		
AxB	(a-1) x(b-1)	SCAB - Fc	SCAB/(a-1) x(b-1)		
AxC	(a-1) x(c-1)	SCAC - Fc	SCAC/(a-1) x(c-1)		
BxC	(b-1) x(c-1)	SCBC - Fc	SCBC/(b-1) x(c-1)		
AxBxC	(a-1) x(b-1)x(c-1)	SCABC- Fc	SCABC/(a-1) x(b-1)x(c-1)		
Error	(axbxc -1)x(r-1)	SCE por Dif.	SCE/(axbxc -1)x(r-1)		

Fuente: Germán. González, 1985 –El autor

3.3.3 Interacción

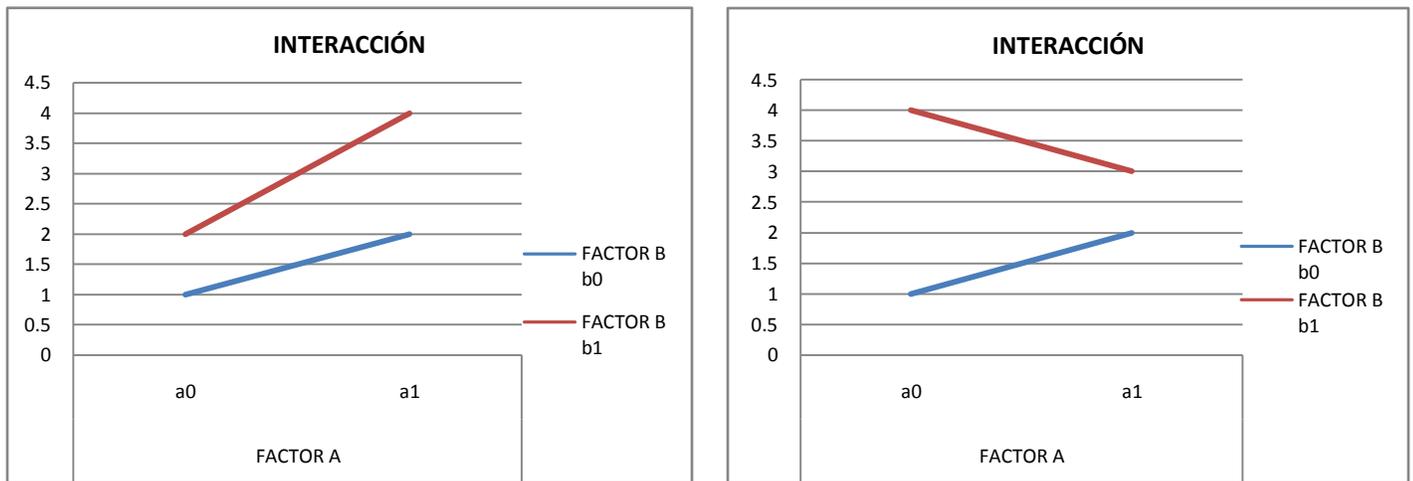
La interacción son efectos principales y simples en el caso de los factores (A, B y C) y cada uno de los niveles (variaciones de distancias, tiempos y electrolito) en que trabajamos. Los



efectos principales son positivos y las interacciones negativas. Los resultados de las interacciones pueden darnos dos interpretaciones e información valiosa:

- La interacción puede ser una diferencia en la magnitud en la respuesta

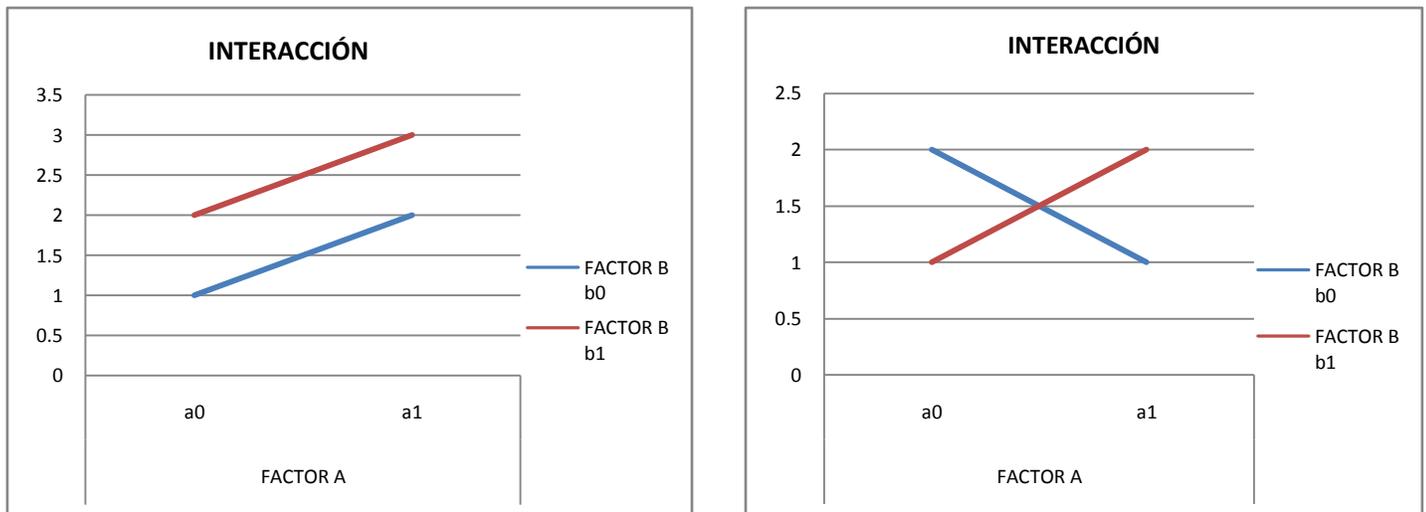
Fig. 12: *Interacción diferencia en la magnitud*



Fuente: Germán González, 1985

- La interacción puede ser la diferencia en la dirección de la respuesta

Fig. 13: *Interacción diferencia en la dirección*



Fuente: Germán González, 1985



3.4 CUANTIFICACIÓN DE METALES DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA

El análisis de los metales pesados (plomo, arsénico y zinc) de las muestras de suelo se realizó con el método Absorción atómica como indica en el Cuadro 4. Además se midió el pH a cada muestra de suelo antes del tratamiento.

Cuadro 4: *Análisis de laboratorio.*

PARÁMETRO	MÉTODO
Plomo	Absorción atómica HG (Horno de grafito)
Arsénico	Absorción atómica HG (Generador de Hidruro)
Zinc	Absorción atómica Llama
pH	Bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel

Fuente: *El autor*



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 2: *Condiciones de trabajo para cada tratamiento*

Tratamientos	Tiempo de humectación	Distancia entre electrodos	Tiempo de electroremediación	Tipo de electrolito
T1	6 horas	5cm	8 horas	Ac. Acético
T2	6 horas	5cm	8 horas	Ac. Fosfórico
T3	6 horas	5cm	24 horas	Ac. Acético
T4	6 horas	5cm	24 horas	Ac. Fosfórico
T5	6 horas	10cm	8 horas	Ac. Acético
T6	6 horas	10cm	8 horas	Ac. Fosfórico
T7	6 horas	10cm	24 horas	Ac. Acético
T8	6 horas	10cm	24 horas	Ac. Fosfórico
T9	6 horas	15cm	8 horas	Ac. Acético
T10	6 horas	15cm	8 horas	Ac. Fosfórico
T11	6 horas	15cm	24 horas	Ac. Acético
T12	6 horas	15cm	24 horas	Ac. Fosfórico

Fuente: *El autor*

Tabla 3. *Resultados del análisis de muestras después del proceso de remediación.*

Tratamiento	pH inicial	pH final	Plomo (mg/Kg)	Arsénico (mg/Kg)	Zinc (mg/Kg)
			Promedio	Promedio	Promedio
T1	3.0	4.0	0.81	0.37	175.11
T2	3.0	4.0	1.05	0.69	376.70
T3	6.5	6.5	1.05	0.42	197.97
T4	3.5	3.5	1.52	0.72	255.20
T5	3.5	3.5	1.34	0.57	345.59
T6	3.5	3.5	0.73	0.26	168.89
T7	3.0	3.5	1.41	0.51	372.02
T8	3.0	3.0	0.61	0.19	77.14
T9	3.0	4.0	1.07	0.33	202.60
T10	6.5	6.5	1.80	0.69	131.90
T11	6.5	6.5	1.18	0.44	288.80
T12	2.0	2.0	0.48	0.36	48.33

Fuente: *El autor*

En la Tabla 3 se muestran los resultados promedios obtenidos al analizar los distintos fragmentos de los suelos estudiados, una vez finalizado el tratamiento de electroremediación. De acuerdo a las reacciones de formación de oxígeno e hidrógeno en el ánodo y cátodo, respectivamente, se espera que los segmentos (distancias entre



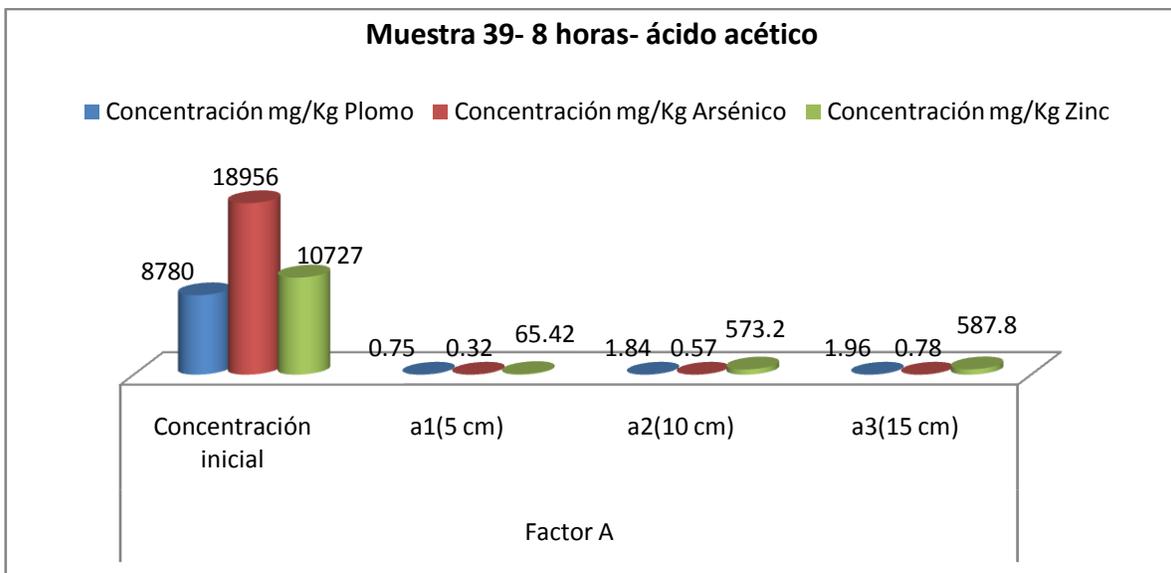
electrodos) más próximos a las cámaras de los electrodos se vean afectados por los frentes ácidos y alcalinos que ahí se generan. Que el tiempo de tratamiento y el tipo de electrolito utilizado para la humectación y lavado de los electrodos sean determinantes para la efectividad del proceso.

Considerando estas variables o factores se observa que el tratamiento T12 presenta la mayor capacidad de movilidad de metales pesados para el plomo y zinc, el tratamiento T8 presenta para el arsénico.

Analizando el comportamiento mostrado por los suelos bajo estudio, al ser sometidos a un campo eléctrico durante un tiempo determinado se puede afirmar que existe una estrecha relación entre los factores involucrados (distancia entre las cámaras de electrodos, tiempo de proceso y tipo de electrolito).

Al observar el valor del pH antes y después de la aplicación del proceso, vemos que este se mantiene más o menos constante, por la humectación inicial que se realizó a cada uno de los tratamientos. El pH de la muestra tiene influencia en la acción del electrolito, como podemos observar hay muestras con pH cercanos al neutro (6 a 6.5) donde hay menor eficiencia de eliminación de contaminación.

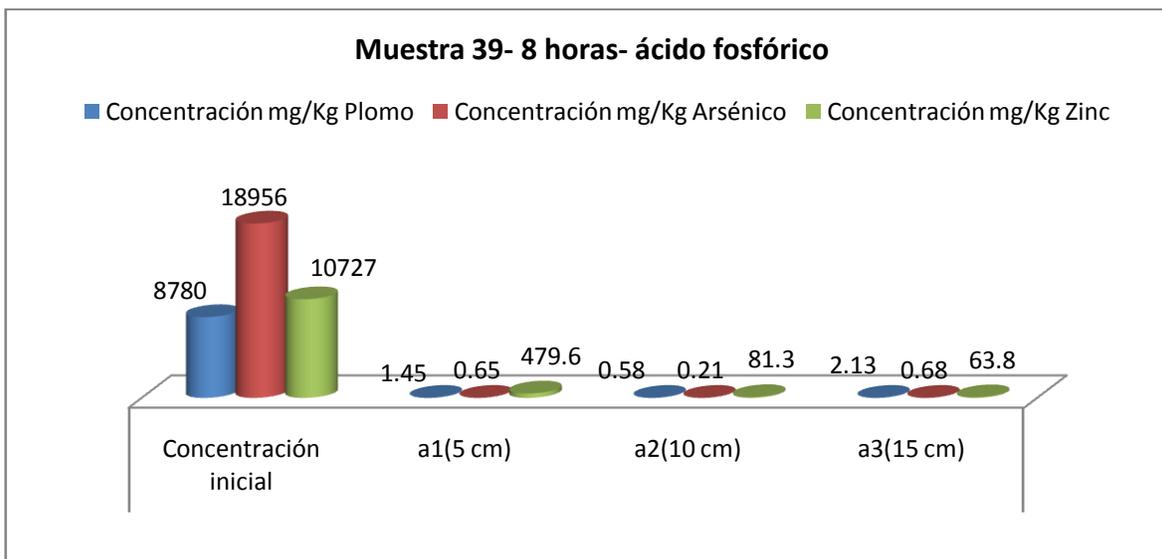
Fig. 14. Gráfica comparativa de concentración residual de metales pesados-Ácido acético



Fuente: *El autor*



Fig. 15. Gráfica comparativa de concentración residual de metales pesados- Ácido fosfórico.



Fuente: *El autor*

En las figuras 14 y 15 la gráfica de análisis comparativo en cuanto a resultados del grado de remediación; con los factores de variación, distancia y tipo de electrolito, manteniendo constante el tiempo de duración del tratamiento, podemos observar que la técnica y el equipo construido para evaluar la misma, es eficiente.

4.2 VARIACIÓN DE FACTORES

La variación de los factores como; la distancia entre los electrodos, tiempo de remediación y tipo de electrolito, permite controlar de mejor manera las variables externas al proceso, así como los efectos que producen cada uno de los factores en los demás factores, es decir el resultado de un factor depende de otro u otros. La combinación de este diseño factorial nos da precisión en la investigación, ahorro de tiempo, recursos y control de las variables independientes y dependientes.

4.3 INTERPRETACIÓN DE INTERACCIONES EN LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación, no solo vamos a conocer la respuesta al factor “distancia entre electrodos”, aparte de “tiempo de electroremediación” y “tipo de electrolito”, sino que vamos a determinar la interacción entre los factores, es decir la consistencia de la respuesta de



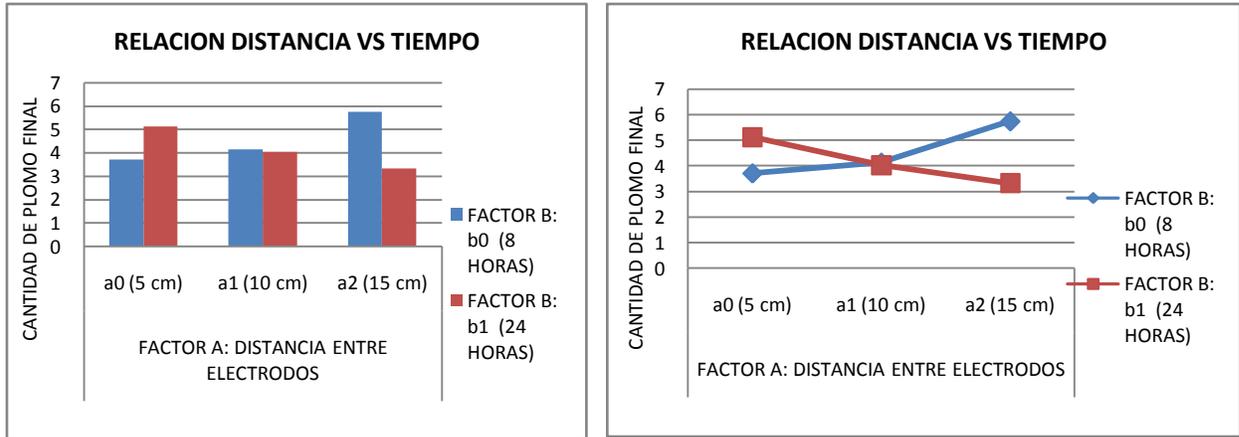
varios niveles de un factor, frente, o cuando son comparados con diferentes niveles de otro factor.

Podemos ver, entonces, que con el uso de factoriales el alcance del experimento y las inferencias que pueden obtenerse sobre una unidad experimental es significativa. En cuanto a la eficacia es preferible combinar tratamientos antes que analizarlos solos, porque existe una forma inherente de repeticiones en los experimentos factoriales. Además, aumenta los grados de libertad para el error, lo cual incrementa la precisión del ensayo, para las pruebas de significación. Los factores se los identifica con letras mayúsculas y los niveles con minúsculas.



4.3.1 Interacción distancia-electrolito con tiempo

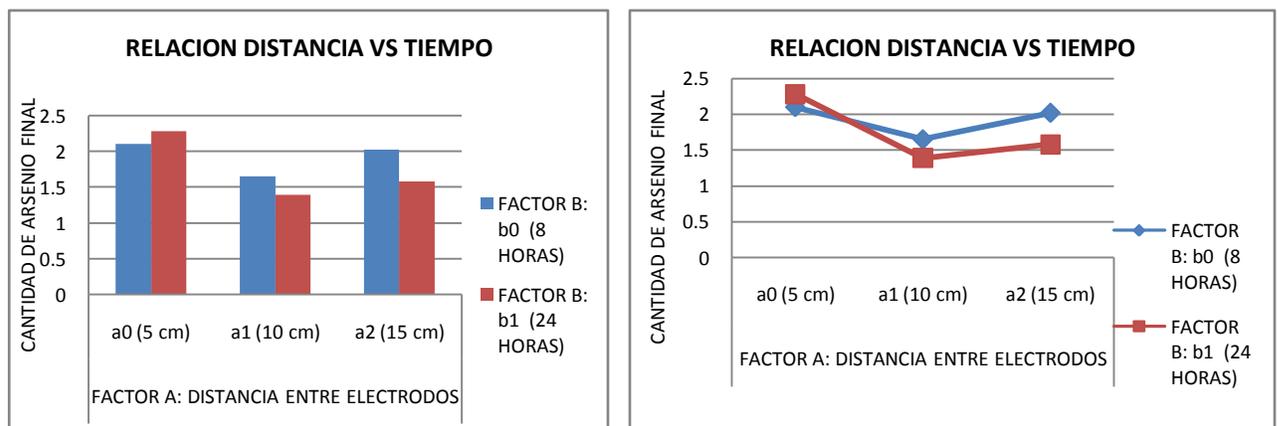
Fig. 16: Gráficas del plomo de la relación distancia frente al tiempo



Fuente: El autor

La relación de las gráficas de plomo nos indica que es inversamente proporcional es decir a mayor distancia menor concentración de plomo en las muestras y mayor tiempo de tratamiento. Como se puede observar hay un punto de intersección entre los factores que nos indica, que a una misma distancia determinada (a1=10cm) se puede emplear diferentes tiempos (8 y 24) horas de electroremediación y obtener el mismo porcentaje de concentración residual.

Fig. 17: Gráficas del arsénico de la relación distancia frente al tiempo

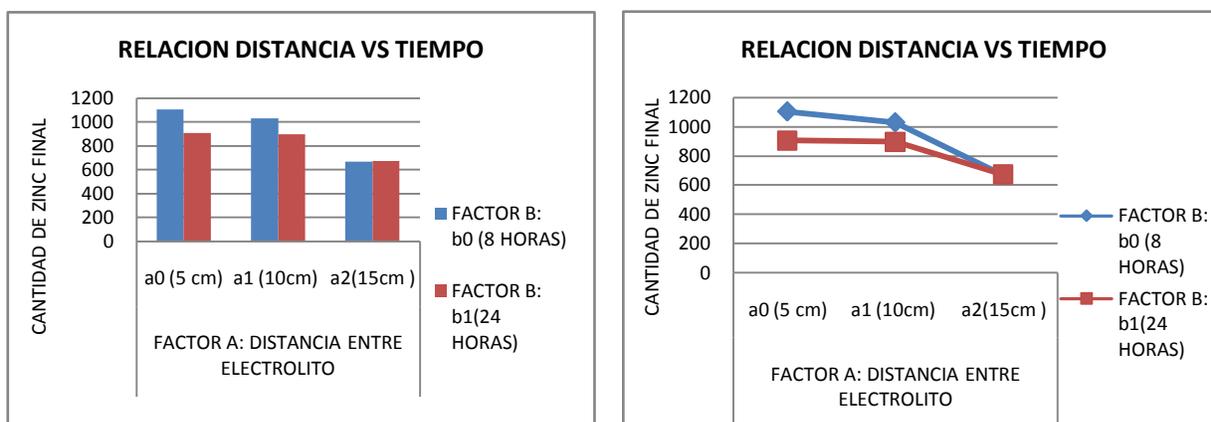


Fuente: El autor)



Las gráficas de arsénico nos indica que es inversamente proporcional es decir a mayor distancia menor concentración de arsénico en las muestras y mayor tiempo de tratamiento. Como se puede observar hay un punto de intersección entre los factores que nos indica que a una misma distancia determinada (entre el 5 y 10) cm se puede emplear diferentes tiempos (8 y 24) horas de relación electrorremediación y obtener el mismo porcentaje de remediación.

Fig. 18: Gráficas del zinc de la relación distancia frente al tiempo



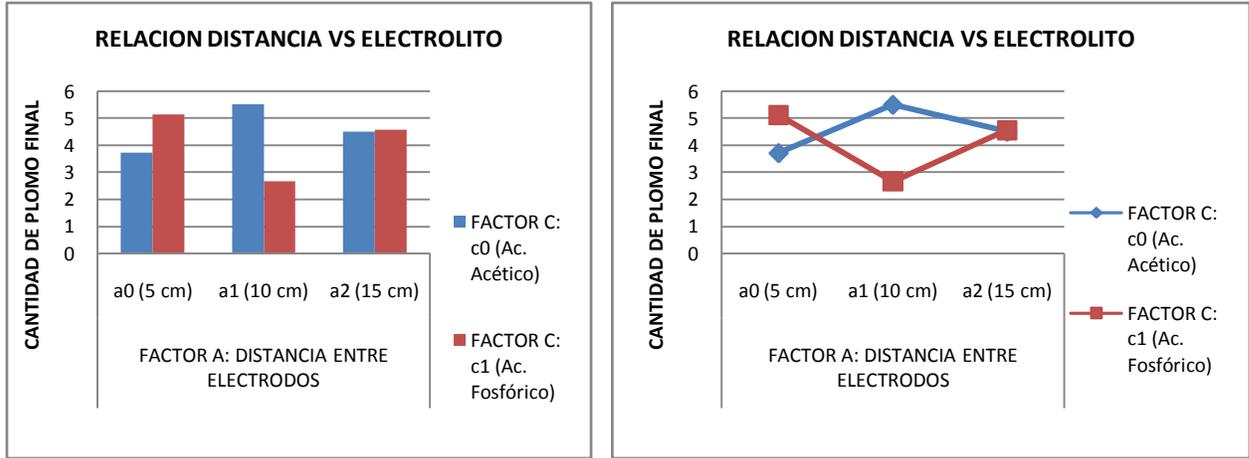
Fuente: *El autor*

En el análisis de las gráficas del zinc la relación es inversamente proporcional es decir a mayor distancia menor concentración de metal. En la gráfica se observa que la interacción es a una distancia de 15cm, y el factor B (b1 = 24horas) y se obtendrá el mismo porcentaje de remediación. No considera el tipo de electrolito



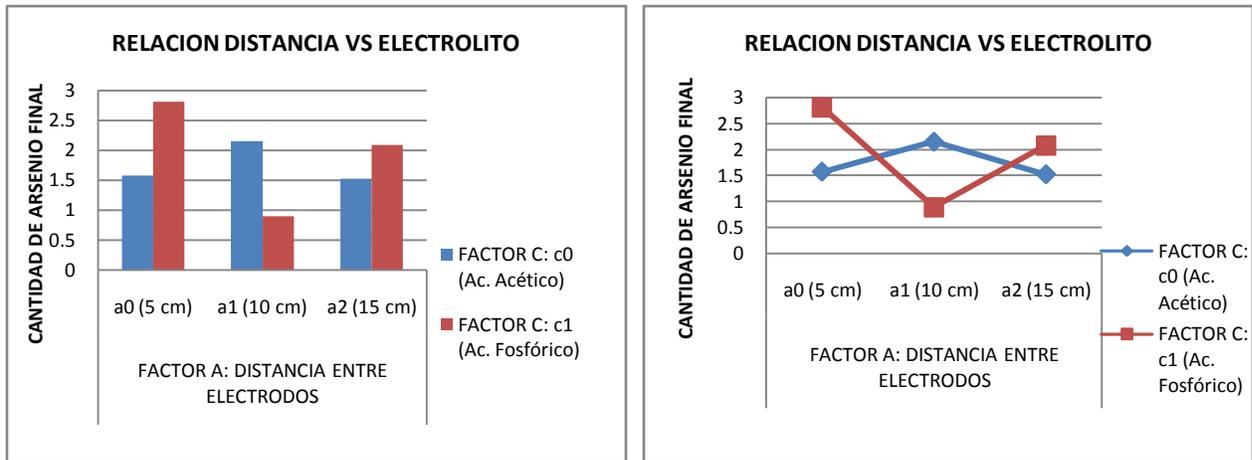
4.3.2 Interacción Distancia-Tiempo con Electrolito

Fig. 19: Gráficas del plomo de la relación distancia frente al electrolito



Fuente: El Autor

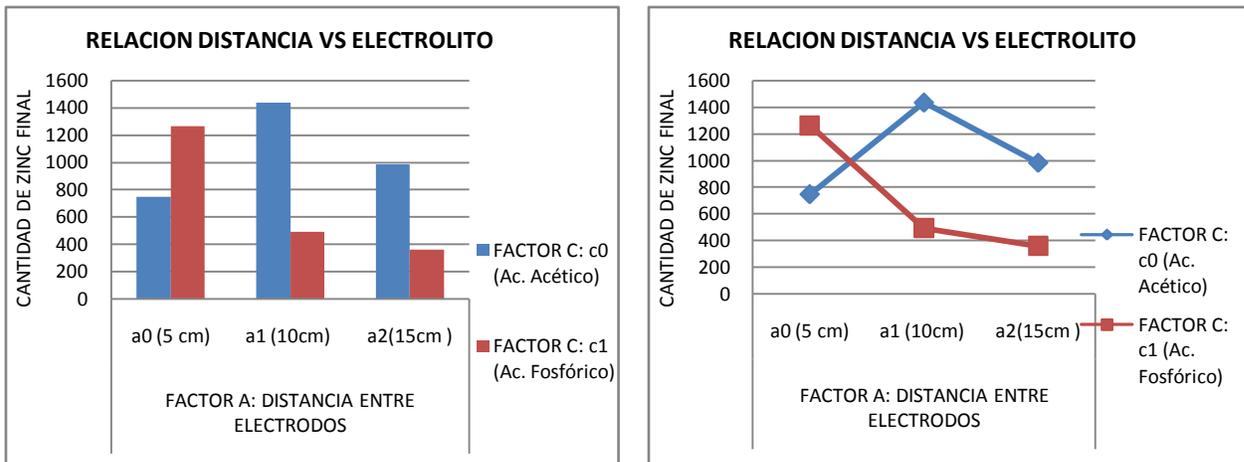
Fig. 20: Gráficas del arsénico de la relación distancia frente al electrolito.



Fuente: El Autor



Fig. 21: Gráficas del zinc de la relación distancia frente al electrolito.

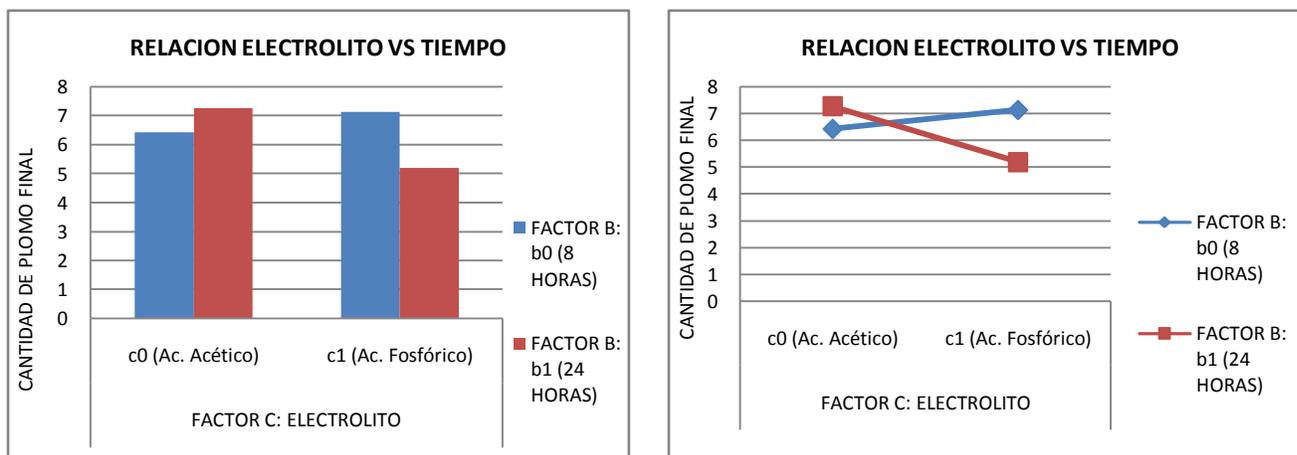


Fuente: El Autor

Las Figuras 19, 20 y 21, son las gráficas de la relación distancia vs electrolito de los metales traza; plomo, arsénico y zinc; se puede observar que en el punto (a1=10cm), que debido al factor C (c0=acido acético y c1=acido fosfórico) el contenido del metal pesado, presenta una diferencia significativa de remediación entre el tiempo de 8 horas y 24 horas.

4.3.3 Interacción Electrolito-Tiempo con Distancia

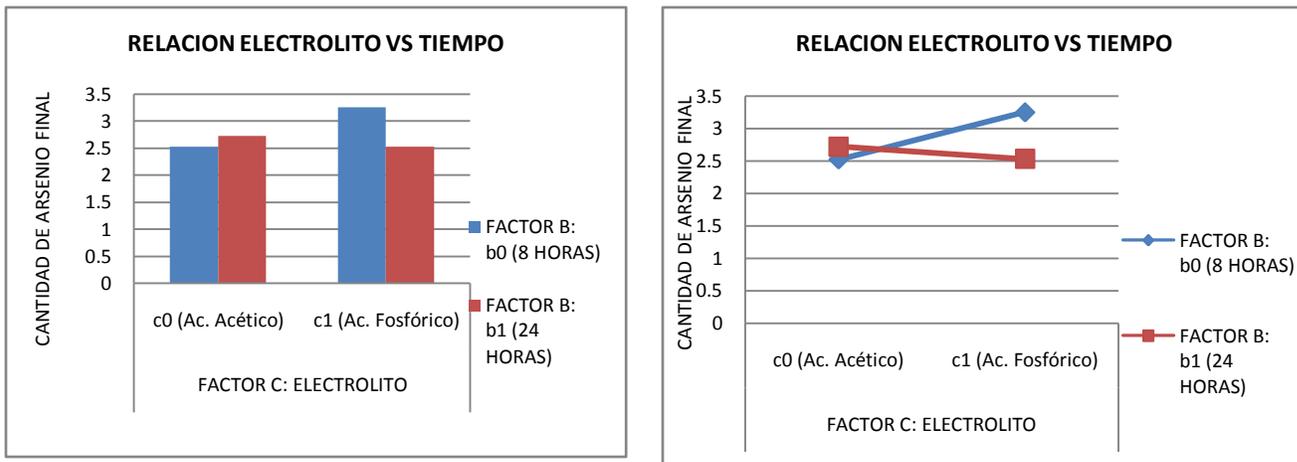
Fig. 22: Gráficas del plomo de la relación electrolito frente al tiempo



Fuente: El Autor

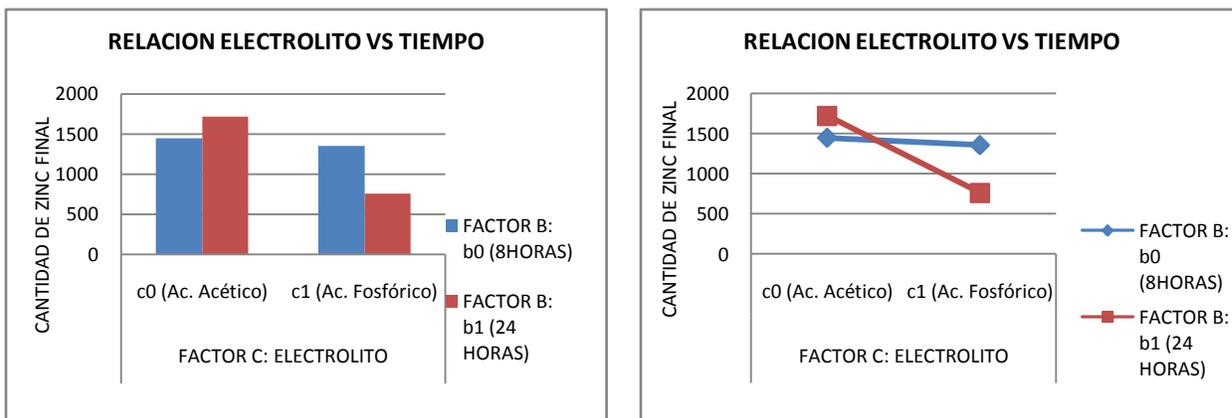


Fig. 23: Gráficas del arsénico de la relación electrolito frente al tiempo.



Fuente: *El Autor*

Fig. 24: Gráficas del zinc de la relación electrolito frente al tiempo.



Fuente: *El Autor*

Las Figuras 22, 23 y 24, representan la relación electrolito vs tiempo; se observa que obtenemos mayor efectividad de la técnica dependiendo del factor B (b1=24 horas) y el factor C (a1= ácido fosfórico). El punto de interacción indica que con el ácido acético, el tiempo no influye en el proceso electroremediación



4.4 Criterios de Remediación o Restauración del Suelo

Los criterios de remediación o restauración se establecen de acuerdo al uso que se le dé al suelo: agrícola, comercial, residencial e industrial, y tienen el propósito de establecer los niveles máximos de concentración de contaminantes de un suelo en proceso de remediación o restauración. Según la **NORMA ECUATORIANA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO Y CRITERIOS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS, LIBRO VI ANEXO 2.**

Analizando la Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados Anexo 6 y la Tabla 3, vemos que los resultados obtenidos de plomo y arsénico están por debajo de los niveles máximos de concentración permitidos después del proceso de remediación. En lo que se refiere al zinc Tabla 4 vemos que en algunos tratamientos los resultados están sobre los valores máximos permitidos.



Tabla 4: Análisis comparativo Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y los resultados del proceso de remediación (El Autor)

VALORES MAXIMOS PERMITIDOS SEGÚN NORMA ECUATORIANA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO								
Sustancia Parámetros Generales		Unidades (Concentración en Peso Seco)	USO DEL SUELO					
			Agrícola (A)	Residencial (R)	Comercial (C)	Industrial (I)		
PH			6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8		
Arsénico	mg/kg		12	15	15	15		
Plomo	mg/kg		100	100	150	150		
Zinc	mg/kg		200	200	380	380		
RESULTADOS OBTENIDOS DESPUES DEL PROCESO DE REMEDIACION								
Datos	pH	Plomo (mg/Kg)	Arsenio (mg/Kg)	Zinc (mg/Kg)	Valores sobre el rango del Zn			
					A	R	C	I
1	4,0	0,75	0,32	65,42				
2	4,0	1,45	0,65	479,6	x	x	x	x
3	6,5	1,32	0,54	278,0	x	x		
4	6,5	1,79	0,55	211,6	x	x		
5	3,5	1,96	0,78	587,8	x	x	x	x
6	3,5	0,95	0,37	277,0	x	x		
7	3,5	1,87	0,57	573,2	x	x	x	x
8	3,0	0,58	0,21	81,3				
9	4,0	1,11	0,43	283,6	x	x		
10	6,5	2,13	0,58	63,8				
11	6,5	1,25	0,52	396,0	x	x	x	x
12	2,0	0,33	0,5	16,46				
13	4,0	0,87	0,41	284,8	x	x		
14	4,0	0,64	0,72	273,8	x	x		
15	6,5	0,77	0,3	117,94				
16	6,5	1,24	0,89	298,8	x	x		
17	3,5	0,72	0,36	103,38				
18	3,5	0,5	0,14	60,78				
19	3,5	0,95	0,44	170,84				
20	3,0	0,63	0,17	72,98				
21	4,0	1,03	0,22	121,6				
22	6,5	1,47	0,79	200,0				
23	6,5	1,11	0,35	181,6				
24	2,0	0,63	0,21	80,2				

*El valor de "x" indica que las concentraciones de zinc en los tratamientos remediados son superiores de los límites máximos permitido según la Norma Ecuatoriana Ambiental del Recurso del Suelo.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La electroremediación tiene un gran potencial para descontaminar diversos tipos de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos en un amplio rango de concentraciones. En la presente investigación teórica y de laboratorio se han trabajado con tres de los factores involucrados (distancia entre electrodos, tiempo de remediación y tipo de electrolito) obteniéndose buenos resultados, que permiten deducir que la electroremediación es una técnica alternativa con gran eficiencia en la recuperación de suelos.
- Para la aplicación de la técnica de electroremediación se construyó un equipo modelo basado en el principio de electrólisis y factores involucrados en el proceso. Considerando los resultados de remediación el equipo tiene una eficiencia entre 82,49% a 99,9%.
- Las condiciones de muestreo, preparación y análisis iniciales permitieron controlar factores externos que influyen en los resultados del proceso. Las muestras del sector "El Pache", cantón Portovelo, provincia de El Oro al sur del Ecuador, sector minero por tradición; fueron las seleccionadas para la investigación por sus altas concentraciones en metales pesados y su grado de perturbación.
- Los resultados obtenidos muestran que la técnica de electroremediación de suelos es un procedimiento que puede ser utilizado de manera efectiva, para el tratamiento de suelos contaminados con metales. En nuestro caso en particular la remediación fue exitosa, para el tratamiento de muestras de suelo real con un alto contenido de plomo (8780ppm), arsénico (18956 ppm) y zinc (10727 ppm) correspondientes a la muestra 39.
- Las pruebas de extracción de plomo, arsénico y zinc del suelo muestran que el proceso se ve afectado por diversas variables como son: la distancia entre electrodos, tiempo de remediación y tipo de electrolito. Los resultados muestran que se puede realizar el proceso de electroremediación combinando tres factores frente a la cantidad remediada en plomo, arsénico y zinc. En los tres casos se logran porcentajes de extracción considerables, lográndose porcentajes de 99,9% para el plomo y arsénico y de 82,49% para el zinc.
- Al realizar la humectación con electrolitos ácidos se mantuvo el pH de las muestras que eran ácidas, esto logro que los resultados dieran efectividad en la técnica permitiendo mantener los contaminantes en solución lo cual facilita el proceso de electromigración de los metales.



- La validación de los resultados se la realizó por medio de un análisis estadístico para determinar la mejor combinación de factores a trabajar frente a la cantidad remediada del metal. El ADEVA para los tres metales (plomo, arsénico y zinc) nos indica una diferencia significativa con las interacciones(AxB, AxC y BxC) que indica los factores; distancia entre electrodos y tipo de electrolito, la prueba de Tukey determina el mejor tratamiento con las condiciones de trabajo entre 10-15 cm de distancia con 24 horas y ácido fosfórico que corresponde al tratamiento T12 para el plomo y zinc y T8 el arsénico
- La contaminación del suelo producido por el plomo, arsénico y zinc, es muy severo por lo que debe considerarse como riesgoso para la salud de las personas que habitan el sector.
- Los parámetros de máximo contenido de metales pesados en el suelo se los analizó en forma comparativa uno a uno con los tratamientos llegando a determinar que con el zinc se presentaron valores que no está dentro de los parámetros de la norma, esto debido a varios factores como pH y especialmente a los compuestos ligados al zinc, que impidieron extraer mayor cantidad de metal. El plomo y arsénico se encuentran dentro de los valores permitidos.
- El pH cuando se encuentra entre 2 a 4 es una característica importante del suelo, que permite una mayor disgregación de los compuestos que forma parte el metal pesado, así como la facilidad en la movilidad de metales.



5.2 RECOMENDACIONES

- Del extracto obtenido en el lavado de la electrorremediación contiene especies electroactivas que son susceptibles de ser extraídas con la aplicación de una celda electroquímica, se puede recuperar un porcentaje considerable del plomo presente en el extracto en forma de un depósito que se forma sobre la superficie del electrodo.
- Las pruebas de recuperación de plomo, arsénico y zinc que se realizaron en este estudio corresponden a pruebas iniciales. Los resultados logrados permiten replantear nuevas estrategias para obtener procesos de electroremediación de metales más eficientes.
- La investigación debe seguir tomando en cuenta otros factores de variabilidad como son: variación de voltajes, concentración (molaridad) de los electrolitos, tipos de material de electrodos, tiempos de humectación etc.
- Todavía es necesario avanzar en las investigaciones en "in situ" para tener un mejor entendimiento de los fenómenos de transporte de metales involucrados y así obtener altas eficiencia de remediación en campo
- Para pruebas de electrorremediación se recomienda realizar un análisis de las condiciones físico-químicas del suelo después de la aplicación de la técnica, para conocer si los residuos de contaminación están por debajo de los valores máximos permitidos, de acuerdo al uso del suelo



BIBLIOGRAFIA

- Abad Vásquez Guido H., (2008), Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos, tesis de Gestión Ambiental, Ecuador
- Acar Y.B. y Alshawabkeh A.N. (1993). Principles of electrokinetic remediation. Environ. Sci. Technol. 27, 2638-2647.
- Alloway, B.J. (1995b). Chapter 2: Soil process and the behavior of the heavy metals. Heavy metals in soils. 2nd ed. Blackie Academic and Professional. London, UK.
- Álvarez, J.M., Novillo, J., Obrador, A. and López-Valdivia, L.M. (2001), Mobility and leachability of zinc in two soils treated with six organic zinc complexes. J. Agric. Food Chem. 49:3833-3840.
- Barrow, N.J. (1993). Mechanisms of reaction of zinc with soil and soil components. Chap 2. p. 15-32. In Zinc in soils and plants. Robson, A.D. (ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Bowen, J.E. (1969). Absorption of copper, zinc and manganese by sugar cane tissue. Plant Physiol. 44:255-261.
- Brown, G.E. (Jr.), Foster, A.L. and Ostergren, J.D., (1999). Mineral surfaces and Bioavailability of Heavy Metals: A Molecular-scale Perspective. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 96: 3388-3395.
- Carrión Coronel Eduardo Fernando, (2010), Proyecto de Máster Oficial en Ingeniería Geológica Aplicada a la Obra Civil, “Evaluación del contenido y variabilidad espacial de metales pesados en suelo superficial con residuos de relaves de plantas de procesamiento mineral a lo largo del sector “El Pache”, distrito minero “Portovelo-Zaruma” (Ecuador), Universidad de Granada, España.
- Coeuret F., Costa López J. (1992), *Introducción a la ingeniería electroquímica..* Ed. Reverté, S.A. España. 313 pág.
- David A. De la Rosa-Pérez, Ma. Maura Margarita Teutli-León y Marta E. Ramírez-Islas, (2007), *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*, Puebla México.
- Doménech, Xavier, (1995), “Química del suelo. El impacto de los contaminantes” Miraguano Ed. Madrid.
- Ergas Sarina Juana, (2000), Principios de Biorrecuperación, Ewis editorial M. Graw. Hill, primera edición.



- FAO-PNUMA. (1983). Directrices para el control de la degradación de suelos. Roma.
- Fergusson, J.F., (1990). The heavy Elements. Chemistry, Enviromental Impact and Health Effects. Pergamon Press.
- González B. Germán, (1985), Métodos Estadísticos y Principios de Diseño Experimental, 2da. Edición, Ecuador
- Harte, J., C.Holden, R.Schneider, C.Shirey, (1991). Toxics A to Z. A guide to everyday pollution hazards. Univ. of California Press.
- Helmut A.(1999), Documento de Cátedra. Asignatura: Procesos y obras para descontaminación de suelos. Maestría en Ing. Ambiental. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. Diez pág.
- Krauskopf, K.B. & Bird, D.K. (1995). Introduction to Geochemistry. MacGraw-Hill, NY, 647 pp.
- Labrega A., (1996), Gestión de Residuos Tóxicos, Tratamientos, Eliminación y Recuperación de Suelos, editorial M. Graw. Hill.
- López S., Ayala L. F. (1995) Contaminación y Depuración de Suelos. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid.
- Matéu Jorge e Ignacio Morell, (2003), Geoestadística y Modelos Matemáticos en Hidrogeología, editorial Universitat Jaume USA
- Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados Libro VI Anexo 2
- Pazos M., Sanroman M.A. y Cameselle C. (2006). Improvement in electrokinetic remediation of heavy metal spiked kaolin with the polarity exchange technique. Chemosphere 62, 817-822.
- Porta, J., López-Acebedo, M., Roquero, C. (1999), “Edafología para la agricultura y el medio ambiente” Ed. Mundi-Prensa. Bilbao.
- Reglamento sustitutivo al reglamento ambiental para las operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador, (2003), Ecuador
- Scheiner, B.J., Doyle, F.M. & Kawatra, S.K. (Eds.). (1989). Biotechnology in Minerals and Metal processing. Society of Mining EGINEERS Inc., Littleton (CO), 209 pp.



- Sebastián Peña Beatriz (2007), Quelatos de Zinc Aplicados A Suelos En Un Cultivo De Lino (*Linum Usitatissimum* L.) Textil Tesis Doctoral Madrid Universidad Politécnica De Madrid,
- Seoaneg Mariano, (1999), Contaminación de Suelos Estudios, Tratamiento y Gestión, editorial Mundi-Prensa. Page, M.M., and Page, C.L. 2002. Electrorremediación of contaminated soils. *Journal of Environment Engineering*, 128: 208–219.
- Seoáñez Calvo, Mariano. (1998), “Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión”. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Smith, L. A., Means, J. L., Chen, A., Alleman, B., Chapma, C. C., Tixier Jr., J. S., Brauning, S. E., Gavaskar, A. R., and Royer, M. D. 1995. Remedial Option for Metals-Contaminated Sites. Lewis, Boca Ratón, FL.
- UNE 77305. (1999). Calidad del suelo. Determinación del pH.
- UNE 77335. (2003) Calidad del suelo. Determinación del potencial redox.
- Virkutyte J., Sillanpää M. y Latostenmaa P. (2002). Electrokinetic soil remediation Critical overview. *The Sci. Tot. Environ.* 289, 97-121



REFERENCIAS DE INTERNET

- <http://www.irnase.csic.es/castellano/agro.php>.
- Biorremediacion.mavenga2005@yahoo.com.mx
- www.gruetec.com
- www.botanical-online.com
- www.profesorenlinea.ch
- <http://h2osparc.wq.ncsu.edu/info/wetlanda/wetloss.html>
- http://www.who.int/pes/ehc/summaries/ehc_224.html
- <http://www.usgs.gov/themes/factsheet/146-00/>
- <http://www.epa.nsw.gov.au/leadsafe/leadinf8.htm>
- <http://www.ucm.es/info/crismine/gossan/gossanapuntes2.htm>
- <http://www.science.mcmaster.ca/Biology/4S03/HM1.HTM>

GALERIA FOTOGRAFICA

1. Celda de vidrio con electrodos de hierro y grafito



2. Depósitos para electrolitos con válvulas y cañerías



3. Fuente de corriente continua



4. Celda de vidrio con electrodos instalados y cañerías



5. Soporte para instalación de equipo



6. Materiales para la preparación de electrolito y muestra



7. Humectación de la muestra de suelo



8. Medición de pH (Bandas)



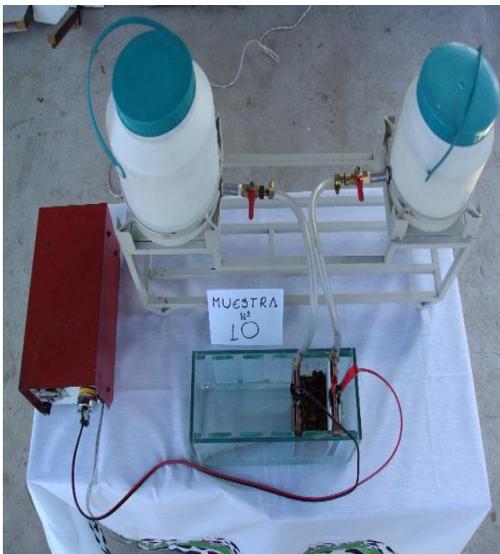
9. Muestra de suelo en reposo de 6 horas



10. Equipo de electroremediación



11. Proceso de electroremediación



12. Equipo preparado para nuevo tratamiento



13. Muestras para análisis de laboratorio



14. Muestras en reposo para medir pH



15. Porta-equipos de electroremediación



16. Equipo de Electroremediación



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja
www.utpl.edu.ec



ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE ELECTORREMEDIACIÓN DE
SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS**

*Trabajo de fin de carrera
previa a la obtención del
título de Ingeniero Civil*

AUTOR: JORGE FRANCISCO GRANDA LASO jorgegranda_2304@hotmail.com

DIRECTOR: ING. EDUARDO CARRIÓN CORONEL

**LOJA - ECUADOR
2011**

RESUMEN

En muchos lugares, la contaminación por metales pesados en los suelos es un problema muy grande por la producción de desechos peligrosos provocando desequilibrio al medio ambiente y generando suelos con limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de vegetación y riesgos a la salud. Las actividades mineras generan una gran cantidad de residuos, que se depositan en la superficie. En el sector "El Pache" existen aproximadamente 70 plantas de tratamiento de minerales, que se dedican a la recuperación de oro y plata principalmente y en pocos casos concentran sulfuros de cobre. Gran parte de ellas se ubican a las orillas del río Calera, lo que ha provocado altos niveles de contaminación ambiental debido a que los relaves son almacenados en algunos casos de forma incipiente y en otros, con mayor grado de responsabilidad ambiental (E Carrión 2010).

El objetivo del presente estudio es evaluar la técnica de electrorremediación de suelos contaminados con metales pesados (plomo, arsénico y zinc), para lo cual se diseñó y construyó una celda de electrorremediación. Para el estudio se analizaron conjuntamente medidas de pH, concentración de contaminantes. Los factores considerados fueron los siguientes; tres distancias entre electrodos, dos tiempos de tratamiento y dos tipos de electrolitos; en los resultados se determinó su influencia en la concentración final, de estos metales en las muestras de suelos remediados. Se trabajó con muestras obtenidas del proyecto de investigación (E Carrión 2010). Las muestras con mayor concentración en plomo, arsénico y zinc fueron seleccionadas para realizar el proceso de electrorremediación. Se comprobó que, para las condiciones experimentales utilizadas, el tratamiento con menor concentración después de aplicada la técnica de electrorremediación, es el tratamiento T12 (15 cm, 24 horas y ácido fosfórico) para el plomo y zinc; el tratamiento T8 (10 cm, 24 horas y ácido fosfórico) para el arsénico; presentan una eficiencia del 99.9% para la movilización de metales pesados.

PALABRAS CLAVES

Electrorremediación, suelo, metales pesados, optimización de parámetros

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado y la producción de desechos principalmente mineros, ha provocado la presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente, provocando numerosos efectos sobre la salud y el equilibrio de los ecosistemas. Se incorporan con los alimentos o como partículas que se respiran y se van acumulando en el organismo (bioacumulación), hasta llegar a límites de toxicidad.

Estos desechos, debido al lento desarrollo, a la ineficiencia o inexistencia de las técnicas de manejo, han generado una gran cantidad de sitios contaminados con metales pesados, compuestos orgánicos y otros materiales peligrosos (Virkyute *et al.* 2002). En los últimos años se han desarrollado diversas tecnologías para la remediación de suelos contaminados aplicándose exitosamente. Sin embargo, en nuestro país este tipo de investigación no ha tenido la importancia que requiere. La remediación de nuestros suelos demanda la investigación detenida de los factores que influyen en la eficiencia y eficacia de la técnica y método a ser aplicado. Las variables tanto físicas como químicas son complejas por lo que las técnicas en investigación cada

día van sufriendo modificaciones, la remediación, específicamente la electrorremediación también tiene que tener en cuenta estas variables para su análisis.

La electrorremediación es una alternativa para el tratamiento y recuperación de suelos contaminados con metales pesados. En el país especialmente en el sector minero se requiere de la aplicación e investigación de esta técnica y otras.

OBJETIVOS

Evaluar la remoción de metales pesados que contaminan un suelo al utilizar la técnica de electrorremediación.

Objetivos Específicos

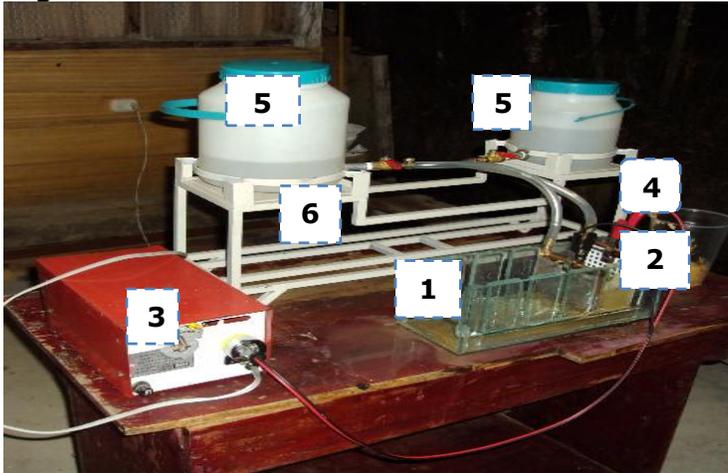
- Estudiar el estado del arte de la electrorremediación.
- Diseñar y construir el equipo de electrorremediación
- Aplicar la tecnología en laboratorio
- Validar los resultados con análisis estadístico (mejor combinación de factores aplicados a la electrorremediación)

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y construcción del equipo de electroremediación

Para realizar la evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales pesados, se procedió a diseñar el equipo, basado en el principio de electrólisis, la construcción del equipo (celda de electrorremediación estática Fig. 1.) consta de:

Fig. 1: Celda de electrorremediación estática

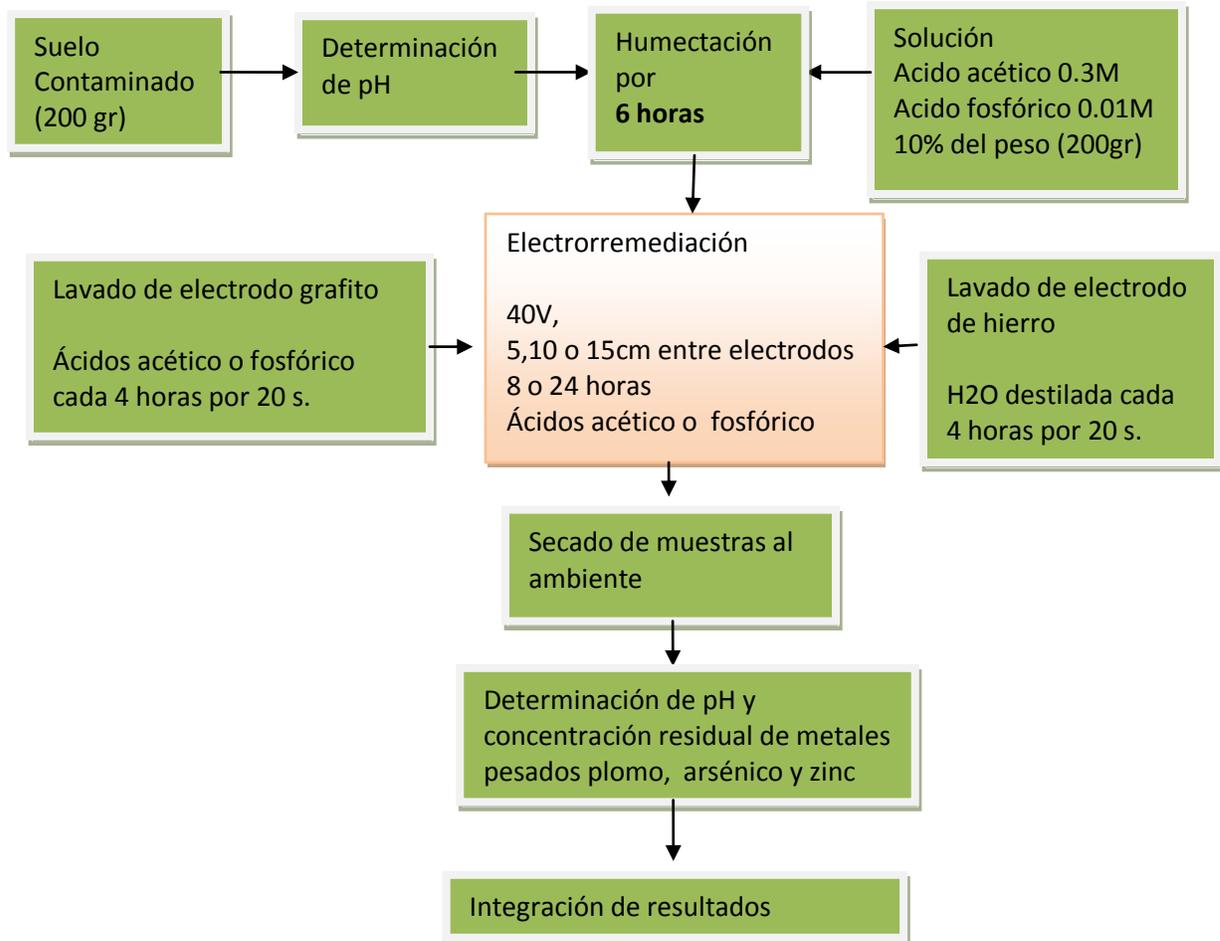


Fuente: **El autor**

Celda de electrorremediación: **1)** Una cubeta de vidrio, dimensiones son (30, 8 y 12) cm; la equidistancia para la colocación de electrodos es de 5 cm. **2)** Electrodo de grafito y de hierro: El electrodo de grafito protegido con mallas plásticas; dimensiones (10, 8 y 1) cm. **3)** Una fuente de energía, voltaje (10V hasta 50V) en intervalos de 5V. **4)** Dos conductores eléctricos (rojo carga+ y negro carga-). **5)** Depósitos para

electrolito (2 y 3) litros: dos válvulas y cañerías (diámetro interior 8 mm). **6)** Soporte para traslado.

Fig. 2: Diagrama del proceso de electroremediación



Fuente: Autor

Preparación de la muestra, electrolito y calibración del equipo.

Toma de muestras y condiciones iniciales

Las muestras utilizadas para la aplicación de la electroremediación fueron obtenidas del proyecto de investigación (Eduardo Carrión, 2010)

Las muestras se tomaron por cuarteo en diversas porciones (muestra bruta), se mezclaron, y se dejaron secar al ambiente. Una vez secas se separaron de elementos gruesos, se redujo el tamaño de los agregados y se tamizaron a través de una malla de 2mm. Todos los datos obtenidos están referidos a cantidad de muestra seca. Para el análisis de metales pesados las muestras de suelo tamizadas, fueron pulverizadas en un molino de discos; y se aplicó el método de Fluorescencia de Rayos X para determinar la cantidad inicial de metales pesados (plomo, zinc y arsénico) (E. Carrión 2010). El pH se determinó con bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel.

Cuadro 1: Análisis de laboratorio de Plomo, Arsénico y Zinc.

PARÁMETRO	MÉTODO
Granulometría	Tamizado
Textura	Hidrómetro
Contenido de materia orgánica	Walkley Black
pH	Bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel
Plomo, Arsénico y Zinc	Fluorescencia de Rayos X

Fuente: (Eduardo Carrión, 2010)

Cabe indicar que las muestras para el análisis pertenecen al sector "El Pache", distrito minero Portovelo-Zaruma provincia de El Oro. Las principales características físico-químicas del suelo del sector "El Pache" que se determinaron fueron: textura (% de arena, % de limo y % de arcilla), contenido de materia orgánica y pH. Los valores que se presentan en la Tabla 2 corresponden a muestras con la mayor contaminación de plomo, arsénico y zinc, que sirvieron para la aplicación de la técnica en estudio.

Tabla 1: Parámetros físico-químicos y Contenido de Plomo, Arsénico y Zinc.

MUESTRA	Arena %	Limo %	Arcilla %	Mo %	pH	Plomo (ppm)	Arsénico (ppm)	Zinc (ppm)
10	55.20	41.20	3.60	0.80	4,00	6695	454	954
12	61.60	34.40	4.00	0.90	6,50	2732	1881	5674
15	59.20	34.00	6.80	0.70	5,50	5625	2213	995
22	62.00	32.00	6.00	2.70	3,50	3513	6598	4530
35	55.20	35.60	9.20	2.00	6,50	3840	18460	2686
39	62.40	27.20	10.40	1.80	3,00	8780	18956	10727
40	64.40	30.40	5.20	2.30	2,00	7005	13026	1037

Fuente: (El Autor)

Preparación del electrolito

El electrolito se prepara de la siguiente manera:

Se calcula la cantidad del ácido acético (CH_3COOH) 0.3M y de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 0.01M que se necesita para el proceso. Se utilizó 500ml de electrolito para cada tratamiento; (10% del peso de la muestra en ácido para humectar).

Medición de pH

El pH se registró utilizando Bandas pH-Fix 2.0-9.0 Macherey-Nagel bandas multicolores con intervalos de precisión de 0.5; para lo cual se procedió a pesar 10gr de muestra y se disolvió en 100ml de agua destilada agitándose a intervalos de 10min durante una hora. Se deja reposar y se mide el pH.

Humectación de la muestra

La humectación se la realiza agregando a la muestra ya pesada (200g) en un depósito, la cantidad de 20ml (10% del peso de la muestra) de electrolito mezclándola con ayuda de una paleta describiendo movimientos circulares durante 5 minutos. Luego se deja reposar durante 6 horas antes de ubicarla en la celda de electrorremediación.

Calibración del equipo

Antes de ubicar la muestra en la celda de electroremediación se debe considerar lo siguiente:

- El electrolito: 480ml sobre el nivel inferior del orificio de la válvula de salida del depósito.
- Conexión de cañerías de los electrolitos: la cañería del ácido al electrodo de grafito y la cañería del agua destilada al electrodo de hierro.
- Las válvulas de los electrolitos se abrirán hasta la marca señalada cada 4 horas durante 20 segundos para el lavado del electrodo.
- Se conecta los terminales en cada electrodo el positivo (rojo) en el grafito, y el negativo (negro) al de hierro.
- Se enciende la fuente con voltaje de 40V para esta investigación.

Método estadístico

Para la presente investigación se trabajó con el diseño factorial 2^3 y niveles, el ANOVA y prueba de Tukey; se indica a continuación el diseño factorial: Factor A: Distancia entre los electrodos con 3 niveles $a_0 = 5\text{cm}$, $a_1 = 10\text{cm}$ y $a_2 = 15\text{cm}$. Factor B: Tiempo de recuperación con 2 niveles $b_0 = 8$ horas y $b_1 = 24$ horas. Factor C: Tipo de electrolito con 2 niveles $c_0 = \text{ácido acético}$ y $c_1 = \text{ácido fosfórico}$. Repeticiones R1, R2: Muestras de suelo contaminadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 2. Resultados del análisis de muestras después del proceso de remediación.

Tratamiento	pH inicial	pH final	Plomo (mg/Kg)	Arsénico (mg/Kg)	Zinc (mg/Kg)
			Promedio	Promedio	Promedio
T1	3.0	4.0	0.81	0.37	175.11
T2	3.0	4.0	1.05	0.69	376.70
T3	6.5	6.5	1.05	0.42	197.97
T4	3.5	3.5	1.52	0.72	255.20
T5	3.5	3.5	1.34	0.57	345.59
T6	3.5	3.5	0.73	0.26	168.89
T7	3.0	3.5	1.41	0.51	372.02
T8	3.0	3.0	0.61	0.19	77.14
T9	3.0	4.0	1.07	0.33	202.60
T10	6.5	6.5	1.80	0.69	131.90
T11	6.5	6.5	1.18	0.44	288.80
T12	2.0	2.0	0.48	0.36	48.33

Fuente: El autor

En la Tabla 2 se muestran los resultados promedios obtenidos de los suelos estudiados, una vez finalizado el tratamiento de electroremediación. De acuerdo a las reacciones de formación de oxígeno e hidrógeno en el ánodo y cátodo, respectivamente, se espera que los segmentos (distancias entre electrodos) más próximos a las cámaras de los electrodos se vean afectados por los frentes ácidos y alcalinos que ahí se generan. Que el tiempo de tratamiento y el tipo de electrolito utilizado para la humectación y lavado de los electrodos sean determinantes para la efectividad del proceso.

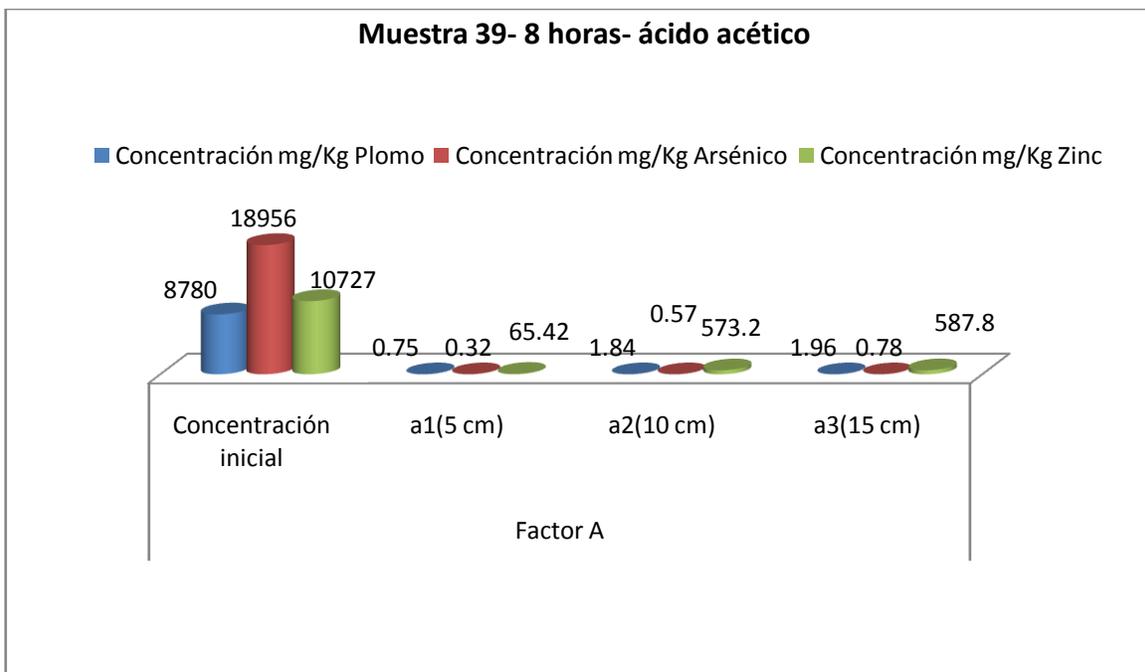
Considerando estas variables o factores se observa que el tratamiento T12 presenta la mayor capacidad de movilidad de metales pesados para el plomo y zinc, el tratamiento T8 presenta para el arsénico.

Analizando el comportamiento mostrado por los suelos bajo estudio, al ser sometidos a un campo eléctrico durante un tiempo determinado se puede afirmar que existe una estrecha relación entre los factores involucrados (distancia entre las cámaras de electrodos, tiempo de proceso y tipo de electrolito).

Al observar el valor del pH antes y después de la aplicación del proceso, vemos que este se mantiene más o menos constante, por la humectación inicial que se realizó a cada uno de los tratamientos. El pH de la muestra tiene influencia en la acción del electrolito, como podemos observar hay muestras con pH cercanos al neutro (6 a 6.5) donde hay menor eficiencia de eliminación de contaminación.

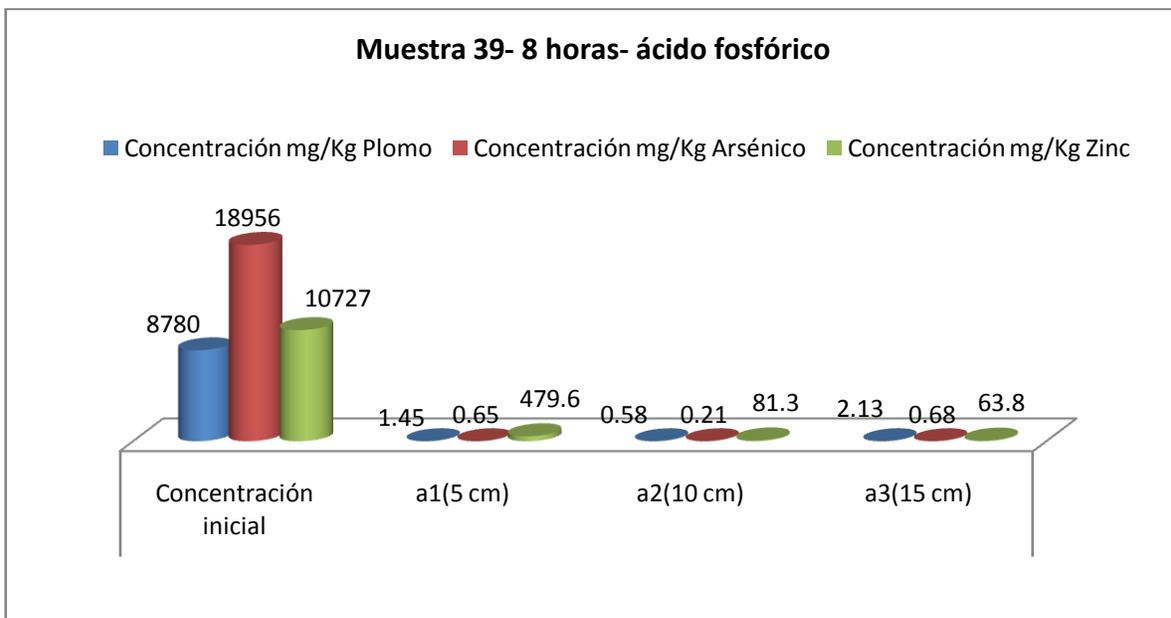
En las figuras 3 y 4 la gráfica de análisis comparativo en cuanto a resultados del grado de remediación; con los factores de variación, distancia y tipo de electrolito, manteniendo constante el tiempo de duración del tratamiento, podemos observar que la técnica y el equipo construido para evaluar la misma, es eficiente.

Fig.3. Gráfica comparativa de concentración residual de metales pesados-Ácido acético



Fuente: El autor

Fig. 4. Gráfica comparativa de concentración residual de metales pesados- Ácido fosfórico.



Fuente: **El autor**

CONCLUSIONES

- La electrorremediación tiene un gran potencial para descontaminar diversos tipos de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos en un amplio rango de concentraciones. En la presente investigación teórica y de laboratorio se han trabajado con tres de los factores involucrados (distancia entre electrodos, tiempo de remediación y tipo de electrolito) obteniéndose buenos resultados, que permiten deducir que la electrorremediación es una técnica alternativa con gran eficiencia en la recuperación de suelos.
- Para la aplicación de la técnica de electrorremediación se construyó un equipo modelo basado en el principio de electrólisis y factores involucrados en el proceso. Considerando los resultados de remediación el equipo tiene una eficiencia entre 82,49% a 99,9%.
- Las condiciones de muestreo, preparación y análisis iniciales permitieron controlar factores externos que influyen en los resultados del proceso. Las muestras del sector "El Pache", cantón Portovelo, provincia de El Oro al sur del Ecuador, sector minero por tradición; fueron las seleccionadas para la investigación por sus altas concentraciones en metales pesados y su grado de perturbación.
- Los resultados obtenidos muestran que la técnica de electrorremediación de suelos es un procedimiento que puede ser utilizado de manera efectiva, para el tratamiento de suelos contaminados con metales. En nuestro caso en particular la remediación fue exitosa, para el tratamiento de muestras de suelo real con un alto contenido de plomo (8780ppm), arsénico (18956 ppm) y zinc (10727 ppm) correspondientes a la muestra 39.

- Las pruebas de extracción de plomo, arsénico y zinc del suelo muestran que el proceso se ve afectado por diversas variables como son: la distancia entre electrodos, tiempo de remediación y tipo de electrolito. Los resultados muestran que se puede realizar el proceso de electrorremediación combinando tres factores frente a la cantidad remediada en plomo, arsénico y zinc. En los tres casos se logran porcentajes de extracción considerables, lográndose porcentajes de 99,9% para el plomo y arsénico y de 82,49% para el zinc.
- Al realizar la humectación con electrolitos ácidos se mantuvo el pH de las muestras que eran ácidas, esto logro que los resultados dieran efectividad en la técnica permitiendo mantener los contaminantes en solución lo cual facilita el proceso de electromigración de los metales.
- La validación de los resultados se la realizó por medio de un análisis estadístico para determinar la mejor combinación de factores a trabajar frente a la cantidad remediada del metal. El ADEVA para los tres metales (plomo, arsénico y zinc) nos indica una diferencia significativa con las interacciones(AxB, AxC y BxC) que indica los factores; distancia entre electrodos y tipo de electrolito, la prueba de Tukey determina el mejor tratamiento con las condiciones de trabajo entre 10-15 cm de distancia con 24 horas y ácido fosfórico que corresponde al tratamiento T12 para el plomo y zinc y T8 el arsénico
- La contaminación del suelo producido por el plomo, arsénico y zinc, es muy severo por lo que debe considerarse como riesgoso para la salud de las personas que habitan el sector.
- Los parámetros de máximo contenido de metales pesados en el suelo se los analizó en forma comparativa uno a uno con los tratamientos llegando a determinar que con el zinc se presentaron valores que no está dentro de los parámetros de la norma, esto debido a varios factores como pH y especialmente a los compuestos ligados al zinc, que impidieron extraer mayor cantidad de metal. El plomo y arsénico se encuentran dentro de los valores permitidos.
- El pH cuando se encuentra entre 2 a 4 es una característica importante del suelo, que permite una mayor disgregación de los compuestos que forma parte el metal pesado, así como la facilidad en la movilidad de metales.

BIBLIOGRAFIA

1. Abad Vásquez Guido H., (2008), Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos, tesis de Gestión Ambiental, Ecuador
2. Acar Y.B. y Alshwabkeh A.N. (1993). Principles of electrokinetic remediation. Environ. Sci. Technol. 27, 2638-2647.
3. Alloway, B.J. (1995b). Chapter2: Soil process and the behavior of the heavy metals. Heavy metals in soils. 2nd ed. Blackie Academic and Professional. London, UK.
4. Álvarez, J.M., Novillo, J., Obrador, A. and López-Valdivia, L.M. (2001), Mobility and leachability of zinc in two soils treated with six organic zinc complexes. J. Agric. Food Chem. 49:3833-3840.
5. Barrow, N.J. (1993). Mechanisms of reaction of zinc with soil and soil components. Chap 2. p. 15-32. In Zinc in soils and plants. Robson, A.D. (ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
6. Bowen, J.E. (1969). Absorption of copper, zinc and manganese by sugar cane tissue. Plant Physiol. 44:255-261.
7. Brown, G.E. (Jr.), Foster, A.L. and Ostergren, J.D., (1999). Mineral surfaces and Bioavailability of Heavy Metals: A Molecular-scale Perspective. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 96: 3388-3395.

8. Carrión Coronel Eduardo Fernando, (2010), Proyecto de Máster Oficial en Ingeniería Geológica Aplicada a la Obra Civil, "Evaluación del contenido y variabilidad espacial de metales pesados en suelo superficial con residuos de relaves de plantas de procesamiento mineral a lo largo del sector "El Pache", distrito minero "Portovelo-Zaruma" (Ecuador), Universidad de Granada, España.
9. Coeuret F., Costa López J. (1992), *Introducción a la ingeniería electroquímica*.. Ed. Reverté, S.A. España. 313 pág.
10. David A. De la Rosa-Pérez, Ma. Maura Margarita Teutli-León y Marta E. Ramírez-Islas, (2007), *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*, Puebla México.
11. Doménech, Xavier, (1995), "Química del suelo. El impacto de los contaminantes" Miraguano Ed. Madrid.
12. Ergas Sarina Juana, (2000), *Principios de Biorrecuperación*, Ewis editorial M. Graw. Hill, primera edición.
13. FAO-PNUMA. (1983). *Directrices para el control de la degradación de suelos*. Roma.
14. Fergusson, J.F., (1990). *The heavy Elements. Chemistry, Enviromental Impact and Health Effects*. Pergamon Press.
15. González B. Germán, (1985), *Métodos Estadísticos y Principios de Diseño Experimental*, 2da. Edición, Ecuador
16. Harte, J., C.Holden, R.Scheneider, C.Shirey, (1991). *Toxics A to Z. A guide to everyday pollution hazards*. Univ. of California Press.
17. Helmut A.(1999), *Documento de Cátedra. Asignatura: Procesos y obras para descontaminación de suelos. Maestría en Ing. Ambiental. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. Diez pág.*
18. Krauskopf, K.B. & Bird, D.K. (1995). *Introduction to Geochemistry*. MacGraw-Hill, NY, 647 pp.
19. Labrega A., (1996), *Gestión de Residuos Tóxicos, Tratamientos, Eliminación y Recuperación de Suelos*, editorial M. Graw. Hill.
20. López S., Ayala L. F. (1995) *Contaminación y Depuración de Suelos*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid.
21. Matéu Jorge e Ignacio Morell, (2003), *Geoestadística y Modelos Matemáticos en Hidrogeología*, editorial Universitat Jaume USA
22. *Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados Libro VI Anexo 2*
23. Pazos M., Sanroman M.A. y Cameselle C. (2006). *Improvement in electrokinetic remediation of heavy metal spiked kaolin with the polarity exchange technique*. *Chemosphere* 62, 817-822.
24. Porta, J., López-Acebedo, M., Roquero, C. (1999), "Edafología para la agricultura y el medio ambiente" Ed. Mundi-Prensa. Bilbao.
25. *Reglamento sustitutivo al reglamento ambiental para las operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador, (2003), Ecuador*
26. Scheiner, B.J., Doyle, F.M. & Kawatra, S.K. (Eds.). (1989). *Biotechnology in Minerals and Metal processing*. Society of Mining EGINEERS Inc., Littleton (CO), 209 pp.
27. Sebastián Peña Beatriz (2007), *Quelatos de Zinc Aplicados A Suelos En Un Cultivo De Lino (Linum Usitatissimum L.) Textil Tesis Doctoral Madrid Universidad Politécnica De Madrid,*
28. Seoaneg Mariano, (1999), *Contaminación de Suelos Estudios, Tratamiento y Gestión*, editorial Mundi-Prensa. Page, M.M., and Page, C.L. 2002. *Electrorremediación of contaminated soils*. *Journal of Environment Engineering*, 128: 208-219.

29. Seoáñez Calvo, Mariano. (1998), "Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión". Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
30. Smith, L. A., Means, J. L., Chen, A., Alleman, B., Chapma, C. C., Tixier Jr., J. S., Brauning, S. E., Gavaskar, A. R., and Royer, M. D. 1995. Remedial Option for Metals-Contaminated Sites. Lewis, Boca Ratón, FL.
31. UNE 77305. (1999). Calidad del suelo. Determinación del pH.
32. UNE 77335. (2003) Calidad del suelo. Determinación del potencial redox.
33. Virkutyte J., Sillanpää M. y Latostenmaa P. (2002). Electrokinetic soil remediation Critical overview. The Sci. Tot. Environ. 289, 97-121