

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería



*Descontaminación Electrocinética de Suelo Contaminado con  
Plomo.*

Asesores: Dra. Mercedes Teresita Oropeza Guzmán

Biól. María Del Socorro Chong Silva

Dr. José Guillermo Rodríguez Ventura

Alumna: Sumbarda Ramos Emigdia Guadalupe

Licenciatura en: Químico Industrial

Tijuana Baja California Junio de 2007

**Universidad Autónoma de Baja California  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
E INGENIERÍA**

FOLIO No. **235**

Tijuana, B.C.

C. EMIGDIA GUADALUPE SUMBARDA RAMOS

01 DE JUNIO DE 2007

Pasante de QUÍMICO INDUSTRIAL

Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su exámen profesional, en la

Opción TESIS

es propuesto, por el C. DR. JOSÉ GUILLERMO RODRÍGUEZ VENTURA Y DRA. MERCEDES T. OROPEZA GUZMÁN  
quien será el responsable de la calidad de trabajo que usted presente, referido al tema

**DESCONTAMINACIÓN ELECTROKINÉTICA DE SUELO CONTAMINADO  
CON PLOMO**

el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:


- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- ANTECEDENTES
- III.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
- IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- V.- CONCLUSIONES
- VI.- REFERENCIAS


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



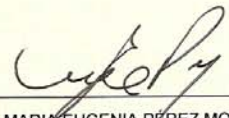
FACULTAD DE CIENCIAS  
QUÍMICAS E INGENIERÍA

  
DRA. MERCEDES T. OROPEZA GUZMÁN

  
M.C. RUBÉN GUILLERMO SEPÚLVEDA  
MARQUÉS  
Sub-Director Secretario

  
DR. JOSÉ GUILLERMO RODRÍGUEZ VENTURA

Asesor

  
MC. MARIA EUGENIA PÉREZ MORALES

Directora

# Descontaminación Electrocinética de Suelo Contaminado con Plomo.

<b>I. Introducción.....</b>	<b>1</b>
Toxicidad de Plomo.	
Aportación del Proyecto.	
<b>II. Antecedentes.....</b>	<b>10</b>
Qué se ha hecho con Electrocinética.	
Factores importantes que afectan el proceso de Electrocinética.	
Planteamiento del objetivo.	
Esquema de muestreo.	
<b>III. Metodología Experimental.....</b>	<b>19</b>
Características del suelo.	
Restauración del suelo.	
<b>IV. Resultados y Discusión.....</b>	<b>37</b>
Caracterización del suelo.	
Restauración del suelo.	
<b>V. Conclusiones.....</b>	<b>61</b>

**VI. Referencias.....63**

**VII. Anexo I.**

**Índice de Tablas, Imágenes y Gráficos.....65**

## **I. Introducción.**

### **Información sobre la empresa Metales y Derivados, S.A. de C.V. y sus operaciones**

La empresa denominada Metales y Derivados de México, S.A. de C.V. se constituyó el 21 de marzo de 1972, bajo el régimen de maquila, en la compra, venta, importación y exportación de todo tipo de metales no ferrosos, aleaciones y sus derivados, así como la fabricación de artículos con base en esos productos. La empresa matriz estadounidense es una empresa de comercio de metales al por mayor con sede en San Diego, California, llamada New Frontier Trading Corporation.

Metales y Derivados comenzó sus operaciones en Avenida Internacional núm. 130-1 en la zona conocida como Centro Industrial Los Pinos, en Tijuana, Baja California. En julio de 1986, la empresa se mudó a Ciudad Industrial Nueva Tijuana, lugar conocido también como Parque Industrial Mesa de Otay, donde funcionó hasta el momento de su clausura en 1994. Ese sitio se ubica a aproximadamente 135 metros (150 yardas) de uno de los bordes de la Mesa de Otay, en el siguiente domicilio: Calle 2 Oriente núm. 119, Ciudad Industrial Nueva Tijuana, Tijuana, Baja California, México. En cuanto al uso de suelo, la zona está clasificada como industrial ligera.

En cuanto a las actividades de la empresa, según lo registrado por las autoridades ambientales en diversas actas de inspección, Metales y Derivados contaba con dos procesos: producción de plomo refinado y producción de granalla de cobre fosfórico. Empleaba como materia prima tierras de plomo,

forros de cable telefónico, óxido de plomo, baterías gastadas automotrices e industriales (cuyo corte se realizaba en forma manual mediante hacha) y otros tipos de chatarra de plomo. En febrero de 1993 se reporta que la empresa utilizaba los lodos y los polvos de “las casas de bolsas” (en adelante, “colectores de polvo tipo bolsa”) como materia prima para los hornos giratorios. La empresa se consideraba una empresa altamente riesgosa porque reportaba el manejo de 1,850 kilos de fósforo rojo.

Según registros de junio de 1989, la empresa contaba en esa fecha con dos hornos de fundición de plomo, dos crisoles para el refinado de plomo y dos hornos para fundición de cobre. Los hornos de fundición de plomo estaban equipados con colectores de polvo tipo bolsa de 13,000 pies cúbicos de volumen filtrable y 5,000 pulgadas cuadradas de superficie filtrable. Los crisoles de refinado de plomo carecían de sistema de control de emisiones. Los hornos funcionaban con combustóleo y diesel. Las actas de inspección reflejan que en marzo de 1991 la empresa contaba con dos colectores de polvo tipo bolsa para controlar las emisiones de tres hornos rotatorios con capacidad para fundir respectivamente, 12,000, 2,200 y 2,200 libras/día y dos crisoles con capacidad de fundir respectivamente 60,000 y 25,000 libras/día. La temperatura de operación de los hornos era de aproximadamente 1,000 °C y la de los crisoles era de 450 °C. La autoridad ambiental detectó en la empresa tres descargas de aguas residuales: una de los sanitarios al drenaje de la zona industrial, y dos que se esparcían o encharcaban en los patios, provenientes del proceso de neutralización de ácidos recuperados del proceso de corte de acumuladores eléctricos y del lavado de patios y del almacén de materia prima que se encuentra a la intemperie. Para noviembre de 1991 la empresa había instalado

un sistema de tratamiento de aguas (mediante neutralización, floculación, sedimentación y filtración).

Según las actas de inspección de la autoridad ambiental, en 1993 la empresa contaba con tres hornos giratorios para la fusión de plomo, de los que operaba sólo uno, con una campana de extracción para los gases de combustión. La alimentación de los hornos giratorios se realizaba de forma manual, mediante pala. La empresa generaba residuos peligrosos sin manejarlos de manera adecuada, principalmente escoria de plomo, escoria de cobre, envases usados de arsénico, fósforo y ácido fosfórico, cajas de plástico de baterías, lodos con metales pesados y aceite residual de montacargas.

El almacenamiento de los residuos peligrosos se llevaba a cabo, primero a cielo abierto en el patio posterior de la planta según inspección del 28 de junio de 1989, y más adelante, según inspección de febrero de 1993, en un área cerrada, en una área abierta techada, en patios en un casillero, y directamente en el suelo en el terreno aledaño. Según la US EPA, “en 1992, la oficina del Fiscal de Distrito del Condado de Los Angeles inició un proceso por 26 cargos contra José Kahn y New Frontier Trading Corporation, por el transporte ilegal de residuos peligrosos a través del Condado de Los Angeles. El fundamento de los cargos parece haber sido que según Kahn los residuos que se transportaban estaban exentos de cumplir con los reglamentos sobre residuos peligrosos porque estaban destinados a ser reciclados, en este caso en México. La ley estadounidense y de California exceptúan a los residuos peligrosos que vayan a ser reciclados de muchos de los requisitos aplicables al manejo de residuos peligrosos. No obstante, la oficina del Fiscal de Distrito arguyó que las exenciones no eran aplicables porque Metales y Derivados no era una operación

de reciclaje legítima. En 1993, Kahn aceptó dos de los 26 cargos, y acordó pagar una multa de 50,000 dólares. Supuestamente, también consintió en la restauración del sitio de Metales y Derivados, aunque esto no fue parte del acuerdo formal”.<sup>1</sup>

En 1994, la Profepa ordenó la clausura definitiva de Metales y Derivados. Ante la clausura, el propietario abandonó la empresa. Mediante laudo arbitral del 16 de noviembre de 1994, los bienes muebles susceptibles de comercialización de Metales y Derivados se adjudicaron a los trabajadores de la empresa. En enero de 1995 se retiró del sitio un material explosivo (fósforo rojo) allí abandonado. Las instalaciones abandonadas por Metales y Derivados pueden describirse actualmente como sigue:

El predio [de Metales y Derivados] está rodeado por instalaciones industriales o de servicio. La Calle 2 oriente representa la colindancia norte del predio, mientras que al oeste se encuentra un callejón que colinda con un taller mecánico propiedad del Ayuntamiento de Tijuana. Al este del terreno baldío [propiedad de Metales y Derivados] se encuentra una nave industrial y al Sur el predio colinda con terrenos baldíos. Éstos tienen una extensión aproximada de 112 metros hacia el sur, terminando en una pendiente con un cambio de elevación aproximado de 45 metros hasta llegar a la zona habitacional del Ejido Chilpancingo.

El predio es un terreno rectangular de aproximadamente 157.5 metros de frente por 91.5 metros de fondo que está dividido entre la planta de producción al lado oeste (60m x 91.5 m) y un predio baldío de 97.5m por 91.5m al lado oriente que contiene materiales de desecho y montículos de residuos. La planta

---

<sup>1</sup> Información proporcionada en noviembre de 2000 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, US EPA.

está bardada en dos lados y cercada con malla ciclónica al frente y al lado oriente. El predio baldío comparte la cerca a su lado oeste con la planta y está cercado al frente que colinda con la Calle 2 Oriente. El lado sur no está cercado, mientras que del lado oriente la colindancia es una barda del predio adyacente. En la planta de producción existen varias estructuras metálicas sobre piso de concreto, así como algunas áreas con suelo raso. Se encuentran las instalaciones abandonadas de los hornos de fundición de metales, así como un área bajo techo donde se encuentran almacenadas pacas de escoria. Al lado sur hay un cajón de residuos construido de piedra y cemento que contiene montículos de suelo que fueron cubiertos con plástico. En el extremo suroeste se encuentra una fosa revestida de concreto que supuestamente se utilizó para verter soluciones ácidas de los acumuladores.<sup>2</sup>

El sitio no está asegurado de manera que se impida la entrada a cualquier persona. Los residuos peligrosos depositados en el sitio no están protegidos de manera que se impida la exposición a ellos mediante su dispersión o en forma directa. En la parte posterior (sur) del predio Profepa colocó un letrero de advertencia amarillo que dice “Peligro, Residuos Peligrosos” y mide aproximadamente un metro de largo por 60 cm de ancho. En las bardas de concreto al oeste y sur del sitio hay leyendas con advertencias sobre la toxicidad del sitio pintadas, según la Coalición de Salud Ambiental, por esa misma organización y un grupo de mujeres residentes de la colonia Chilpancingo.

---

<sup>2</sup> Estudio de Caracterización de Sitio en Metales y Derivados de México, S.A. de C.V., en Tijuana, Baja California, México. Preparado por Levine-Fricke de México, S.A. de C.V., para la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, 9 de marzo de 2001.

## **Toxicidad de Plomo.**

A diferencia de otros contaminantes ambientales, los metales son elementos químicos que el hombre no crea ni destruye. El papel que el hombre desempeña en la presencia ambiental de metales es, por una parte, introducir en el medio ambiente estos elementos como consecuencia de las diferentes actividades humanas y, por otra, alterar la forma química o bioquímica en que se encuentran.

Los metales están sujetos de forma natural a ciclos biogeoquímicos que determinan su presencia y concentración en los compartimientos ambientales: suelos, aguas subterráneas y superficiales, aire y seres vivos. La intervención humana puede modificar considerablemente la concentración de metales en estos compartimientos y facilitar su distribución a partir de las reservas minerales en las que los metales se encuentran naturalmente confinados.

Desde el punto de vista toxicológico, los metales suelen presentar una acusada multiplicidad de efectos tóxicos. La especie química concreta del metal influye poderosamente en sus efectos tóxicos, así como en las variables toxicocinéticas de absorción, distribución y excreción.

La trascendencia toxicológica de los metales es enorme, teniendo en cuenta su ubicuidad, la extensión de sus usos industriales y domésticos y su persistencia medioambiental, resultado directo de su condición de elementos químicos. Esta persistencia, sin embargo, tiene que valorarse a la luz de las características del compuesto químico del que el metal forme parte, que determinan su movilidad ambiental y su biodisponibilidad.

**Tabla 1. CARACTERISTICAS DEL LIXIVIADO (PECT) QUE HACEN PELIGROSO A UN RESIDUO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE**

No. de INE	Constituyentes Inorgánicos	Concentración máxima permitida (mg/ml)
C.1.01	Arsénico	5.0
C.1.02	Bario	100.0
C.1.03	Cadmio	1.0
C.1.04	Cromo Hexavalente	5.0
C.1.05	Níquel	5.0
C.1.06	Mercurio	0.2
C.1.08	Plata	5.0
C.1.09	Plomo	5.0
C.1.10	Selenio	1.0

**Tabla 2. Clasificación de residuos de plomo de acuerdo a la NOM-052.**

NO. DE GIRO	INDUSTRIAL Y PROCESO	CLAVE CRETIB	RESIDUO PELIGROSO	NO.
2,1	FUNDICION DE PLOMO			
		PRIMARIA	(T) LODOS Y POLVOS DEL CONTROL DE EMISIONES DEL AFINADO	RP2,1/01
		(T) LODOS PROVENIENTES DE LA LAGUNA DE EVAPORACION	RP2,1/02	
		(T) SOLUCION RESIDUAL DEL LAVADOR DE GASES QUE PROVIENE DEL PROCESO DEL AFINADO	RP2,1/03	
	SECUNDARIO	(T) LODOS Y POLVOS DEL EQUIPO DE CONTROL DE EMISIONES DEL AFINADO	PR2,2/01	
		(T) ESCORIAS PROVENIENTES DEL HORNO	RP2,2/02	
		(T) LODOS PROVENIENTES DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	RP2,2/03	
		(T) LODOS PROVENIENTES DEL LAVADOR DE GASES QUE PROVIENEN DEL PROCESO DE AFINADO	RP2,2/04	

Tabla 3. Concentraciones de referencia totales (CR <sub>T</sub> ) por tipo de uso de suelo		
Contaminante	Uso agrícola/ residencial (mg/kg)	Uso Industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1600	20000
Plomo	400	750
Selenio	390	5100
Talio	5,2	67
Vanadio	550	7200

**NOTA:**

a. En caso de que se presenten diversos usos del suelo en un sitio, debe considerarse el uso que predomine.

b. Cuando en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano no estén establecidos los usos de suelo, se usará el valor residencial.

c. La norma no aplica a los tramos delimitados por los derechos de vía.

Tabla 4. Concentraciones de referencia de contaminantes solubles (CR <sub>s</sub> )	
Contaminante	Concentración (mg/L)
Arsénico	0,500
Berilio	0,075
Cadmio	0,100
Mercurio	0,020
Níquel	0,500
Plomo	0,500
Selenio	0,100
Talio	0,192
Vanadio	0,371

<b>Tabla 5. Concentraciones de referencia de dispersión eólica totales solubles (CD<sub>T</sub>)</b>	
<b>Contaminante</b>	<b>Concentración (mg/Kg)</b>
Arsénico	960
Berilio	320
Cadmio	112
Cromo VI	510
Mercurio	528
Níquel	4000
Plomo	5600
Selenio	80
Talio	80
Vanadio	10400

### **Aportación del Proyecto.**

Es necesario contrarrestar la problemática ambiental provocada por el mal manejo de residuos para evitar que se propague el efecto tóxico del plomo en niños de Tijuana. Urge una restauración del suelo contaminado para reciclar el predio y darle nuevamente utilidad. Durante este proyecto se realizará un diagnóstico del sitio caracterizando las muestras obtenidas del predio Metales y Derivados, con la posterior evaluación del tratamiento electrocinético de suelo a escala laboratorio.

## II. Antecedentes.

### Estudios del proceso electrocinético

Los primeros modelos del método se seguían las investigaciones de Casagrande (1945) asumiendo como único proceso de transporte relevante la Electroósmosis. Este proceder resultó obsoleto al momento de predecir el movimiento iónico de especies en la solución acuosa de los poros, la cual depende principalmente de la Electromigración y otros efectos de electrolisis, incluyendo difusión, adsorción, formación de complejos y reacciones de precipitación.

Mitchell y Young (1990-1993) introducen en sus métodos la teoría unidimensional que considera todos los procesos conocidos de transporte, pero no consideran las reacciones químicas. Yeung y Dalta (1995) realizaron adaptaciones al modelo para incluir los cambios de pH y las reacciones de adsorción. Shapiro y Probstein (1993) incluyen en su modelo la variación de equilibrio químico considerando el efecto del pH y las reacciones de adsorción. Jacobs (1994) incluye en su modelo reacciones de precipitación formación de complejos y disolución para .. la remoción de  $Zn^{+2}$  en kaolín. Alshawabkeh y Acar (1996) en su modelo consideran factores similares para la remoción de  $Pb^{+2}$  en kaolinita. Shapiro y Probstein (1993), Eykholt y Daniel (1994), Menon (1996) incorporan en su formulación el potencial Zeta, fuerza de campo, y/o pH como factores contribuyente a la Electroósmosis. Baraud (1997,1998) regula estas contribuciones en su modelo por medio de la amortiguación (buffer). Jacobs y probstein (1996) introducen un modelo bidimensional que incluye la geometría de los electrodos y las reacciones ácido-base del contaminante.

## Factores importantes que afectan la Electro-remediación.

- **Composición electrolítica y pH.**

La composición electrolítica cambia cuando ocurre la remoción de sustancias disueltas en la muestra de suelo, se depositan en la solución anódica o catódica, depositándose en el cátodo como ocurre con iones metálicos, o por la formación de sales depositadas en el ánodo. Bajo condiciones de migración obstruida de iones en el suelo cambia el pH de la solución porosa, con el tiempo la acidez se incrementa en el ánodo y la alcalinidad en el cátodo. El efecto del pH sobre los minerales y otros componentes del suelo es la posible disolución de estos, por el cambio en la composición de la solución porosa. Como resultado del incremento en acidez del suelo, se observa un aumento en la concentración de ciertos iones como Mg, Al y Fe, con el incremento de alcalinidad Si y Al.

Un frente ácido atraviesa la muestra de suelo desde el ánodo hasta el cátodo, y un frente alcalino se mueve del cátodo al ánodo. El frente ácido atraviesa con mayor rapidez que el alcalino, debido a que la movilidad del  $H^+$  excede a la de  $OH^-$  y la dirección del flujo electroosmótico generalmente se dirige hacia el cátodo. Al paso del tiempo el suelo se acidifica en la mayor parte de su volumen, excepto cerca del cátodo. Excepciones ocurren cuando el suelo posee una alta capacidad amortiguadora o es muy alcalino, también cuando se utilizan ánodos reactivos como los de Fe, promoviendo la formación de  $Fe^{2+}$ . En el punto donde chocan el frente ácido y el alcalino se forma agua, resultando en un cambio de pH que afecta la solubilidad de los contaminantes y su adsorción al suelo.

Para ciertos metales, la estabilidad de sus diferentes iones varia con el pH. Cationes metálicos son estables en condiciones ácidas y oxi-aniones en condiciones alcalinas. En el punto donde cambia repentinamente el pH, la solubilidad de iones metálicos baja al valor mínimo precipitando como hidróxidos metálicos. Se ha observado para metales pesados como Pb, Cu y Cd. La posición de esta precipitación depende de la naturaleza del contaminante y otras especies presentes en la solución porosa, tipo de suelo y condiciones del proceso. El éxito en la remediación depende en mantener la solubilidad del ion metálico, ya sea con un alto o bajo pH, y evitando las condiciones que resulten en precipitación.

#### • **Química del Suelo.**

Se han realizado intentos por demostrar la influencia de la química de suelo para su electro remediación, tales como contenido de materia orgánica, óxidos de hierro, o ambos. Dentro de las características del suelo que influyen la cinética para la remoción de contaminantes se incluye adsorción, intercambio iónico, capacidad de amortiguación. La interacción de contaminantes en el suelo es muy alta en los de textura fina.

Contaminantes iónicos deben ser desorbidos antes de ser removidos, la descontaminación es más rápida en concentraciones por encima de la CIC del suelo. Suelos que poseen alta CIC y adsorben fuertemente como bentonita, presentan mayor dificultad para decontaminarse que suelos arcillosos que poseen baja CIC. Esto se correlaciona con el hecho de que suelos como bentonita tiene bajo flujo electro osmótico, mientras que en kaolín es alto.

Cambios en el pH afectan la adsorción en el suelo, los iones  $H^+$  producto de la electrolisis del agua, son eficaces para desorción de cationes metálicos conforme atraviesa el frente ácido el suelo. De igual modo, iones  $OH^-$  producen en el cátodo ayuda la desorción de aniones, tales como  $CrO_4^{2-}$  y hay evidencia de que también ayuda en la desorción de ciertas moléculas orgánicas. La disponibilidad de iones  $H^+$  y  $OH^-$  en la solución porosa es determinada por la capacidad amortiguadora del suelo. La mayoría del trabajo experimental se ha realizado en muestras de kaolín puro, el cual posee una baja capacidad amortiguadora comparada con muestras naturales que contienen óxidos metálicos y carbonatos. Se han descrito problemas durante la remediación de un sitio real (Lageman 1989).

- **Contenido de Humedad.**

La extensa saturación del suelo es otro factor que altera el flujo electro osmótico y por lo tanto la recontaminación del suelo. Distribuciones desiguales en la textura del suelo se pueden presentar durante la remediación asociadas con el desarrollo de presión negativa en los poros. Esto como resultado de flujos desiguales a causa de variaciones de pH, por lo tanto también de fuerza de campo eléctrico y de potencial zeta. Otra causa de la desecación del suelo durante la remediación es el calor producido por efecto de la corriente eléctrica. La desecación del suelo puede provocar problemas, sobre todo en muestras a grande escala y pruebas de campo. Los efectos son más severos en suelos insaturados pero ocurre incluso en suelo que inicialmente son saturados. Algunos de los efectos de la desecación son compactación y agrietamiento del suelo, generando patrones de flujo desigual y el cese eventual del flujo.

- **Estructura de Suelo.**

Otras alteraciones pueden ocurrir al suelo durante la electro remediación, obstrucción de los poros y el cese eventual del flujo pueden resultar de la deposición en el suelo de componentes tales como hidróxidos metálicos que se forman por la reacción entre iones  $\text{OH}^-$  cercanos al cátodo y metales pesados contaminantes. Estos compuestos pueden ser también el resultado de la reacción de iones  $\text{OH}^-$  con  $\text{Al}^{3+}$  introducidos en el suelo por ánodos de aluminio,  $\text{Al}^{3+}$  proveniente de los minerales propios del suelo que se disuelve por las condiciones ácidas del suelo, o por iones  $\text{Fe}^{2+}$  por ánodos de Fe. Para la remediación de suelos contaminados con metales, es necesario prevenir la precipitación de compuestos metálicos insolubles en el suelo.

En contraste con los efectos anteriores, se ha observado un aumento en el flujo como consecuencia de un aumento en la permeabilidad hidráulica del suelo.

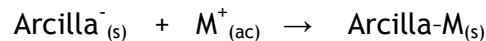
### **Propiedades del Suelo.**

El pH del suelo y su Capacidad de Intercambio Iónico (C.I.I.) son dos propiedades íntimamente relacionadas entre sí, su influencia se observa en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La presencia de contaminantes afecta estas propiedades del suelo.

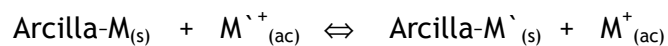
- **Capacidad de Intercambio Iónico.**

La Capacidad de Intercambio Iónico de un suelo representa su habilidad para retener e intercambiar iones.

Los suelos arcillosos poseen un área superficial grande por lo tanto son buenos intercambiadores iónicos. Como se explicó anteriormente, los suelos arcillosos que contiene aluminio son permanentemente aniónicos por su carga superficial, son capaces de retener cationes hidratados  $M^+$  en su superficie:



Estos cationes pueden ser reemplazados por diferentes iones presentes en la solución del suelo en un proceso llamado Intercambio Catiónico:



Esta propiedad de Intercambio Catiónico es permanente como resultado del Intercambio Iónico en el mineral. La Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.) de un mineral arcilloso se mide como el número de moles de cargas positivas intercambiables contenidas en un Kg de mineral.

La superficie de una arcilla esta compuesta por capas de óxidos e hidróxidos. A valores altos de pH el grupo Hidroxilo pierde protones, ó estos protones son sustituidos por iones metálicos:



De modo similar actúan los ácidos orgánicos, como intercambiadores de cationes en el suelo.

Las arcillas también poseen Capacidad de Intercambio Iónico:



- pH.

El pH de un suelo mide su grado de acidez o alcalinidad. Se define como el logaritmo negativo de la concentración del ión Hidrógeno:

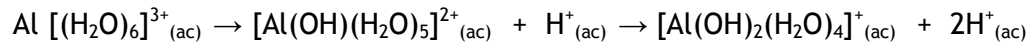
$$\text{pH} = -\log_{10} [ \text{H}^{+}_{(ac)} ]$$

El pH de un suelo representa un factor muy importante para el crecimiento de una planta, se considera normal valores en el intervalo de 3-9. Cantidades grandes de humus en el suelo inducen la acidez, debido a que el humus contiene una alta proporción de ácidos carboxílicos. Eso puede ser balanceado si se presenta una alta concentración de cationes básicos. Un pH en el suelo cercano a 7 se asocia con grandes cantidades de Calcio intercambiable.

En el suelo la acidez también se puede inducir por la presencia de cantidades significativas de aluminio en solución. Esto generalmente proviene del resultado del intemperizado de rocas y arcillas. Un pH bajo genera este proceso de intemperizado:



Debido a que el ion aluminio posee una alta densidad electrónica se acompleja con el agua, regenerando a la vez iones hidrógeno:



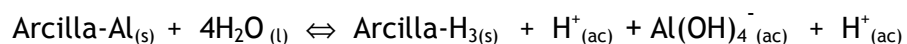
En suelos arcillosos los iones aluminio debido a su alta densidad electrónica se adhieren fuertemente en los sitios de intercambio, estos iones mantienen la acidez local como resultado de la reacción anterior.

Los cationes adsorbidos en la superficie del suelo arcilloso afectan el pH cuando son liberados (desorción).

Por ejemplo, el pH aumenta cuando:

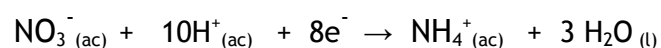


El pH disminuye cuando:



Si un suelo presenta una proporción alta de sus sitios de intercambio catiónico ocupados por iones hidrógeno, no tendrá la capacidad de proporcionar los nutrientes que necesitan las plantas.

En un medio ácido los iones nitrato pueden reducir los iones amonio:



Las plantas solo son capaces de aceptar a los nutrientes en su forma oxidada, por lo cual el aumento de la acidez del suelo disminuye la cantidad de nitrógeno disponible para el crecimiento de la planta. Para conservar el nitrógeno en la forma oxidada, se requiere buena aireación en el suelo para mantener un suministro de oxígeno que no permite que se lleve a cabo la reacción reversible. La acidez en el suelo promueve la solubilidad de metales tóxicos como son el mercurio, cadmio y plomo.

### **Planteamiento del objetivo.**

A partir de la caracterización fisicoquímica de suelo contaminado (proveniente de un sitio clausurado por PROFEPA en Tijuana) hacer la evaluación de un tratamiento electrocinético para eliminar el Plomo.

### III. Metodología Experimental.

#### Muestreo del suelo.

El predio Metales y Derivados fue seccionado en tres partes: área lateral izquierda, derecha y media (que se extienden a lo largo del mismo).



---Fig. 1--- Indica las tres secciones en que se dividió el predio de Metales y derivados para su muestreo.

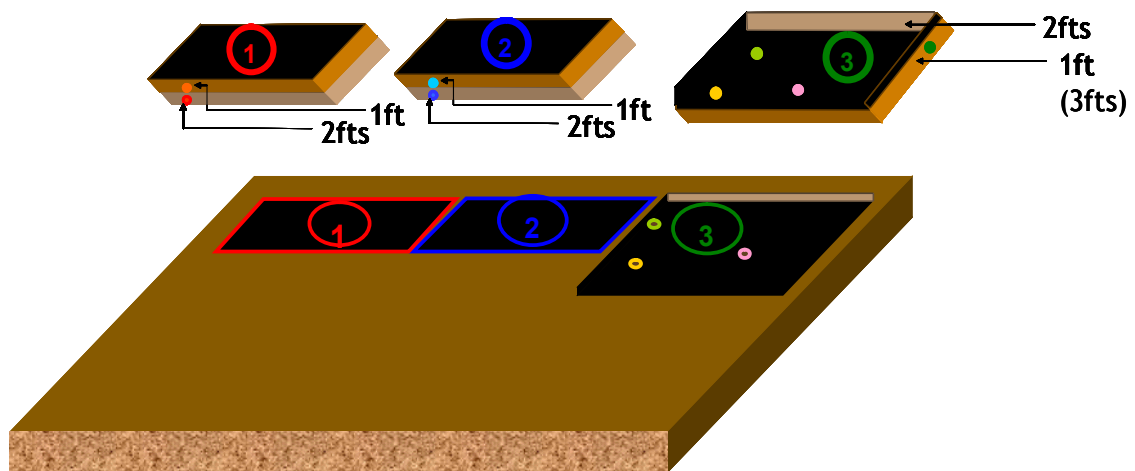
Para obtener muestras representativas se tomaron muestras a diferente profundidad en un mismo punto, esto fue a uno y a dos pies.



---Fig. 2--- Se observa la marca después de introducir el ciclón para tomar una muestra de suelo a profundidad de un pie.

# Metales y Derivados

## Esquema de muestreo:



### Clasificación de muestras de suelo:

A ● 1 Lateral Izquierdo 1ft

C ● 2 Medio 1 ft

E ● 3 Lateral Derecho 1 ft (3fts)

B ● 1 Lateral Izquierdo 2 fts

D ● 2 Medio 2 fts

F ● 3 Superficial

G ● 3 Superficial Café

H ● 3 Superficial Rosa

---Fig. 3--- Clasificación de las muestras tomadas en el predio de Metales y Derivados.



---Fig. 4--- Toma de muestra con equipo de protección adecuada.

## **Caracterización del suelo.**

Previo al montaje de la celda para realizar el experimento de remediación electrocinética de un suelo es necesario el diagnóstico del mismo, así conoceremos las condiciones específicas bajo las cuales se implementará el sistema, optimizando recursos y el proceso de remediación, incluso determinará si es factible o no este tipo de tratamiento para dicha muestra. Algunas de estas características fisicoquímicas importantes son: pH de suelo, C.I.C. (Capacidad de Intercambio Catiónico), potencial REDOX, Conductividad, Tamaño de partícula, Porcentaje de humedad. La metodología realizada para determinarlas se describe enseguida.

### **• pH.**

La determinación del pH del suelo se realizó tomando como referencia el método descrito por Richmond Bartlett, se determina el pH de manera similar a como se determina el de cualquier solución, a excepción de que se utiliza un electrodo específico para medir pH en suelo.

### ***Equipo y material:***

1. Potenciómetro.
2. Electrodo de pH para suelo Cole-Palmer mod. 800-323-4340.
3. Vaso de precipitado 250 mL.
4. Agitador magnético.
5. Mosca.
6. Pizeta.

**Reactivos:**

1. Agua destilada.

**Procedimiento:**

1. Disolver 10g de muestra de suelo en 100 mL de agua destilada.
2. Agitar durante 10 minutos.
3. Medir pH con electrodo específico para pH de suelo introduciendo hasta la punta azul en el suelo, además medir pH de las distintas fases de la solución sobrenadante.



---Fig. 5--- Solución de suelo preparada para medir pH.

## • Porcentaje de Contenido de Humedad.

Esta determinación se realizó de modo similar a lo establecido en la norma **ASTM D 2216-98**.

Este método consiste en determinar la humedad (textura) contenida en una muestra de suelo por diferencia de masa, esto reduciendo la masa por un proceso de desecación.

### ***Equipo y material:***

1. Estufa con regulador de temperatura para mantenerla entre  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
2. Termómetro.
3. Recipiente para contener  $\approx 10$  g de suelo.
4. Desecador.
5. Pinzas para crisol.

### ***Procedimiento:***

1. Tarar recipiente para contener  $\approx 10$  g de suelo.
2. Pesar  $\approx 10$  g de suelo en recipiente.
3. Colocar recipiente en estufa con temperatura regulada a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 hrs.
4. Colocar con las pinzas para crisol el recipiente en un desecador ya templado pesar.
5. Repetir paso 3 y 4 hasta peso constante.

6. Realizar cálculos correspondientes para determinar contenido de humedad con la siguiente fórmula:

$$W = \frac{(W_{xh} - W_{rt}) - (W_{xs} - W_{rt})}{W_{xh}} * 100$$

- **Tamaño de Partícula (Textura).**

Se utilizó **Método ASTM 2487** para la determinación de la textura del suelo.

***Equipo y material:***

1. Balanza.
2. Espátula.
3. Mallas para tamizar (ASTM No.50, No.70, No.120, No.200, No.325).

***Procedimiento:***

1. Pesar 100g de muestra de suelo.
2. Colocar en la malla ASTM No. 50, tapar y asegurar mallas para iniciar el tamizado.
3. Tamizar por 30 min.
4. Calcular porcentaje por tamaño de partícula.
5. Determinar textura comparando con tablas de la norma **ASTM 2487**.



---Fig. 6--- Diferentes texturas del suelo tamizado.

• **C.I.C. (Capacidad de Intercambio Catiónico).**

Para determinar en una muestra de suelo la Capacidad de Intercambio Catiónico se procedió de modo similar a lo indicado en el **Método 9081 de la EPA** el cual es aplicable para la mayoría de los tipos de suelo a diferencia del Método 9080 que no es aplicable para el tipo de suelo de las muestras tomadas en Metales y derivados (arcilla).

***Equipo y material:***

1. Tubos de ensaye.
2. Gradilla.
3. Centrífuga.
4. Espátula.
5. Vial de  $\approx$  40 mL.
6. Vaso de precipitado 100 mL.
7. Matraz volumétrico 100 mL.
8. Matraz volumétrico 1000 mL.
9. Matraz volumétrico 2000 mL.

***Reactivos:***

1. Agua destilada.
2. Acetato de sodio ( $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) para preparar solución 1.0 N de Acetato de sodio.
3. Ácido acético glacial (99.5%).

4. Hidróxido de amonio.
5. Isopropanol 99%.

***Procedimiento:***

1. Colocar 6g de muestra de suelo en un vial.
2. Agregar 33 mL de solución de Acetato de sodio 1.0N en el vial.
3. Agitar durante 5 minutos.
4. Vaciar en tubo de ensaye y centrifugar durante 15 minutos.
5. Decantar parte de solución clara y colocar en un vaso de precipitado.
6. Regresar el suelo precipitado en el tubo de ensaye y depositar en el vial para repetir desde el paso 2 (dos veces más), obteniendo al final un total de solución clara de  $\approx$  90 mL.
7. Después de realizar los tres lavados con Acetato de sodio, regresar el suelo precipitado en el tubo de ensaye y depositarlo en el vial agregar 33 mL de Isopropanol 99% y repetir procedimiento del paso 3 al 5.
8. Repetir lo anterior 1 vez más, para obtener al final un total de solución clara (de color amarilla) de  $\approx$  60 mL.
9. Posterior a los dos lavados con Isopropanol 99% regresar el suelo precipitado en el tubo de ensaye y depositarlo en el vial agregar 33 mL de solución de Acetato de amonio 1.0 N y repetir procedimiento del paso 3 al 5.
10. Repetir lo anterior 2 vez más, obteniendo al final un total de solución clara de  $\approx$  90 mL la cual se traslada a un matraz volumétrico de 100 mL y se afora con solución de Acetato de Amonio 1.0 N.
11. Con los 100 mL de lavado con solución de Acetato de Amonio 1.0 N determinar contenido de Sodio por Absorción Atómica.



--Fig.7-- Lavados Fase 1 ( $\text{NaCH}_3\text{COO}$  1N) para determinar C.I.C.



---Fig.8--- Lavados Fase 2 [ $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$  99%] para determinar C.I.C.



---Fig.9--- Lavados Fase 3 ( $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$  1N) para determinar C.I.C.

## • Contenido de metales Pb y Cu.

Para la determinación de metales en la muestra de suelo se parte de los lavados con solución de Acetato de amonio 1.0N para de igual manera que se determinó Sodio proceder con la determinación de Plomo y Cobre.

**Cu.**

**Método: Absorción Atómica.**

### ***Equipo y material:***

1. Vaso de precipitado 100 mL.
2. Matraz volumétrico 50 mL.
3. Pizeta 250 mL.
4. Equipo de Absorción Atómica de Flama modelo EspectrAA-5 marca Varian.
5. Lámpara de Cátodo Hueco para Cu.

### ***Reactivos:***

1. Agua destilada.
2. Solución estándar de cobre para Absorción Atómica.
3. Acetileno.

### ***Procedimiento:***

1. Preparar soluciones estándar de Cu con las siguientes concentraciones: 15,30 y 60 ppm (50 mL de cada solución).

2. Manejo del equipo de Absorción Atómica modelo EspectrAA-5 marca Varian (Ajustar los parámetros adecuados según el equipo).
  - Colocar lámpara de cátodo hueco de Cu en carrusel.
  - Encender equipo.
  - Ajustar quemador hasta que este alineado con el haz de luz de la lámpara.
  - Ajustar el "slit" en el equipo.
  - Ajustar amperaje óptimo de lámpara en equipo.
  - Encender campana.
  - Ajustar presión de aire y de acetileno.
  - Suministrar aire y acetileno en la proporción adecuada.
  - Encender flama.
  - Tomar lectura a una solución blanco y ajustar hasta lectura de absorción igual a 0.0000.
  - Tomar lectura a las diferentes soluciones estándar, ajustar hasta obtener valores de absorción con tendencia óptima.
  - Tomar lectura a las muestras que se desea analizar.
  - Cerrar suministro de acetileno primero y luego de aire.
  - Apagar el equipo.
  - Apagar la campana.
  - Remover del carrusel la lámpara y guardarla.
3. Tomar lectura de absorción atómica para un blanco así como para cada solución estándar, ajustar hasta obtener una tendencia óptima.
4. Tomar lectura de absorción atómica para la muestra.

**Pb.**

**Método: Voltamperometría OSTERYOUNG.**

***Equipo y material:***

1. Vaso de precipitado 100 mL.
2. Vaso de precipitado 50 mL.
3. Matraz volumétrico 250 mL.
4. Pizeta 250 mL.
5. Micro pipeta para medir 100  $\mu$ L.
6. Micro pipeta para medir 5 mL.
7. Puntas para micro pipeta.
8. Mosca.
9. Estación de trabajo Electroquímica BAS 100B (Bioanalytical System).
10. Celdas.
11. Electrodo de referencia de Ag/AgCl.
12. Electrodo de trabajo de superficie renovable EPC.
13. Contra electrodo de Pt.

***Reactivos:***

1. Agua destilada.
2. Solución estándar de Plomo para Absorción Atómica.
3. Solución de Acetato de Amonio 1.0 N.
4. Nitrógeno (g).

### ***Procedimiento:***

1. Preparar 250 mL de solución estándar de Pb con una concentración de 1000 ppm.
2. Colocar en la celda 5 mL de solución de Acetato de Amonio 1.0 N.
3. Colocar en la celda 100  $\mu$ L de muestra, introducir mosca y tapar celda.
4. Manejo de la Estación de trabajo Electroquímica BAS 100BW.
  - Encender equipo.
  - Abrir y regular presión de tanque de Nitrógeno.
  - Colocar celda que contiene muestra y solución de Acetato de Amonio 1.0 N sobre la parrilla del equipo.
  - Montar celda:
    - Conectar manguera plástica capilar al suministro de Nitrógeno en el equipo BAS 100BW luego introducirla en la celda en el volumen de solución líquida.
    - Conectar manguera plástica capilar al escape de Nitrógeno en el equipo BAS 100B luego introducirla en la celda sobre el volumen de solución líquida evitando que tenga contacto con esta.
    - Conectar contra electrodo a la fuente de corriente del equipo BAS 100BW luego introducirla en la celda en el volumen de solución líquida.
    - Conectar electrodo de referencia a la fuente de corriente del equipo BAS 100BW luego introducirla en la celda en el volumen de solución líquida.

- Conectar electrodo de trabajo a la fuente de corriente del equipo BAS 100BW luego introducirla en la celda en el volumen de solución líquida.
- Suministrar burbujeo de Nitrógeno.
- Trazar las voltamperometrías de redisolución anódica a las muestras que se desea analizar.

## Restauración del suelo.

- **Preparación de soluciones electrolíticas.**

Se requiere preparar 1L de solución de Sulfato de amonio 0.001 M y 1L de solución de Acetato de amonio 0.001 M. Estas soluciones serán para el compartimiento catódico y anódico respectivamente.

- **Preparación de Muestra.**

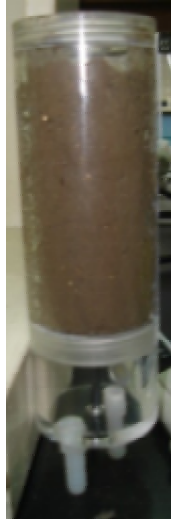
La muestra requiere de una humedad 20-30% por lo cual si la muestra no contiene este porcentaje de humedad se deben realizar los cálculos correspondientes para que cuente con la humedad requerida.



---Fig. 10--- Preparación de la muestra de suelo.

- **Compactación de muestra dentro de celda.**

Si la muestra posee la humedad deseada será mayor la manipulación que se tendrá sobre ella para moldearla e introducirla en la celda.



---Fig. 11--- Muestra de suelo compactada dentro de la celda OSMIC I.

- **Montaje de celda.**



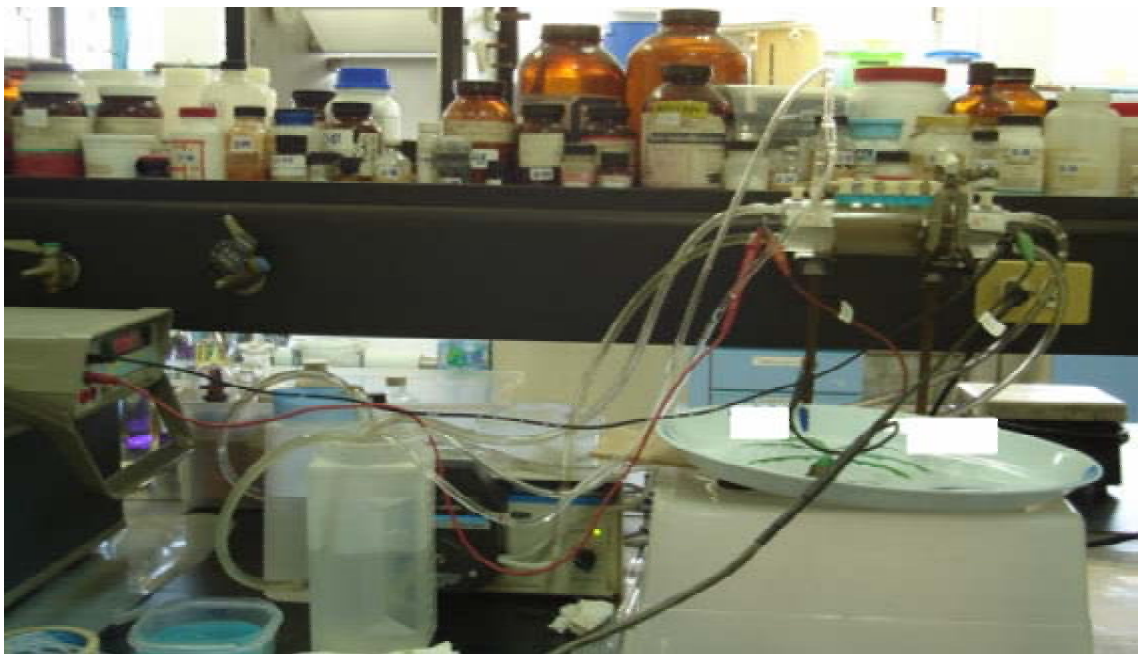
---Fig. 12--- Celda OSMIC I lista para correr tratamiento electrocinética a muestra de suelo.

- **Disposición de residuos.**

Los residuos generados se disponen como sigue: las soluciones electrolíticas que durante el proceso de remediación se recircularon a su contenedor se disponen en una planta para medir el grado de toxicidad que pueden aportar al medio.

El suelo compactado en la celda se rebana cada 2 cm y se almacena en cada sección de suelo en un recipiente, esto para determinar su contenido de metales en un análisis posterior por lixiviados en microondas.

El papel que se utiliza como filtro entre cada compartimiento y la celda se deposita en un contenedor específico para residuos de papel impregnado con suelo contaminado.



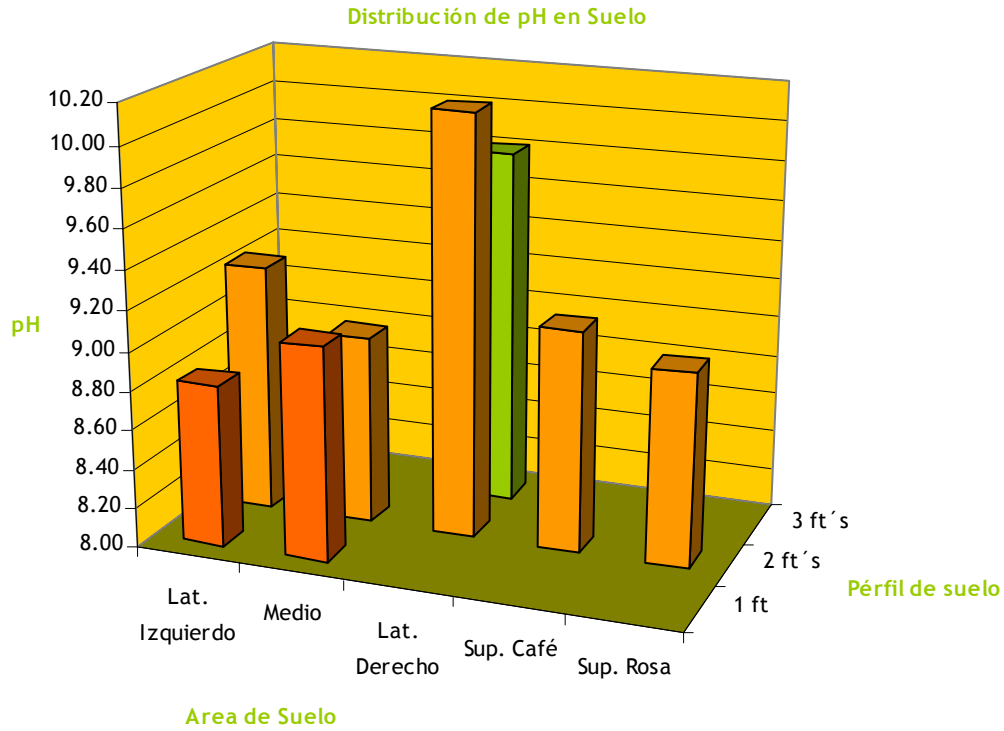
---Fig. 13--- Experimento en muestra de suelo B (1 lateral Izquierdo 2 pies).

#### **IV. Resultados y Discusión.**

En esta sección se presentan las gráficas y tablas correspondientes a los experimentos de caracterización del suelo muestreado en el terreno de Metales y derivados.

- **pH**

El alto valor de pH que presenta el suelo es un indicativo de la presencia de compuestos químicos alcalinos como pueden ser los hidróxidos metálicos. Este parámetro es de gran importancia porque a la hora de someter el suelo a un tratamiento electrocinético será necesario acidificarlo para promover la desorción de especies metálicas. En la gráfica 1 se presentan los resultados en función de la posición de las diferentes muestras en el terreno, de igual manera se reportan las medidas adquiridas con el electrodo de pH para suelos marca COLE-PALMER en la tabla 6.



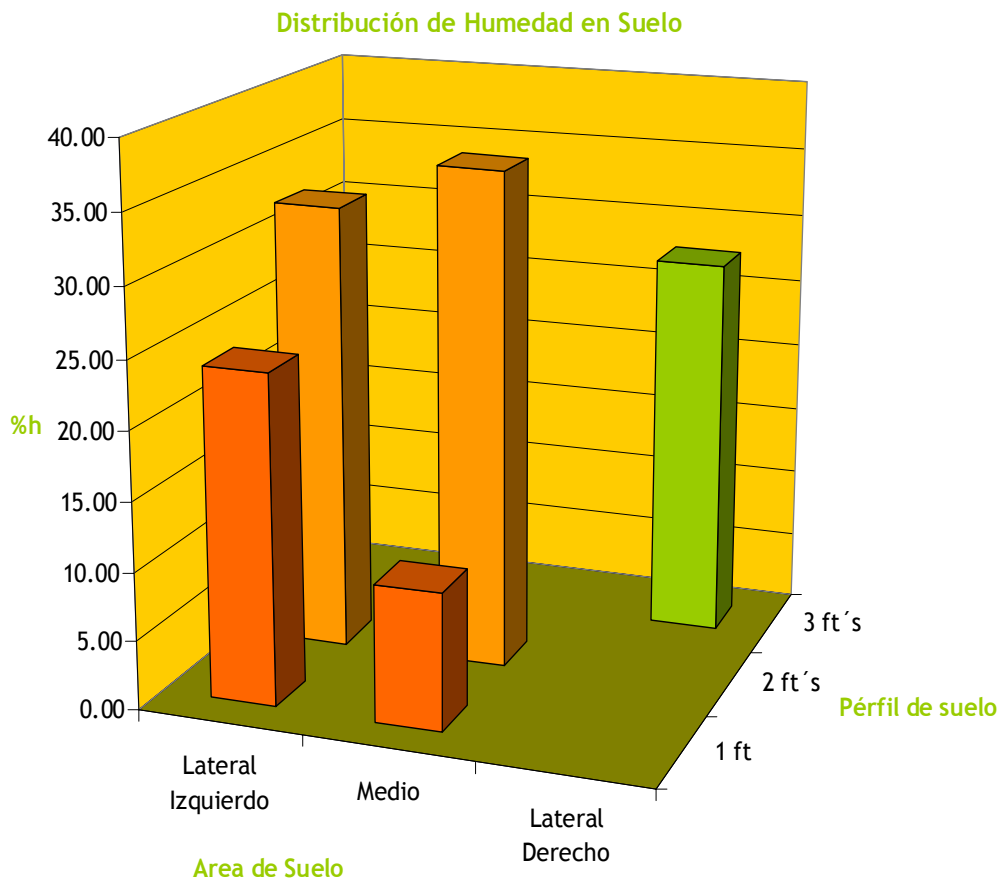
---Gráfico 1--- Se observan valores de pH de suelo superiores a 8.00, que le dan un carácter alcalino al suelo del predio Metales y derivados.

X	pH		
	capa sln 1	capa sln 2	capa suelo
A	8.45	8.53	8.82
B	8.40	--	9.26
C	8.59	8.91	9.08
D	8.15	8.31	8.96
E	9.11	9.28	9.81
F	8.38	8.49	9.12
G	7.31	9.93	10.13
H	7.24	8.74	8.98

---Tabla 6--- Indica los valores de pH obtenidos al realizar la medición tanto a la parte de suelo como a las diferentes fases de solución que se presentaron por muestra.

• **Porcentaje de Contenido de Humedad.**

El contenido de humedad en las muestras de suelo se incrementa al aumentar la profundidad del perfil de suelo. La humedad de las muestras de suelo es importante que mantenga un valor dentro del intervalo 20-30 en porcentaje, ya que esto facilitará el proceso de descontaminación por Electrocinética. En la gráfica 2 se observa como la humedad es menor en la sección media del terreno comparada con las laterales. La tabla 7 indica los resultados obtenidos de porcentaje de humedad en las muestras de suelo, cabe mencionar que no se determinó humedad a las muestras superficiales F,G y H.



---Gráfico 2--- El suelo de Metales y Derivados presenta un porcentaje de humedad menor en la sección media, al incrementarse la profundidad del perfil de suelo se incrementa este valor.

%h				
X	W rt	Wxh	Wxs	W H <sub>2</sub> O
A	20.652	1.539	1.170	23.98%
B	20.679	1.309	0.881	32.70%
C	20.550	2.050	1.846	9.95%
D	20.669	1.133	0.723	36.19%
E	20.425	1.401	1.013	27.69%

---Tabla 7--- Indica los valores obtenidos de porcentaje de humedad en la composición del suelo del predio Metales y Derivados.

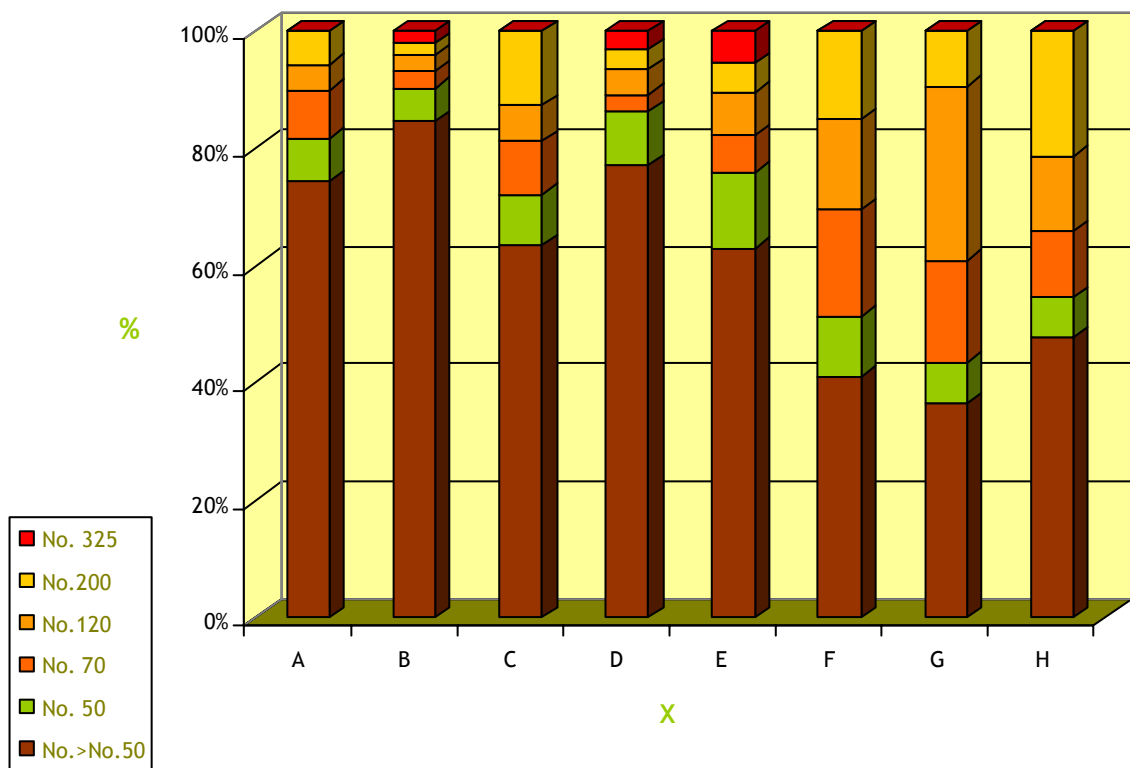
**Cálculos.**

Determinación de Humedad				
	W Humedad	Datos	Humedad	
<b>1 Lateral (1ft)</b>	<b>A</b>	W recipiente	20.652	<b>23.98%</b>
		w1 recpt + X	22.191	
		w2 recpt + X	21.833	
		w3 recpt + X	21.830	
		w4 recpt + X	21.822	
		w5 recpt + X	21.822	
<b>1 Lateral (2fts)</b>	<b>B</b>	W recipiente	20.679	<b>32.70%</b>
		w1 recpt + X	21.988	
		w2 recpt + X	21.578	
		w3 recpt + X	21.566	
		w4 recpt + X	21.560	
		w5 recpt + X	21.560	
<b>2 Medio (1ft)</b>	<b>E</b>	W recipiente	20.550	<b>9.95%</b>
		w1 recpt + X	22.600	
		w2 recpt + X	22.411	
		w3 recpt + X	22.406	
		w4 recpt + X	22.398	
		w5 recpt + X	22.396	
		w6 recpt + X	22.396	
<b>2 Medio (2fts)</b>	<b>D</b>	W recipiente	20.669	<b>36.19%</b>
		w1 recpt + X	21.802	
		w2 recpt + X	21.403	
		w3 recpt + X	21.400	
		w4 recpt + X	21.392	
		w5 recpt + X	21.392	
<b>3 Lateral (1ft)</b>	<b>C</b>	W recipiente	20.425	<b>27.69%</b>
		w1 recpt + X	21.826	
		w2 recpt + X	21.451	
		w3 recpt + X	21.438	
		w4 recpt + X	21.438	

• **Tamaño de Partícula (textura).**

El resultado obtenido de la metodología ASTM 2487 aplicada a las muestras de suelo es la clasificación del mismo por su textura como suelo tipo arcilloso grueso y tipo arcilloso grueso-grava. En la gráfica 3 y tabla 8 se presentan los resultados obtenidos del tamizado de las muestras.

**Pérfil por tamaño de partícula**



---Gráfico 3--- Al realizar el tamizado de las muestras de suelo de Metales y Derivados se clasifica por su textura como tipo arcilloso grueso y tipo arcilloso grueso-grava<sup>3</sup>,

<sup>3</sup> Método ASTM 2487.

Separación por tamaño (textura)						
X	No.>No.50	No. 50	No. 70	No.120	No.200	No. 325
A	74.33	7.46	8.11	4.40	5.69	0.00
B	84.55	5.77	2.74	2.74	2.04	2.16
C	63.69	8.66	9.15	6.06	12.74	0.00
D	77.07	9.17	3.03	4.19	3.42	3.10
E	62.87	12.97	6.33	7.33	4.99	5.50
F	41.11	10.23	18.23	15.38	15.05	0.00
G	36.47	6.98	17.54	29.54	9.47	0.00
H	47.82	6.70	11.41	12.80	21.27	0.00

---Tabla 8--- Indica los valores obtenidos de porcentaje en masa de la composición del suelo tamizado del predio Metales y Derivados.

**Cálculos.**

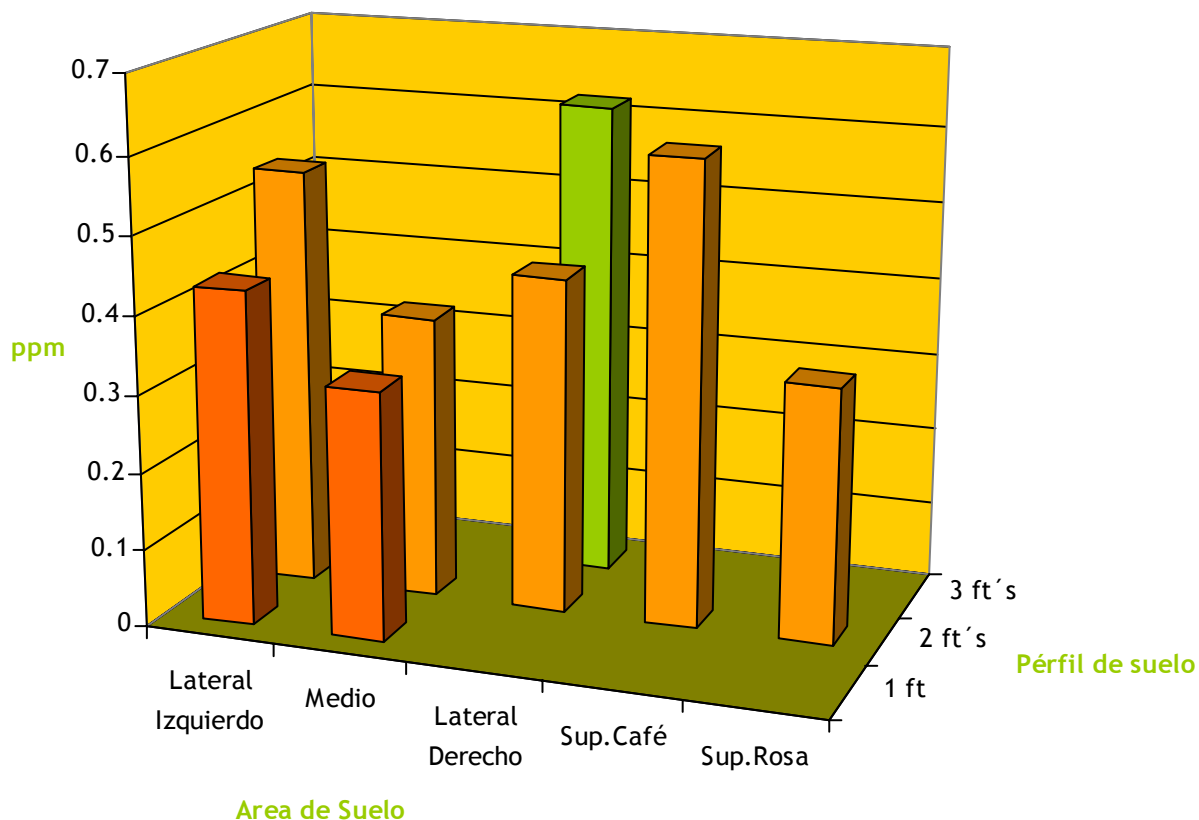
<b>Separación por Tamaño</b>				
	No. Malla	W malla	Proporción	
<b>1 Lateral (1ft)</b>	<b>A</b>	No. 50	7.351	7.46%
		No. 70	7.990	8.11%
		No.120	4.340	4.40%
		No.200	5.607	5.69%
		No.>No.50	73.239	74.33%
		Wx	98.527	100.00%
<b>1 Lateral (2fts)</b>	<b>B</b>	No. 50	5.290	5.77%
		No. 70	2.510	2.74%
		No.120	2.517	2.74%
		No.200	1.873	2.04%
		No. 325	1.980	2.16%
		No.>No.50	77.534	84.55%
Wx	91.703	100.00%		
<b>2 Medio (1ft)</b>	<b>D</b>	No. 50	8.022	8.66%
		No. 70	8.474	9.15%
		No.120	5.613	6.06%
		No.200	11.801	12.74%
		No.>No.50	58.725	63.39%
		Wx	92.635	100.00%
<b>2 Medio (2fts)</b>	<b>E</b>	No. 50	9.415	9.17%
		No. 70	3.115	3.03%
		No.120	4.303	4.19%
		No.200	3.513	3.42%
		No. 325	3.186	3.10%
		No.>No.50	79.106	77.07%
Wx	102.637	100.00%		
<b>3 Lateral (1ft)</b>	<b>C</b>	No. 50	13.267	12.97%
		No. 70	6.477	6.33%
		No.120	7.501	7.33%
		No.200	5.104	4.99%
		No. 325	5.631	5.50%
		No.>No.50	64.318	62.87%
Wx	102.297	100.00%		

<b>Separación por Tamaño</b>				
	<b>No. Malla</b>	<b>W malla</b>	<b>Proporción</b>	
<b>3 Superficial</b>	<b>F</b>	No. 50	9.943	10.23%
		No. 70	17.714	18.23%
		No.120	14.948	15.38%
		No.200	14.632	15.05%
		No.>No.50	39.956	41.11%
		Wx	97.193	100.00%
<b>3 Superficial (café)</b>	<b>G</b>	No. 50	6.797	6.98%
		No. 70	17.073	17.54%
		No.120	28.758	29.54%
		No.200	9.223	9.47%
		No.>No.50	35.501	36.47%
		Wx	97.352	100.00%
<b>3 Superficial (rosa)</b>	<b>H</b>	No. 50	6.602	6.70%
		No. 70	11.242	11.41%
		No.120	12.610	12.80%
		No.200	20.964	21.27%
		No.>No.50	47.122	47.82%
		Wx	98.540	100.00%

- **C.I.C. (Capacidad de Intercambio Catiónico).**

La C.I.C. del suelo obtenida por medio del método EPA 9081 indica la cantidad de cationes intercambiables de la estructura del suelo, incluyendo cationes de carácter metálico, incluso durante el procedimiento se observó al realizar el lavado con acetato de amonio una coloración azul en la solución de suelo lo que se supuso como indicador de presencia de cobre en el suelo, así que se decidió realizar pruebas a esta solución para la determinación de cobre por absorción atómica. En la gráfica 4 se observa que los valores de C.I.C. obtenidos se incrementan al aumentar la profundidad del perfil de suelo en una misma sección del terreno. La tabla 9 indica los valores de C.I.C. obtenidos para las diferentes muestras de suelo, se presentan valores en ppm de sodio que están dados en miligramos de suelo por litro de solución de suelo, de igual modo se presentan resultados en miligramos de suelo por kilogramo de suelo que también indican ppm, esto para comparar con los datos reportados por la EPA, por último se indican los valores en unidades de mol de suelo por kilogramo de suelo. En base a los resultados obtenidos de C.I.C. se eligieron las muestras que presentan valores mayores para aplicarles una descontaminación electrocinética, estas son las muestras B, E y G, se observan en color naranja en la tabla 9.

### Distribución de CIC en Suelo



---Gráfico 4--- Se observa que los valores de C.I.C. se incrementan al aumentar la profundidad del perfil de suelo muestreado.

X	ABS	CIC (Lavado $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ )	
	AA Na (ppm)	CIC (mg/kg)	CIC (mol/kg)
A	397.052	9926.297	0.432
B	500.825	12520.637	0.544
C	295.637	7390.920	0.321
D	338.090	8452.241	0.367
E	569.222	14230.54	0.619
F	399.410	9985.26	0.434
G	551.533	13788.33	0.599
H	302.712	7567.81	0.329

---Tabla 9--- Indica los valores obtenidos de C.I.C. de las muestras de suelo del predio de Metales y Derivados. Las muestras en color naranja son las que se eligieron por su alto valor de C.I.C. para una posible descontaminación electrocinética.

**Cálculos.**

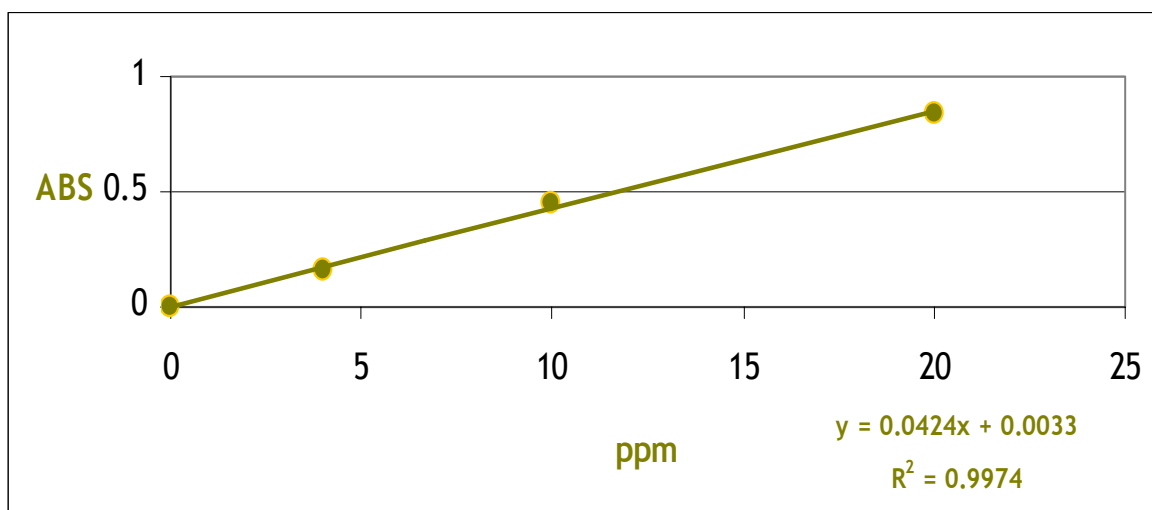
X	Lavado NH <sub>4</sub> CH <sub>3</sub> COO		
	AA Na (ppm)	(mg/Kg)	(mol/Kg)
A 1 Lateral (1 ft)	397.052	9926.297	0.432
B 1 Lateral (2 ft)	500.825	12520.637	0.544
C 2 Medio (1 ft)	295.637	7390.920	0.321
D 2 Medio (2 ft)	338.090	8452.241	0.367
E 3 Lateral (1 ft)	569.222	14230.542	0.619
F 3 Superficial	399.410	9985.259	0.434
G 3 Superficial café	551.533	13788.325	0.599
H 3 Superficial rosa	302.712	7567.807	0.329

Estándares: 0-20 ppm

Lámpara: 5 mA  
 λ: 589.6 nm  
 Slit: 0.5

Na	$y = 0.0424x + 0.0033$	(0-20ppm)
X	ppm	Abs
		Lavado NaCH <sub>3</sub> COO
1 Lateral (1ft)	7.941	0.340
1 Lateral (2fts)	10.017	0.428
2 Medio (1ft)	5.913	0.254
2 Medio (2fts)	6.762	0.290
3 Lateral (1ft)	11.384	0.486
3 Superficial	7.988	0.342
3 Superficial (café)	11.031	0.471
3 Superficial (rosa)	6.054	0.260

Solución Estándar	Abs
0	0.000
4	0.160
10	0.455
20	0.841

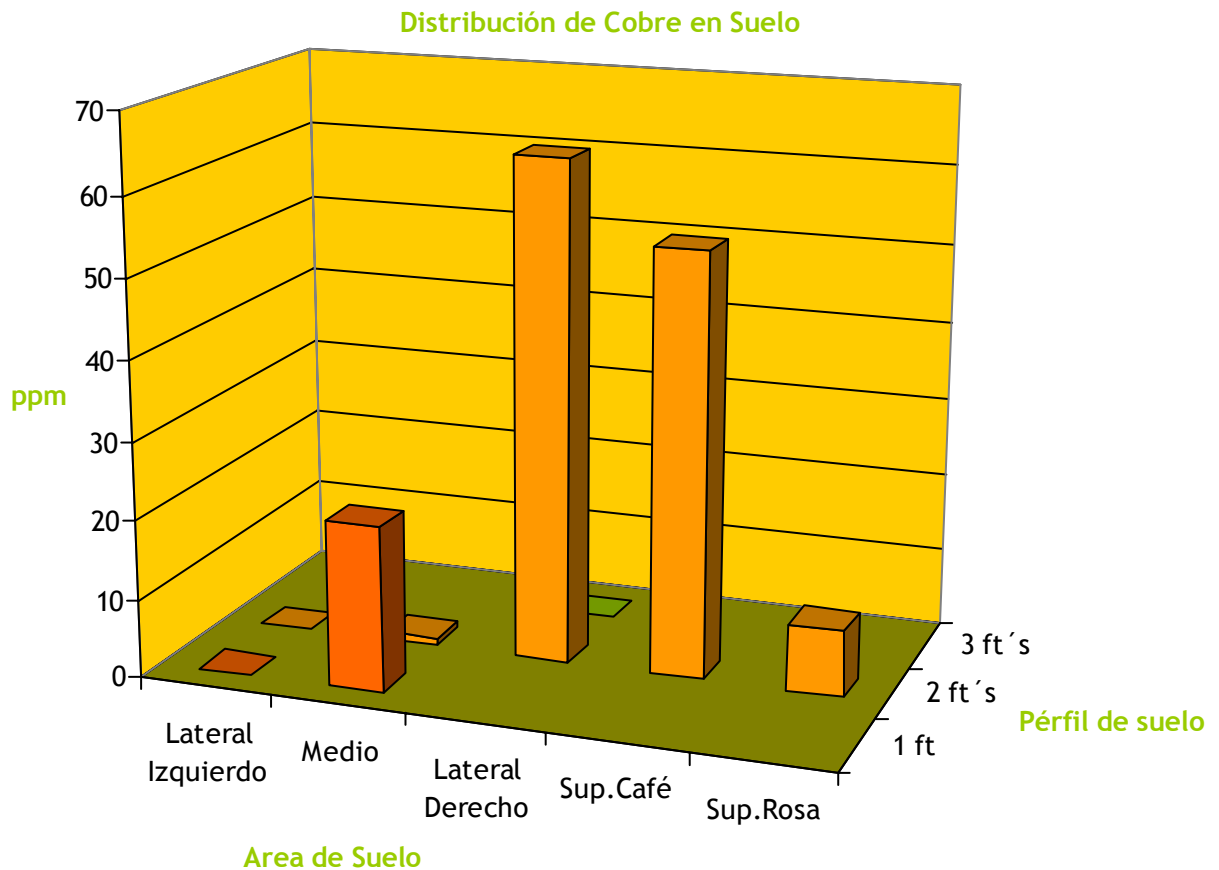


## • Contenido de metales Pb y Cu.

**Cu.**

### **Método: Absorción Atómica.**

Como se mencionó en la determinación de la C.I.C. se observó la presencia de una coloración azul al realizar el lavado con acetato de amonio por lo cual se supuso la presencia de cobre y se decidió realizar su determinación por absorción atómica a las soluciones de suelo de este lavado. Después de realizar la determinación se comprueba la presencia de cobre en algunas de las muestras de suelo, incluso en muestras que no presentaron coloración azul durante la determinación de C.I.C. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 10, de igual manera que para el reporte de C.I.C. se presentan valores en ppm de cobre dados en miligramos de suelo por litro de solución de suelo, resultados en miligramos de suelo por kilogramo de suelo y miligramos de suelo por kilogramo de suelo. La gráfica 5 indica la presencia de cobre en la parte media y en las muestras superficiales de la parte lateral derecha del terreno de Metales y Derivados.



---Gráfico 5--- El suelo de Metales y Derivados presenta un contenido de cobre en la sección media y lateral derecha.

X	Lavado $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$		
	AA Cu (ppm)	(mg/Kg)	(mol/Kg)
A	0.000	0.000	0.000
B	0.000	0.000	0.000
C	21.000	525.000	0.008
D	1.000	25.000	0.000
E	0.000	0.000	0.000
F	63.500	1587.500	0.025
G	53.500	1337.500	0.021
H	8.500	212.500	0.003

---Tabla 10--- Indica los valores de concentración de cobre obtenidos por Absorción atómica realizado a la solución resultante del lavado con  $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$  de las muestras del suelo del predio Metales y Derivados.

**Cálculos.**

X	Lavado NH <sub>4</sub> CH <sub>3</sub> COO		
	AA Cu (ppm)	(mg/Kg)	(mol/Kg)
A 1 Lateral (1ft)	0.000	0.000	0.000
B 1 Lateral (2fts)	0.000	0.000	0.000
C 2 Medio (1ft)	21.000	525.000	0.008
D 2 Medio (2fts)	1.000	25.000	0.000
E 3 Lateral (1ft)	0.000	0.000	0.000
F 3 Superficial	63.500	1587.500	0.025
G 3 Superficial café	53.500	1337.500	0.021
H 3 Superficial rosa	8.500	212.500	0.003

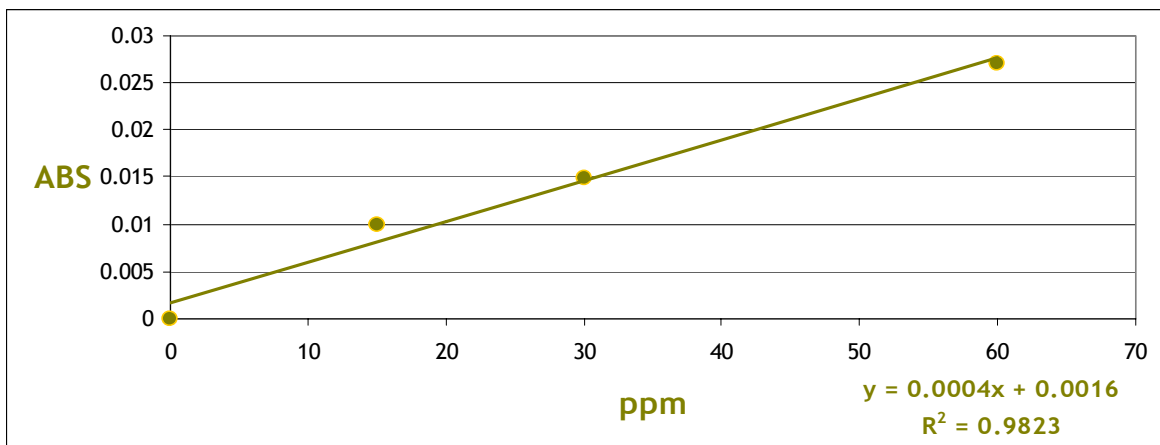
Estándares: 0-60 ppm

Lámpara: 4 mA  
 λ: 217.9 nm  
 Slit: 0.2

Cu	$y = 0.0004x + 0.0016$ (0-50ppm)	
X	ppm	Abs
		Lavado NH <sub>4</sub> CH <sub>3</sub> COO
1 Lateral (1ft)	0.000	0.000
1 Lateral (2fts)	0.000	0.000
2 Medio (1ft)	21.000	0.010
2 Medio (2fts)	1.000	0.002
3 Lateral (1ft)	0.000	0.001
3 Superficial	63.500	0.027
3 Superficial (café)	53.500	0.023
3 Superficial (rosa)	8.500	0.005

Solución Estándar	Abs
0	0.000
15	0.010
30	0.015
60	0.027

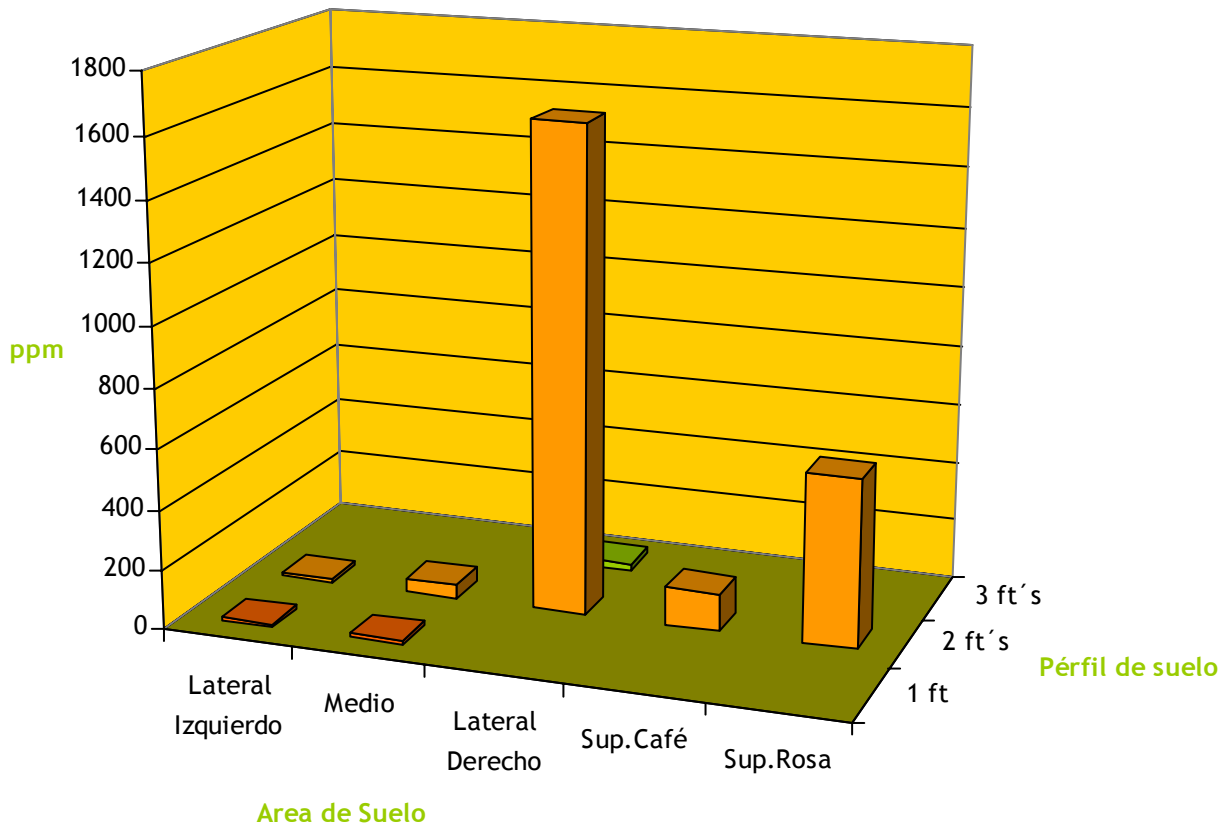


**Pb.**

**Método: Voltamperometría Osteryoung**

La determinación de plomo contenido en el suelo se realizó a las muestras procedentes del lavado con acetato de amonio obtenidas al determinar la C.I.C. Los resultados obtenidos muestran un alto contenido de plomo en las muestras de suelo sobre todo en las muestras superficiales F,G y H. La concentración de plomo se incrementa al aumentar la profundidad del perfil del suelo en una misma sección del terreno, en la gráfica 6 se puede observar la distribución de la concentración de plomo por sección y perfil, presentes en el terreno de Metales y Derivados. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 11, de igual manera que para el reporte de C.I.C. y de Cu se presentan valores en ppm de plomo dados en miligramos de suelo por litro de solución de suelo, resultados en miligramos de suelo por kilogramo de suelo y mol de suelo por kilogramo de suelo. En base a estos resultados obtenidos se eligieron la muestra G por su alto contenido de plomo y la muestra B por su bajo contenido de plomo para la parte experimental de la descontaminación electrocinética, esto de las ya elegidas B, E y G por su alta C.I.C.

### Distribución de Plomo en Suelo



---Gráfico 6--- El suelo de Metales y Derivados presenta mayor concentración de plomo en la sección lateral izquierda en la parte superficial. En las secciones lateral derecha y media la concentración de plomo se incrementa a mayor profundidad de perfil de suelo.

X	Lavado $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$		
	OSWVS Pb (ppm)	(mg/Kg)	(mol/Kg)
A	9.810	245.25	0.001
B	12.261	306.54	0.001
C	13.978	349.45	0.002
D	45.473	1136.81	0.005
E	22.752	568.81	0.003
F	1617.490	40437.24	0.195
G	125.602	3140.05	0.015
H	560.092	14002.29	0.068

---Tabla 11--- Indica los valores de concentración de plomo obtenidos por voltamperometría Oster-Young, realizado a la solución resultante del lavado con  $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$  de las muestras del suelo del predio Metales y Derivados.

**Cálculos.**

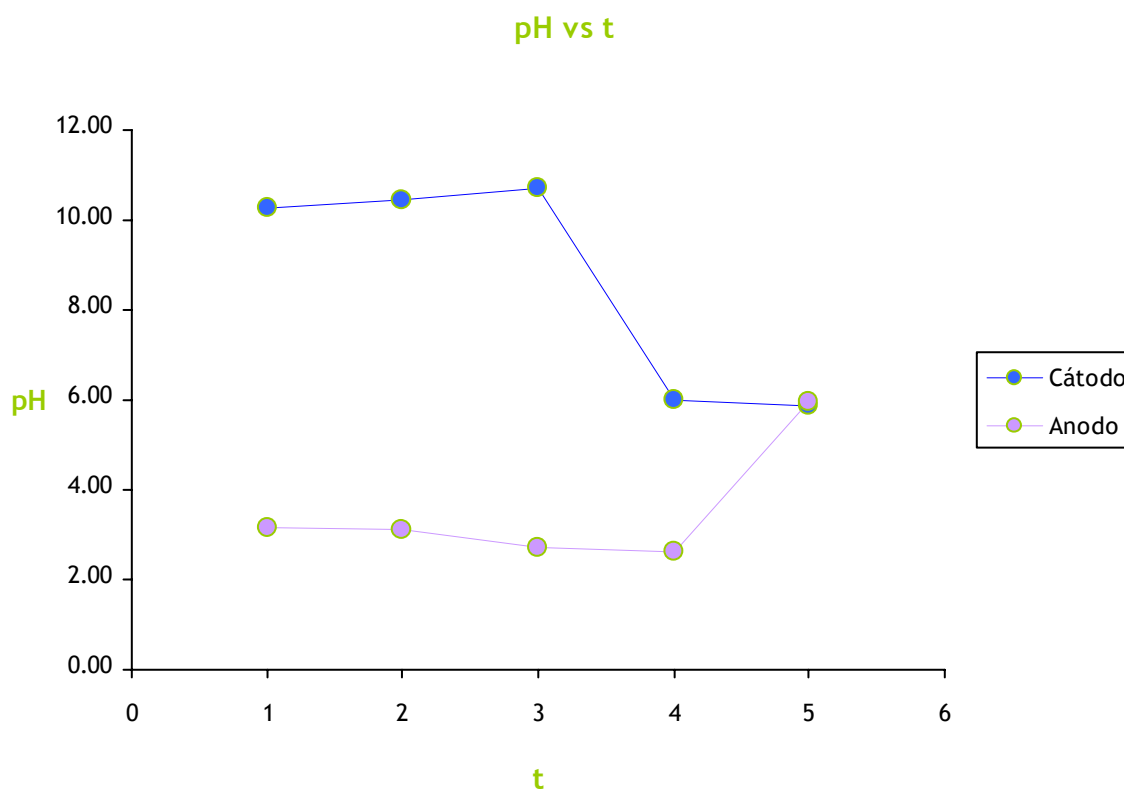
X	Concentración (ppm)	Corriente de pico ( $\times 10^{-7}$ )	Corriente real ( $\times 10^{-7}$ )	m	b	C = (b/m)*0.015/.0001) ppm
	Blanco	0	2.034			
A	0.1067	3.46	1.426	38.716	2.532	9.8099
	0.2134	9.95	7.916			
	0.3201	13.64	11.606			
		16	13.966			
		1.54				
B	0	2.976	1.436	11.979	0.9792	12.2615
	0.1067	3.4	1.86			
	0.2134	4.5	2.96			
	0.3201	6.87	5.33			
	0.4268	9.18	7.64			
	0.5335	13	11.46			
		2.87				
C	0	8.7	5.83	33.59	5.095	22.7523
	0.1067	10.36	7.49			
	0.2134	15.3	12.43			
	0.3201	19	16.13			
		2.26				
D	0	11.57	9.31	31.331	9.498	45.4725
	0.1067	14.89	12.63			
	0.2134	19.43	17.17			
	0.3201	21.2	18.94			
		3.869				
E	0	4.333	0.464	28.062	0.0523	0.2796
	0.1067	5.899	2.03			13.9780
	0.2134	10.08	6.211			
	0.3201	12.92	9.051			
		0.09513				
F	0	3.014	2.91887	13.265	2.8608	32.3498
	0.1067	4.29	4.19487			1617.4896
	0.2134	5.775	5.67987			
	0.3201	7.237	7.14187			
		1.42				
G	0	2.071	0.651	14.952	0.2504	2.5120
	0.1067	2.907	1.487			125.6019
	0.2134	4.377	2.957			
	0.3201	6.899	5.479			
		2.455				
H	0	5.517	3.062	34.102	2.5467	11.2018
	0.1067	8.162	5.707			560.0918
	0.2134	11.69	9.235			
	0.3201	16.47	14.015			

## Restauración del suelo.

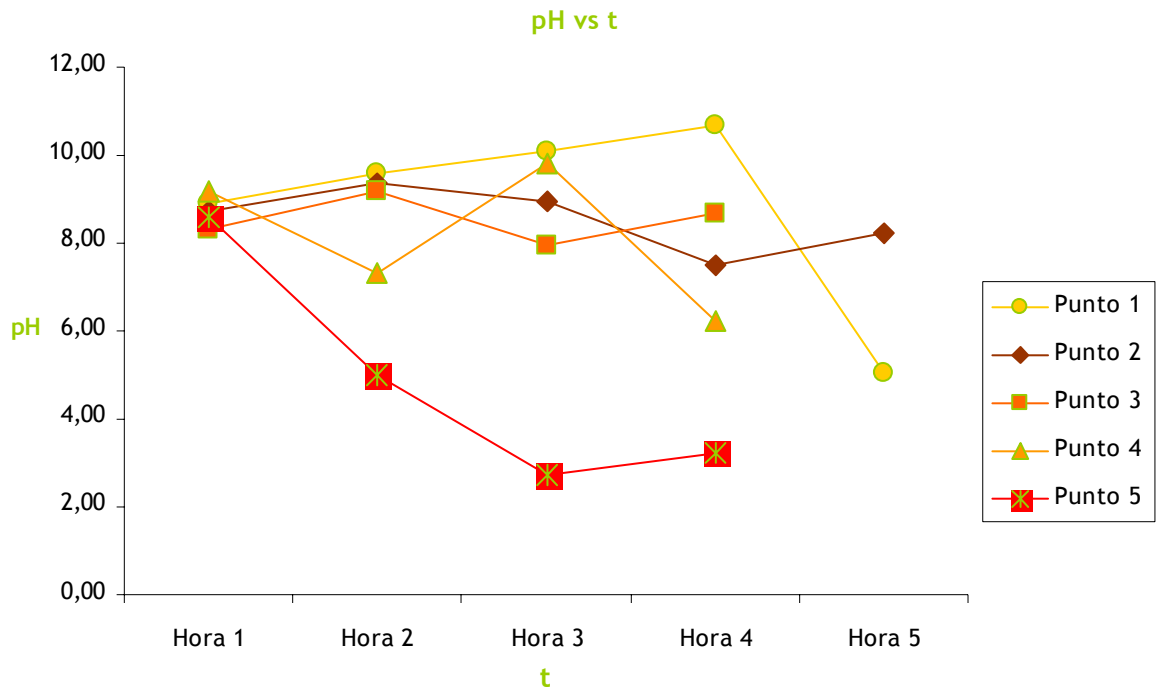
Exp 1

t	E (V)	pH						
		A (+)	C (-)	1	2	3	4	5
15:00:00	--	3.15	10.25	8.90	8.71	8.31	9.18	8.59
16:00:00	14.71	3.10	10.44	9.61	9.36	9.16	7.34	4.99
17:00:00	--	2.70	10.70	10.09	8.96	7.97	9.84	2.75
18:00:00	13.44	2.61	5.99	10.67	7.52	8.68	6.24	3.24
19:00:00	13.23	5.94	5.85	5.05	8.23	ID	ID	ID

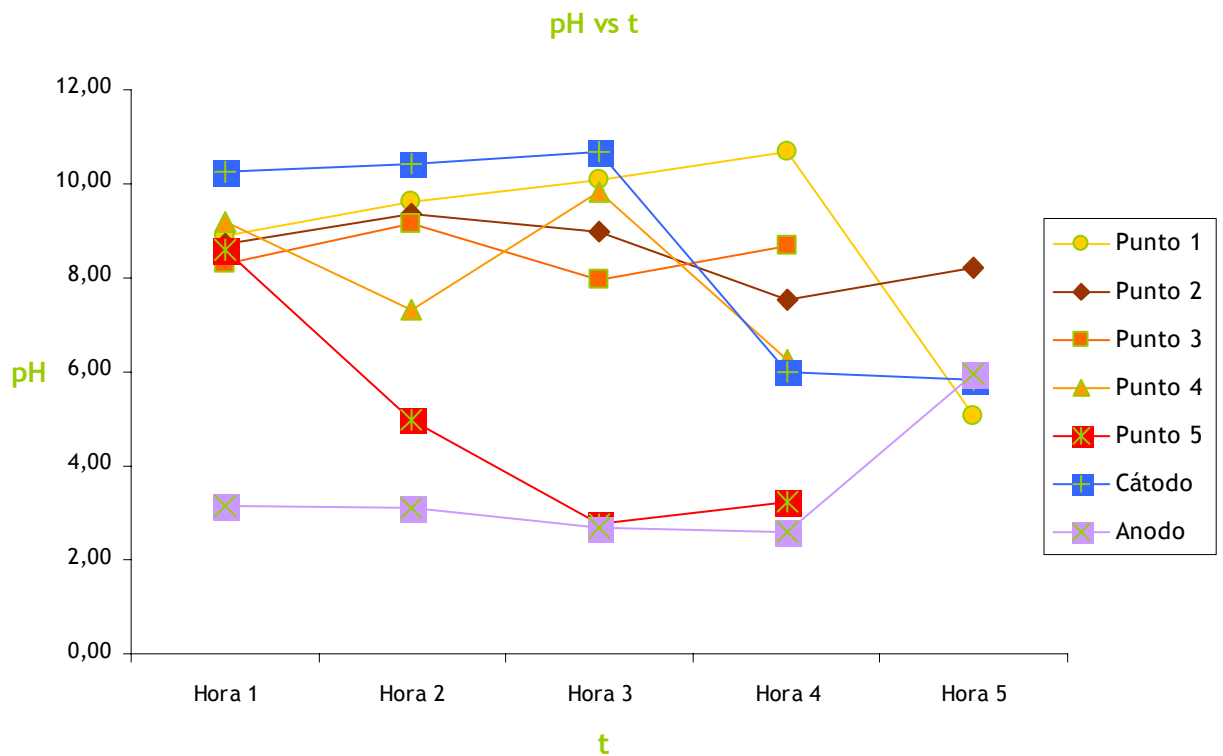
---Tabla 12--- Indica los valores obtenidos de pH en las diferentes secciones de la celda a diferentes tiempos al aplicar tratamiento electrocinético a la muestra B (1 Lateral 2 pies), muestra con alta C.I.C., baja concentración de Plomo y humedad del 32%.



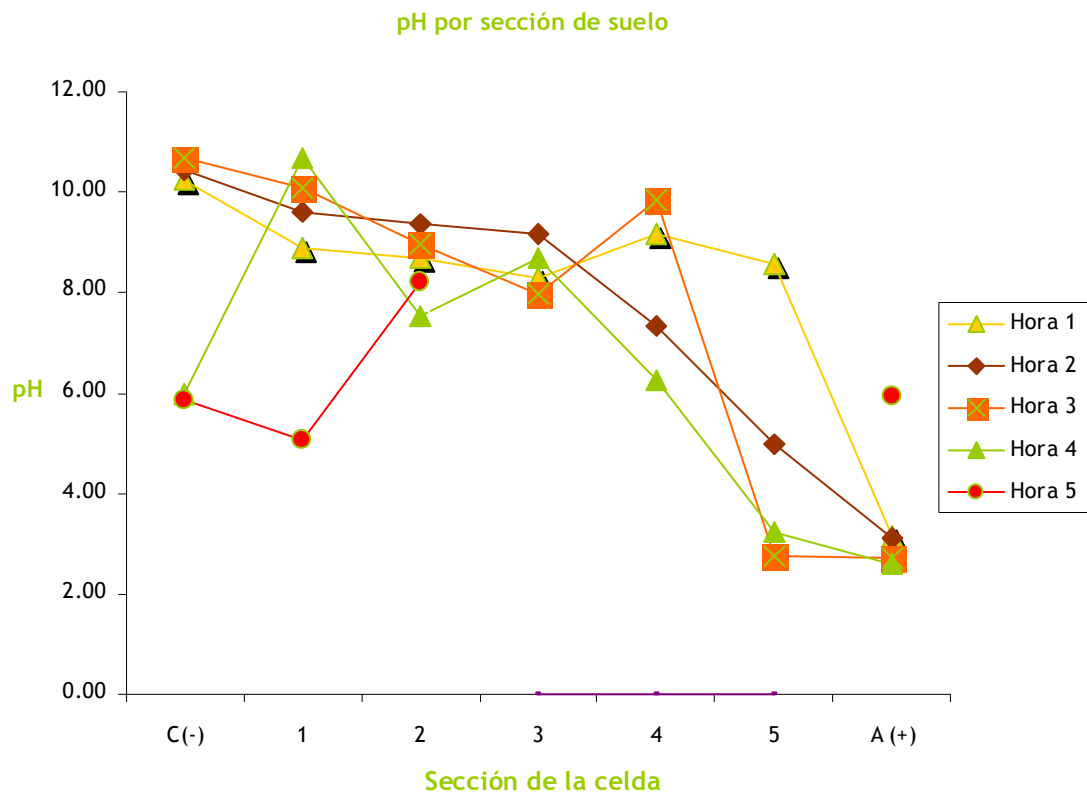
---Gráfico 7--- Al transcurrir el tiempo de aplicación del tratamiento electrocinético se observa como se incrementa el valor de pH en el compartimento catódico, mientras se acidifica en el compartimento anódico.



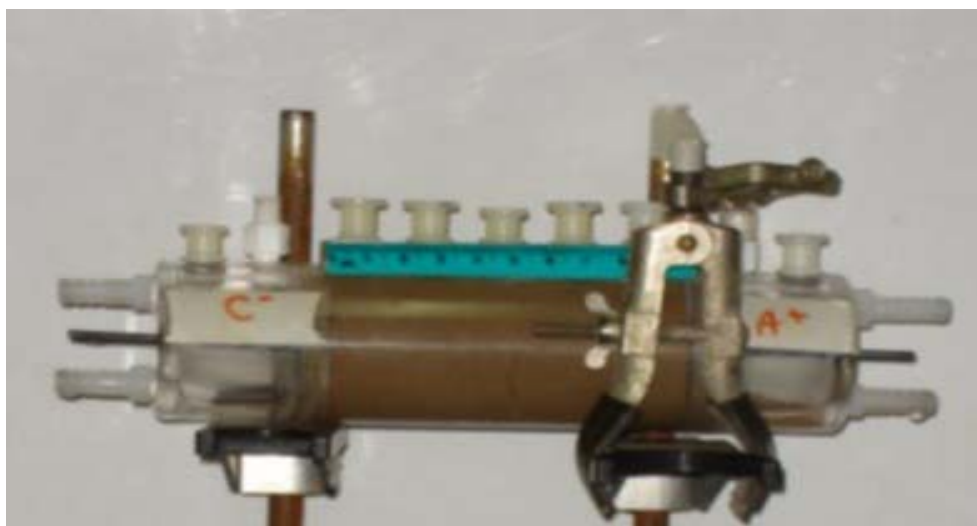
---Gráfico 8--- La variación de pH en el suelo al aplicar el tratamiento electrocinético se observa como una acidificación en las secciones cercanas al compartimiento anódico al mismo tiempo que se incrementa el valor de pH en las secciones cercanas al compartimiento catódico.



---Gráfico 9--- La variación de pH en el experimento indica un proceso de electroósmosis que favorece la remoción de metales contenidos en el suelo.



---Gráfico 10--- Muestra los perfiles de variación de pH en las diferentes secciones de la celda al transcurrir el tiempo de aplicación del proceso de remoción electrocinética de metales contenidos en el suelo.

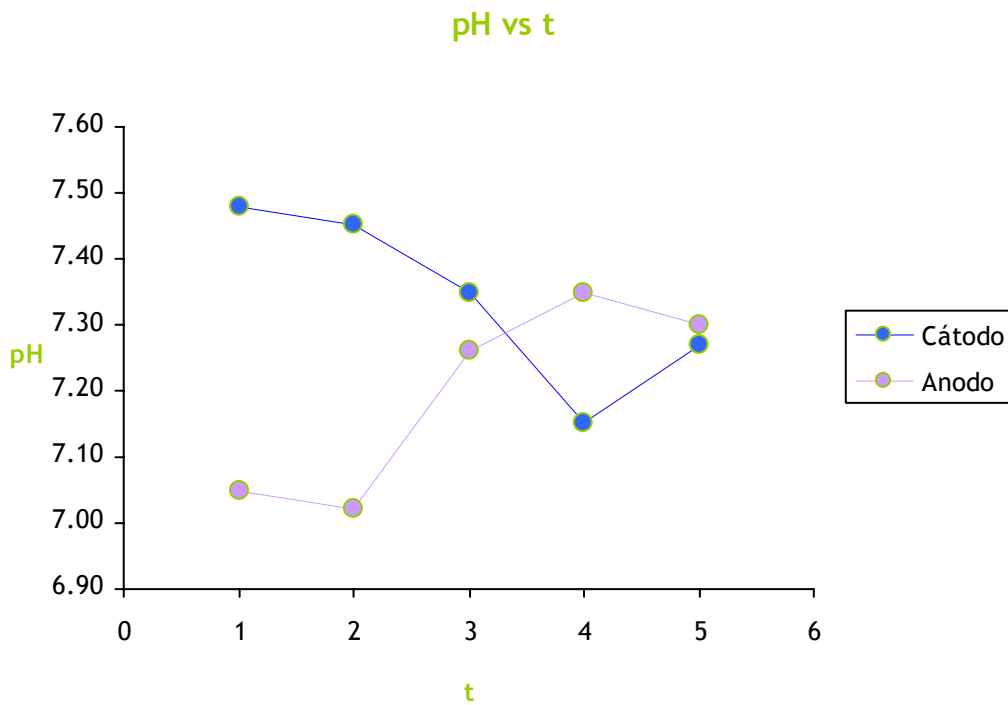


---Fig. 14--- Experimento en muestra de suelo G (2 Superficial Café).

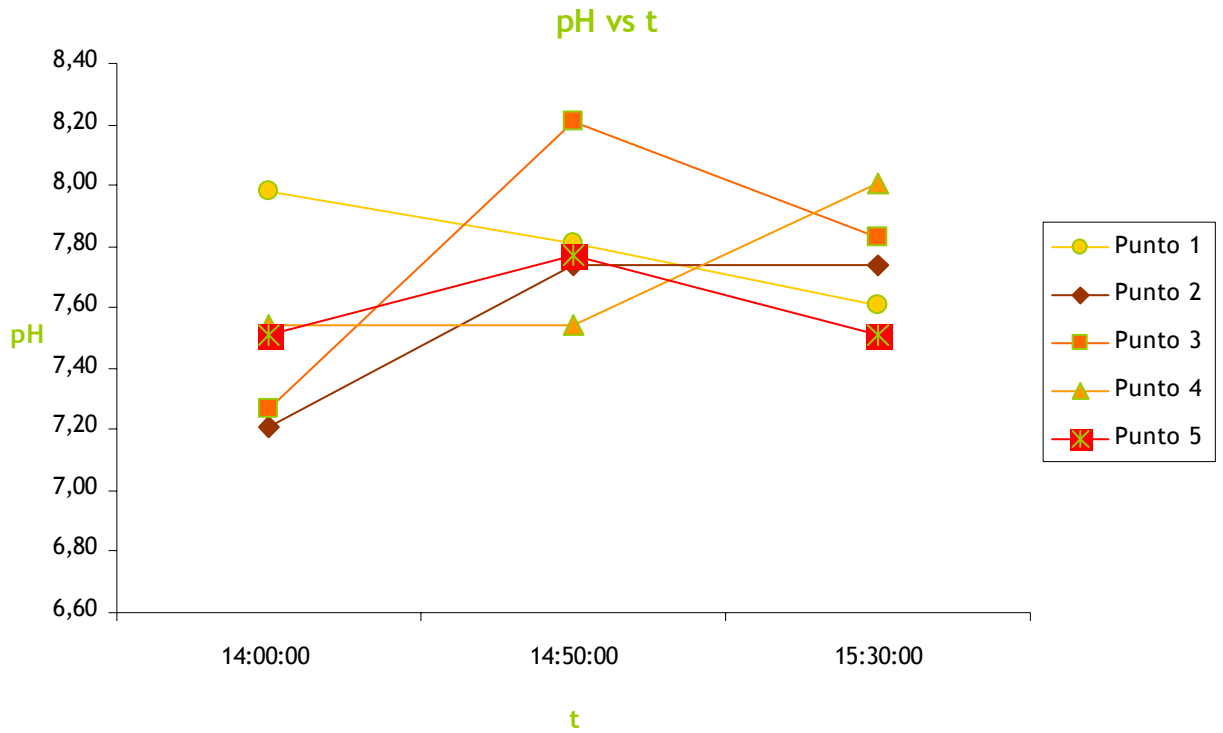
Exp 2

t	E (V)	pH						
		A (+)	C (-)	1	2	3	4	5
14:00:00	24.9	7.05	7.48	7.98	7.21	7.27	7.54	7.51
14:50:00	27.8	7.02	7.45	7.81	7.74	8.21	7.54	7.77
15:30:00	41.3	7.26	7.35	7.61	7.74	7.83	8.01	7.51
16:19:00	43.7	7.35	7.15	ID	ID	ID	ID	ID
17:11:00	46.0	7.30	7.27	ID	ID	ID	ID	ID
17:33:00	46.1	7.30	7.07	ID	ID	ID	ID	ID

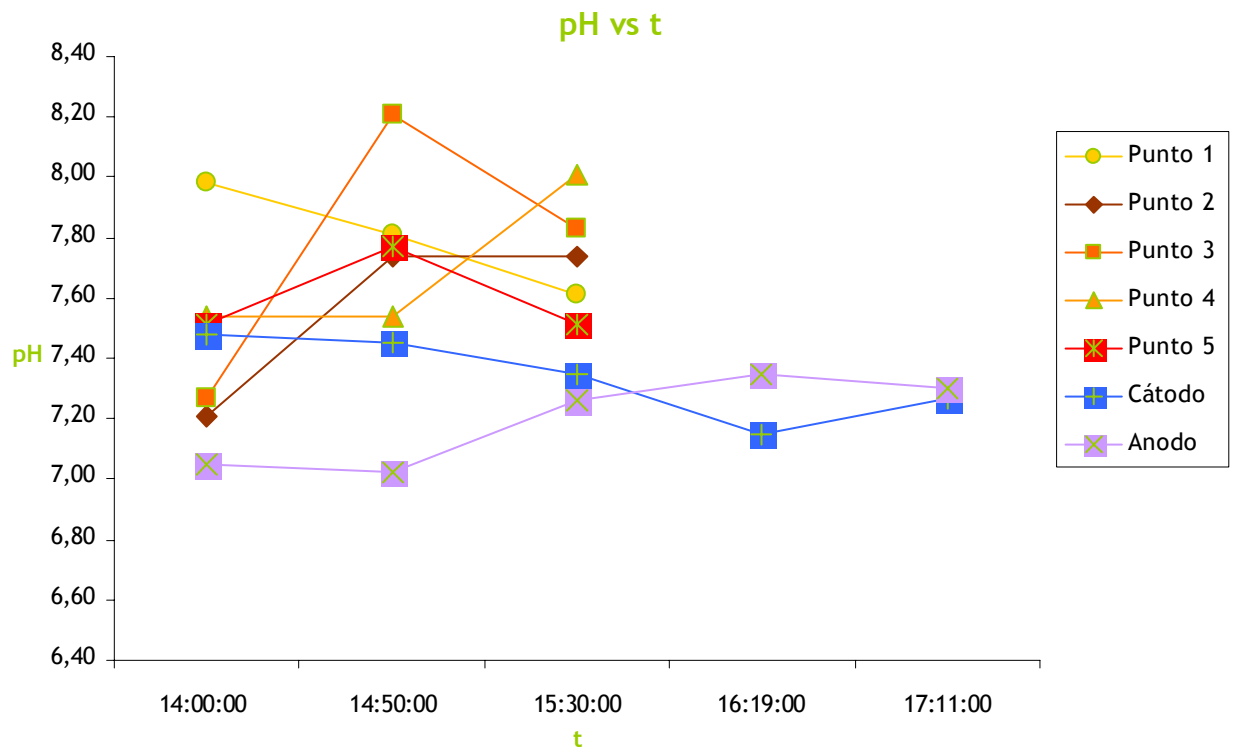
---Tabla 13--- Indica los valores obtenidos de pH en las diferentes secciones de la celda a diferentes tiempos al aplicar tratamiento electrocinético a la muestra G (3 Superficial Café), muestra con alta C.I.C., alta concentración de Plomo.



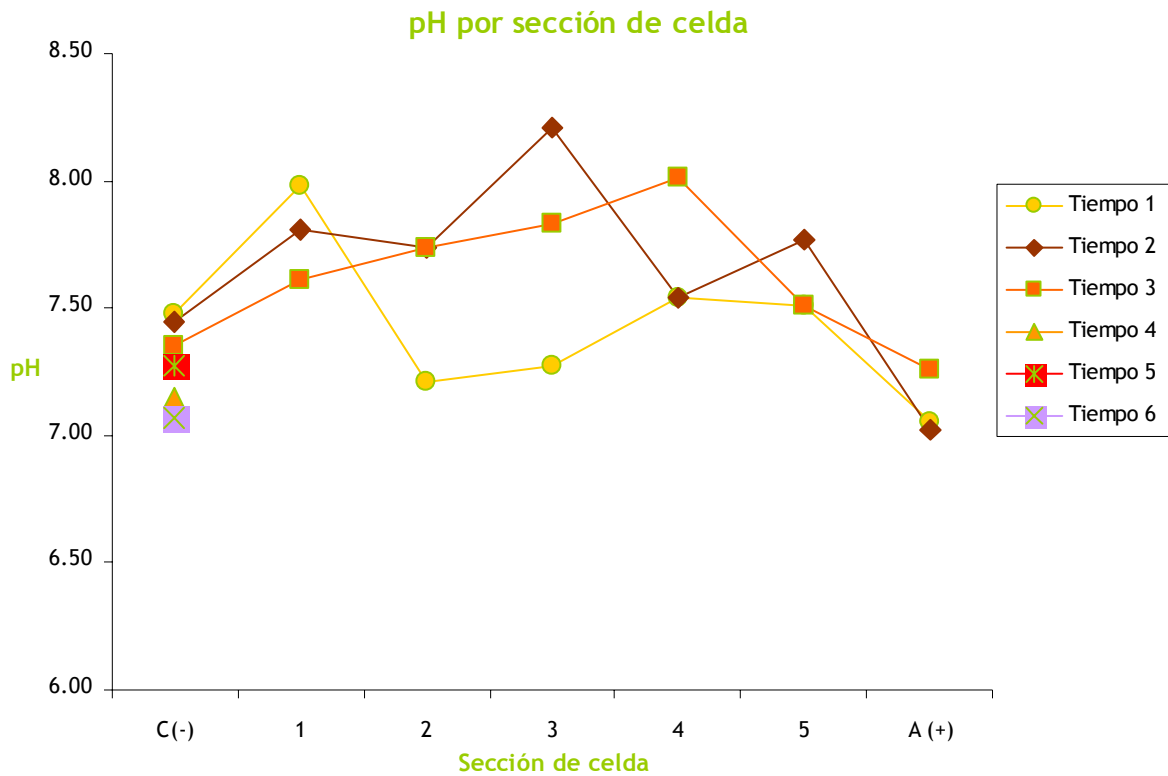
---Gráfico 11--- Al transcurrir el tiempo de aplicación del tratamiento electrocinético se observa como se incrementa el valor de pH en el compartimiento anódico, mientras ocurre una disminución en el compartimiento catódico.



---Gráfico 12--- La variación de pH en el suelo al aplicar el tratamiento electrocinético se observa como una rápida disminución de pH en las secciones cercanas al compartimiento catódico, a la vez que se incrementa en las secciones cercanas al compartimiento anódico.



---Gráfico 13--- La variación de pH en el experimento indica un proceso de electroósmosis que no favorece la remoción de metales contenidos en el suelo.



---Gráfico 14--- Muestra los perfiles de variación de pH en las diferentes secciones de la celda al transcurrir el tiempo de aplicación del proceso de remoción electrocinética de metales contenidos en el suelo, se observa que si existe variación en los compartimientos catódico y anódico, sin embargo en las otras secciones es muy poca la variación de pH.

## V. Conclusiones.

En esta tesis se demuestra como la caracterización fisicoquímica de un suelo se utiliza para determinar ó verificar el grado de contaminación del mismo. En el caso de las muestras obtenidas del predio abandonado de Metales y Derivados el suelo presenta niveles altos de contenido de plomo, incluso cuatro puntos de muestreo se encuentran por encima del nivel máximo permisible para un suelo de uso industrial (750 mg/Kg)<sup>4</sup>.

En un mismo punto de muestreo se observa que a mayor profundidad del suelo se incrementa la concentración de plomo, de igual modo se incrementa la Capacidad de Intercambio Catiónico. De esta manera la CIC de un suelo es directamente proporcional a su capacidad para contaminarse.

El suelo se clasificó por su textura como tipo arcilloso grueso y tipo arcilloso grueso-grava<sup>5</sup>, esto resulta útil porque al conocer la estructura del tipo suelo se conocen las posibles interacciones que presentara con el medio acuoso y con los metales.

El suelo muestra valores de pH por encima de 8, si se toma un valor promedio de pH resultaría 9.27. Este valor es alcalino y convierte insolubles a los metales en el suelo en su estado normal de humedad.

---

<sup>4</sup> Proyecto De Norma Oficial Mexicana Proy-Nom-147-Semarnat/Ssa1-2004, Que Establece Criterios Para Determinar Las Concentraciones De Remediación De Suelos Contaminados Por Arsénico, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio, Talio Y Vanadio.

<sup>5</sup> Método ASTM 2487.

Se observa que el pH de la dispersión suelo-solución acuosa tiende a disminuir, por lo cual una lluvia ácida puede lixiviar los metales. La amortiguación de pH del suelo para disolución y desorción de metales es sumamente importante para el proceso de remoción de metales, esta variación de pH se observa en ambos experimentos realizados, se espera que las digestiones de las muestras obtenidas confirmen la relación del pH con el contenido de metales en cada sección del suelo.

Practicar métodos alternativos para disposición de sitios contaminados es posible si se realiza la caracterización adecuada de las propiedades del suelo, ya que en gran parte el diagnóstico del sitio es fundamental para determinar el tipo de tratamiento a seleccionar.

El tratamiento electrocinético no resultó exitoso debido a que las propiedades del suelo no son similares a los reportados en la literatura, de manera que las condiciones utilizadas en el experimento 2 (principalmente la intensidad de corriente) modificaron la textura y lo volvieron lodoso y elástico. En el caso del experimento 1 se logró mantener las condiciones electrocinéticas durante 5 horas; sin embargo, después este tiempo ya no fue posible determinar los perfiles de pH. Lo anterior debido a que el suelo cambió su estructura química y empezó a presentar cambios violentos en el pH.

## VI. Referencias.

- Mary M. Page y Christopher L. Page ; “Electroremediation of Contaminated Soils” ; Journal of Environmental Engineering ; Pág. 259-272 ; March 2002.
- Soon-Oh Kim, Seng-Hyeon Moon y Kyoung-Woong Kim ; “Removal Of Heavy Metals From Soil Using Enhanced Electrokinetic Soil Processing” ; Water, Air and Soil Pollution ; No 125 ; Pág. 259-272 ; 2001.
- Toxicología Ambiental, Evaluación de riesgo para la salud humana; Ma. Dolores Moreno Grau; Mc Graw Hill, 2003 ; Pág. 98,110,113,159,167-171,198,223-227.
- Soil Physical Chemistry ; Segunda edición; Editado por Donald L. Sparks ; Autor de capítulo Richmond Bartlett ; CRC Press, 1999 ; Pág. 394.
- Environmental Chemistry; Alan Winfield; Cambridge University Press, 1998 ; Pág. 51-69.
- NOM-052-SEMARNAT-1993 (antes NOM-052-ECOL-1993); NORMA OFICIAL MEXICANA, QUE ESTABLECE LAS CARACTERISTICAS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS Y EL LISTADO DE LOS MISMOS Y LOS LIMITES QUE HACEN A UN RESIDUO PELIGROSO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE.
- Expediente de Hechos Final, Petición Ciudadana SEM-98-007 (Metales y Derivados). Elaborado en conformidad con el artículo 15 del Acuerdo de

Cooperación Ambiental de América del Norte. Disponible en el link <http://www.cec.org/files/pdf/sem/98-7-FFR-s.pdf>.

- PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, QUE ESTABLECE CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS CONCENTRACIONES DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR ARSÉNICO, BERILIO, CADMIO, CROMO HEXAVALENTE, MERCURIO, NÍQUEL, PLOMO, SELENIO, TALIO Y VANADIO.

- <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema05/imagenes/doblecap.gif>

## VII. ANEXO. Índice de Tablas, Imágenes y Gráficos.

:::Tablas:::

<b>Tabla 1.</b> Características del lixiviado (PECT) que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente.....	<b>7</b>
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de residuos de plomo de acuerdo a la NOM-052.....	<b>7</b>
<b>Tabla 3.</b> Concentraciones de referencia totales ( $CR_T$ ) por tipo de uso de suelo.....	<b>8</b>
<b>Tabla 4.</b> Concentraciones de referencia de contaminantes solubles ( $CR_s$ ).....	<b>8</b>
<b>Tabla 5.</b> Concentraciones de referencia de dispersión eólica totales solubles ( $CD_T$ ).....	<b>9</b>
<b>Tabla 6.</b> Indica los valores de pH obtenidos al realizar la medición tanto a la parte de suelo como a las diferentes fases de solución que se presentaron por muestra.....	<b>38</b>
<b>Tabla 7.</b> Indica los valores obtenidos de porcentaje de humedad en la composición del suelo del predio Metales y Derivados.....	<b>40</b>
<b>Tabla 8.</b> Indica los valores obtenidos de porcentaje en masa de la composición del suelo tamizado del predio Metales y Derivados.....	<b>43</b>
<b>Tabla 9.</b> Indica los valores obtenidos de C.I.C. de las muestras de suelo del predio de Metales y Derivados.....	<b>47</b>
<b>Tabla 10.</b> Indica los valores de concentración de cobre obtenidos por Absorción atómica realizado a la solución resultante del lavado con $NH_4CH_3COO$ de las muestras del suelo del predio Metales y Derivados.....	<b>50</b>
<b>Tabla 11.</b> Indica los valores de concentración de plomo obtenidos por voltamperometría Oster-Young, realizado a la solución resultante del lavado con $NH_4CH_3COO$ de las muestras del suelo del predio Metales y Derivados.....	<b>53</b>
<b>Tabla 12.</b> Indica los valores obtenidos de pH en las diferentes secciones de la celda a diferentes tiempos al aplicar tratamiento electrocinético a la muestra B (1 Lateral 2 pies).....	<b>55</b>

<b>Tabla 13.</b> Indica los valores obtenidos de pH en las diferentes secciones de la celda a diferentes tiempos al aplicar tratamiento electrocinético a la muestra G (3 Superficial Café),.....	<b>58</b>
---	-----------

**:::Gráficos:::**

<b>Gráfico 1.</b> Se muestra la variación de pH de suelo en el predio Metales y Derivados.....	<b>38</b>
<b>Gráfico 2.</b> Se muestra el porcentaje de humedad contenido en el suelo del predio Metales y Derivados.....	<b>39</b>
<b>Gráfico 3.</b> Se muestra la clasificación de las muestras de suelo del predio Metales y derivados por su textura.....	<b>42</b>
<b>Gráfico 4.</b> Se muestra la C.I.C. del suelo en el predio Metales y Derivados.....	<b>47</b>
<b>Gráfico 5.</b> Se muestra la concentración de cobre presente en el suelo del predio Metales y Derivados.....	<b>50</b>
<b>Gráfico 6.</b> Se muestra la concentración de plomo contenido en el suelo del predio Metales y Derivados.....	<b>53</b>
<b>Gráfico 7.</b> Al transcurrir el tiempo de aplicación del tratamiento electrocinético se observa como se incrementa el valor de pH en el compartimiento catódico , mientras se acidifica en el compartimiento anódico.....	<b>55</b>
<b>Gráfico 8.</b> La variación de pH en el suelo al aplicar el tratamiento electrocinético se observa como una acidificación en las secciones cercanas al compartimiento anódico al mismo tiempo que se incrementa el valor de pH en las secciones cercanas al compartimiento catódico.....	<b>56</b>

<b>Gráfico 9.</b> Se muestra La variación de pH en el experimento indica un proceso de electroósmosis que favorece la remoción de metales contenidos en el suelo.....	<b>56</b>
<b>Gráfico 10.</b> Muestra los perfiles de variación de pH en las diferentes secciones de la celda al transcurrir el tiempo de aplicación del proceso de remoción electrocinética de metales contenidos en el suelo.....	<b>57</b>
<b>Gráfico 11.</b> Al transcurrir el tiempo de aplicación del tratamiento electrocinético se observa como se incrementa el valor de pH en el compartimiento anódico, mientras ocurre una disminución en el compartimiento catódico.....	<b>58</b>
<b>Gráfico 12.</b> La variación de pH en el suelo al aplicar el tratamiento electrocinético se observa como una rápida disminución de pH en las secciones cercanas al compartimiento catódico, a la vez que se incrementa en las secciones cercanas al compartimiento anódico.....	<b>59</b>
<b>Gráfico 13.</b> La variación de pH en el experimento indica un proceso de electroósmosis que no favorece la remoción de metales contenidos en el suelo.....	<b>59</b>
<b>Gráfico 14.</b> Muestra los perfiles de variación de pH en las diferentes secciones de la celda al transcurrir el tiempo de aplicación del proceso de remoción electrocinética de metales contenidos en el suelo.....	<b>60</b>

**:::Imágenes:::**

<b>Figura 1.</b> Indica las tres secciones en que se dividió el predio de Metales y derivados para su muestreo.....	<b>19</b>
<b>Figura 2.</b> Se observa la marca después de introducir el ciclón para tomar una muestra de suelo a profundidad de un pie.....	<b>19</b>
<b>Figura 3.</b> Clasificación de las muestras tomadas en el predio de Metales y Derivados.....	<b>20</b>

<b>Figura 4.</b> Toma de muestra con equipo de protección adecuado.....	<b>20</b>
<b>Figura 5.</b> Solución de suelo preparada para medir pH.....	<b>22</b>
<b>Figura 6.</b> Diferentes texturas del suelo tamizado.....	<b>25</b>
<b>Figura 7.</b> Lavados Fase 1 ( $\text{NaCH}_3\text{COO}$ 1N) para determinar C.I.C.....	<b>28</b>
<b>Figura 8.</b> Lavados Fase 2 [ $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ 99%] para determinar C.I.C.....	<b>28</b>
<b>Figura 9.</b> Lavados Fase 3 ( $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ 1N) para determinar C.I.C.....	<b>28</b>
<b>Figura 10.</b> Preparación de la muestra de suelo.....	<b>34</b>
<b>Figura 11.</b> Muestra de suelo compactada dentro de la celda OSMIC I.....	<b>35</b>
<b>Figura 12.</b> Celda OSMIC I lista para correr tratamiento electrocinética a muestra de suelo.....	<b>35</b>
<b>Figura 13.</b> Experimento en muestra de suelo B (1 lateral Izquierdo 2 pies).....	<b>36</b>
<b>Figura 14.</b> Experimento en muestra de suelo G (2 Superficial Café).....	<b>57</b>