



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
EN ELECTROQUÍMICA



“Modelación y Simulación de Propiedades Fisicoquímicas de Suelo Contaminado con Hidrocarburo después de un Tratamiento Electrocinético empleando un Reactor con una Configuración de Electrodo 1-D y 2-D”

TESIS PRESENTADA POR:

M. en C. MARIBEL PÉREZ CORONA

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN ELECTROQUÍMICA

Santiago de Querétaro, Diciembre del 2016

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

REALIZADA POR:
M. EN C. MARIBEL PÉREZ CORONA

DIRIGIDA POR:
DRA. ÉRIKA BUSTOS BUSTOS

SINODALES

Dr. Francisco Javier Rodríguez Valadez

Presidente

Firma

Dr. René Antaño López

Secretario

Firma

Dr. José de Jesús Pérez Bueno

Vocal

Firma

Dr. Juan Manríquez Rocha

Vocal

Firma

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Vocal

Firma

Dra. Irma Robles Gutiérrez

Suplente

Firma

RESUMEN

En la actualidad, derivado de las diferentes actividades industriales que se desarrollan en el mundo, se presenta la contaminación al medio ambiente, en este caso se aborda la contaminación de suelos, para tratar de mitigar el efecto dañino que los contaminantes pudieran tener en el suelo existen diferentes alternativas de remediación, entre las cuales se encuentra la electroremediación, también conocida como tratamiento electrocinético.

En este trabajo de investigación se presenta como primera parte la implementación del proceso de electro-remediación en una zona de la industria petrolera contaminada con hidrocarburo fracción intermedia y pesada, así como la evaluación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo electrorremediado *in situ*, en donde se observaron cambios importantes, sobre todo al acoplar al final del proceso la técnica de fito-remediación. Posteriormente, se desarrolló la simulación de la distribución de contaminantes orgánicos en el subsuelo al antes y después del proceso de electro-remediación mediante datos de resistividad eléctrica. La simulación de la resistividad eléctrica se empleó como una herramienta que podría indicar la presencia de contaminantes orgánicos en el suelo, como los hidrocarburos; pero es necesario especificar que se debe complementar con pruebas analíticas.

En seguida, se evaluó el efecto del campo eléctrico en el suelo tipo Vertisol pélico y en la arcilla característica contenida en dicho suelo (bentonita sódica), con el fin de hacer una simplificación del sistema y así poder crear un algoritmo matemático en Visual Basic que pudiera seguir el movimiento de los iones a través del suelo. Es importante mencionar que, el modelo matemático que se desarrolló en este proyecto de investigación se aproxima al comportamiento de la arcilla característica en el suelo tipo Vertisol pélico en estudio (bentonita sódica), pues describe el cambio de pH a lo largo de la celda y la resistencia eléctrica, en donde existe un patrón entre el contenido de agua y el desplazamiento de iones por conductividad eléctrica. Sin embargo, en el suelo tipo Vertisol pélico, de las propiedades fisicoquímicas evaluadas solo fue reproducible el comportamiento del pH, lo cual se atribuyó a la presencia de materia orgánica.

ABSTRACT

Nowadays, derived from industrial activities developed in the world, the environmental pollution occurs; in this case soil contamination. To try to mitigate the damaging effect that contaminants may have into the ground, there are different alternatives of remediation, among which is the electroremediación, also known as electrokinetic treatment.

In this research was evaluated the changes of the physico-chemical properties of *in situ* electrorremediated soil in an oil industrial zone polluted by intermediated and heavy fraction of hydrocarbons, where there were a significant changes in major proportion when the phytoremediation was coupled at the end. Followed by simulation of distribution of organic pollutants in the subsurface at the beginning and end of the electro-remediation process using resistivity data.

In this research was evaluated the effect of the electric field in the Vertisol pelico soil, followed by the study of a characteristic clay contained in this soil (sodium bentonite), with the purpose of simplify the system and create a mathematical algorithm in Visual Basic that followed the movement of ions through the soil.

The mathematical model approaches the behavior to sodium bentonite, because it describes the change of pH along the cell and the electrical resistance, there is a pattern between the water content and ion displacement by electrical conductivity; although, between the physicochemical characteristics evaluated only the pH was reproducible. On other hand, the simulation of the electrical resistivity was used as a tool to indicate the presence of pollutants in soil, but it is necessary to compare these results with another analytical techniques.



Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), bajo la dirección de la Dra. Érika Bustos Bustos.

Rä 'ñuu de rä mfädi, ge'ä n'a rä 'ñuu xogi, pa ga'tho yä
'ñoho, ne yä hojä'i.



El camino del conocimiento es un sendero abierto a todos los hombres, a las
personas comunes.

Agradecimientos.

A mis padres: Marcelina Corona y Filemón Pérez; motivo de mi inspiración diaria, porque siempre me alentaron a luchar por mis sueños y me sostuvieron cuando creí que ya no podía más, mostrándome que aún ante la adversidad se puede aprender.

A mis hermanas: Cris y Chely, pues son mis compañeras y confidentes incondicionales en este camino que se llama vida, porque siempre me apoyan y sostienen en cada una de las cosas que decido emprender.

A la Dra. Érika Bustos por ser mi maestra en este proyecto, por estar conmigo siempre, por guiarme, tenerme paciencia y compartir sus conocimientos.

Al maestro Jesús Cárdenas pues siempre me acompañó con sus consejos, su conocimiento, su paciencia; porque nunca se dio por vencido ante las dificultades y me enseñó a tener siempre confianza.

Al Dr. José Rodríguez Maroto de la Universidad de Málaga, España; pues no solo compartió conmigo un poquito de lo mucho que sabe, sino que además me permitió conocer a una persona con un gran valor moral digna de admirar. Además, de que sin su ayuda no habría sido posible concretar una parte fundamental de la tesis.

Al Dr. Péter Scharek y a la Dra. Zsussana Planck por la oportunidad de conocer su trabajo y compartirlo conmigo en el Geological and Geophysical Institute of Hungary y así poder aplicarlo durante la implementación en campo.

Al comité tutorial que me siguió y asesoro desde un principio, guiándome con sus consejos y enseñanzas a lo largo de estos tres años.

A mis compañeros del grupo por su apoyo y compañía durante el desarrollo de mis estudios en especial a Rosy, Diana, Gustavo, Ruslán, Alex, Alberto.

A CIDETEQ por abrirme las puertas de la institución, por la colaboración de los investigadores, el personal administrativo y a todos pues en algún momento me brindaron su ayuda, por ello muchas gracias.

A mis amigos: Carlos, Gina, Fátima, Blanca, David y en especial a Jesús Díaz por ser mi incondicional, por quererme como me quieres gracias.

Al CONACyT por la beca otorgada sin la cual no habría sido posible concluir mis estudios.

Contenido.

1. Introducción.....	1
2. Marco Teórico.....	2
2.1 El suelo.....	2
2.2 La contaminación de suelos.....	8
2.3 Los hidrocarburos (HC).....	9
2.4 La electroremediación (ER).....	11
2.5 La fito-remediación (FTR).....	15
2.6 Resistividad eléctrica como herramienta para la simulación de la presencia de contaminantes en el suelo.....	17
2.7 Modelado matemático mediante la ecuación de Nernst-Planck.....	21
3. Antecedentes.....	23
4. Justificación.....	26
5. Hipótesis.....	28
6. Objetivos.....	29
6.1 Objetivo General.....	29
6.2 Objetivos Particulares.....	29
7. Metodología.....	30
7.1 Electro-remediación <i>in situ</i> de suelo contaminado con hidrocarburos en una zona industrial petrolera.....	30
7.2 Simulación de la presencia de hidrocarburos en suelo mediante datos de resistividad eléctrica	35
7.3 Modelación matemática del proceso de ER mediante la ecuación de Nernst-Planck empleando un arreglo de electrodos 1D.....	39
7.3.1 Creación del algoritmo matemático.....	39
7.3.2 Evaluación del efecto de la aplicación del campo eléctrico en las propiedades fisicoquímicas del suelo tipo Vertisol pélico.....	43
7.3.3 Evaluación del efecto de la aplicación del campo eléctrico en las propiedades fisicoquímicas de la bentonita sódica.....	44
7.3.4 Evaluación del modelo matemático siguiendo el comportamiento de propiedades fisicoquímicas en una celda 1D usando suelo tipo Vertisol pélico y bentonita sódica.....	45

8. Resultados.....	46
8.1 Electro-remediación <i>in situ</i> de suelo contaminado con hidrocarburos en una zona industrial petrolera.....	46
8.2 Simulación de la presencia de hidrocarburos en suelo mediante datos de resistividad eléctrica.....	62
8.3 Modelación matemática del proceso de ER mediante la ecuación de Nernst-Planck usando un arreglo de electrodos 1D.....	68
8.3.1 Creación del algoritmo matemático.....	68
8.3.2 Evaluación del efecto de la aplicación del campo eléctrico en las propiedades fisicoquímicas del suelo tipo Vertisol pélico.....	70
8.3.3 Evaluación del efecto de la aplicación del campo eléctrico en las propiedades fisicoquímicas de la bentonita sódica.....	79
8.3.4 Evaluación del modelo matemático siguiendo el comportamiento de propiedades fisicoquímicas en una celda 1D empleando suelo tipo Vertisol pélico y bentonita sódica.....	87
9. Conclusiones generales.....	95
10. Anexos.....	97
Anexo 1. Método Casida para la determinación enzimática en suelos.....	97
Anexo 2. Procedimiento para el conteo microbiano en suelo empleando un medio de agar semi-sólido.....	99
Anexo 3. Procedimientos para la caracterización fisicoquímica del suelo, empleando la NOM-021-RECNAT-2000.....	100
Anexo 4. Determinación de grasas y aceites siguiendo la NMX-AA-005-SCFI-2000....	106
Anexo 5. Código del programa creado en Visual Basic a partir de la Ecuación de Nernst-Planck para la modelación de propiedades fisicoquímicas de un suelo durante el proceso de Electro-remediación.....	102
Anexo 6. Tablas 11 y 12 extraídas de la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.....	126

Anexo 7. Resultados del contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos antes y después del proceso de ER, así como durante el proceso de FTR de los sitios muestreados.....	127
Anexo 8. Concentración de fenantreno en NaOH 0.1M a diferentes pH's.....	130
Anexo 9. Producción científica.....	131
11. Referencias.....	135

Índice de Figuras.

Figura 1. Representación esquemática de la composición del suelo [3].	3
Figura 2. Imagen de las diferentes capas o perfiles del suelo (A), fotografía del perfil de suelo tipo Vertisol pélico (B) [5, 6].	4
Figura 3. Representación esquemática de los suelos existentes en la República Mexicana, INEGI (2007).	5
Figura 4. Estructura idealizada de una esmectita (2:1) O-átomos de oxígeno; ●- grupos OH^- ; ●- átomos de silicio y ●- átomos de aluminio [4].	7
Figura 5. Valores de resistividad de rocas, suelos y minerales [50].	18
Figura 6. Representación del flujo de corriente desde una fuente de corriente y la distribución de potencial resultante [50].	19
Figura 7. Arreglo Wenner-Alfa usado en estudios de resistividad, donde K es el factor geométrico que está en función de a que representa la longitud entre electrodos.	20
Figura 8. Representación de las diferentes configuraciones de electrodos empleada, así como el contenido de grasas y aceites de cada arreglo, graficados por isolíneas de concentración [26].	24
Figura 9. Fotografías de las pruebas de ER realizadas a escala piloto in situ (A) y ex situ (B).	25
Figura 10. Fotografías del Reactor de Oxidación Avanzada tipo Fenton (A) y durante la aplicación en campo (B).	30
Figura 11. Fotografías del proceso de electro-remediación: (A) sistema en serie de 6 celdas de ER y (B) celda de ER con configuración circular.	31
Figura 12. Fotografías tomadas durante el proceso de humectación del suelo (A) y la aplicación del campo eléctrico (B).	32
Figura 13. Plano del proceso de ER en donde los círculos azules representan una zona central entre cátodo y ánodos, mientras que los rojos representan zonas entre ánodos.	34
Figura 14. Imagen representativa del resistometro Digital Ground Resistance Tester modelo 4500 de AEMC INSTRUMENTS.	35
Figura 15. Imagen del sitio contaminado en donde se aplicó el proceso de ER.	36
Figura 16. Plano esquemático que representa los puntos que se muestrearon para el seguimiento de HC en el suelo.	36
Figura 17. Fotografía tomada durante las lecturas de resistividad en suelo.	37

Figura 18. Representación esquemática de los pasos seguidos para la implementación del proceso de ER en campo.	38
Figura 19. Representación esquemática del procedimiento seguido durante la ER y validación del modelo creado a partir de la ecuación de Nernst-Planck.	42
Figura 20. Imagen de la celda 1D empleada durante la aplicación del campo eléctrico del suelo tipo Vertisol pélico.	43
Figura 21. Representación gráfica de los cambios en la clase textural del suelo antes, después de la ER y durante la FTR.	46
Figura 22. Representación gráfica del comportamiento del carbono orgánico antes del proceso de ER (A) y durante el proceso de FTR (B).	48
Figura 23. Fotografías del sitio durante el proceso de ER (A), después de la ER (B), durante la FTR (C-D). La imagen C en la zona electro-remediada se encuentra delimitada por la línea amarilla, en donde se observa el crecimiento del maíz, mientras que en la imagen D, en donde no se aplicó el tratamiento electroquímico el desarrollo del maíz fue mínimo.	49
Figura 24. Representación gráfica del contenido de hidrocarburos fracción pesada en el suelo antes (A) y después (B) del proceso de ER, así como durante la FTR (C) después de 30 días de haber desarrollado la ER.	50
Figura 25. Representación gráfica del contenido de hidrocarburos fracción media en el suelo antes (A) y después (B) del proceso de ER, así como durante el proceso de FTR (C) después de 30 días de haber desarrollado la ER.	50
Figura 26. Representación gráfica del contenido hidrocarburos aromáticos policíclicos antes (A) y al final (B) del proceso de ER.	55
Figura 27. Representación gráfica del contenido de pireno antes (A) y al final (B) del proceso de ER, así como durante la FTR (C) después de 30 días de haber efectuado la ER.	56
Figura 28. Simulación de resistividad eléctrica a diferentes profundidades, antes del proceso de ER.	63
Figura 29. Resistividad aparente del sitio contaminado (izquierdo) y electro-remediado (derecho), con una distancia de electrodos de 0.5 m.	64
Figura 30. Comportamiento de la resistividad aparente antes (izquierdo) y después (derecho) del tratamiento electrocinético, con una distancia de electrodos de 1 m.	66

Figura 31. Representación esquemática de los componentes del suelo, tomado de la referencia [76].	70
Figura 32. Representación esquemática de la interacción de los diferentes componentes del suelo, tomado de la referencia [77].	71
Figura 33. Imagen de la celda 1D empleada durante la aplicación del campo eléctrico en el suelo tipo Vertisol pélico.	72
Figura 34. Representación gráfica del comportamiento de la humedad del suelo tipo Vertisol a lo largo de la celda de ER, la línea punteada indica el valor promedio inicial.	73
Figura 35. Representación gráfica del comportamiento de la conductividad eléctrica a lo largo de la celda después de 3 h de tratamiento, la línea punteada indica el valor promedio inicial.	74
Figura 36. Representación gráfica del comportamiento del potencial ζ a lo largo de la celda de ER después de tres horas de aplicación del campo eléctrico, la línea punteada indica el valor promedio inicial.	76
Figura 37. Representación de los procesos involucrados en la ER y el efecto del potencial ζ en el flujo electroosmótico.	76
Figura 38. Representación gráfica del comportamiento del pH a través de la celda, empleando suelo tipo Vertisol pélico, la línea punteada indica el valor promedio inicial.	77
Figura 39. Fotografía de la celda empleada durante la aplicación del campo eléctrico.	80
Figura 40. Comportamiento de la humedad evaluada por triplicado a lo largo de la celda durante la aplicación de 0.02 A por un periodo de tres horas, la línea punteada representa el valor inicial promedio.	80
Figura 41. Fotografías tomadas después de la aplicación del campo eléctrico (A) 3 horas y (B) 4 horas, en donde se observa la pérdida de humedad.	81
Figura 42. Comportamiento del flujo electroosmótico a diferentes tiempos.	82
Figura 43. Comportamiento de la conductividad eléctrica después de tres horas de tratamiento, la línea punteada indica el valor inicial promedio.	83
Figura 44. Representación gráfica del potencial ζ a lo largo de la celda después de la aplicación del campo eléctrico por tres horas, la línea punteada representa el valor inicial promedio.	85

Figura 45. Representación gráfica del comportamiento del pH a lo largo de la celda, después de 3 horas de aplicación del campo eléctrico, la línea punteada representa el valor inicial promedio.....	85
Figura 46. Evaluación de la concentración de fenantreno en la sección 2 a través del tiempo.	88
Figura 47. Comportamiento del fenantreno normalizado a lo largo de la celda 1D, las barras azules representan los resultados experimentales, y las barras naranjas los valores obtenidos del modelo.....	89
Figura 48. Comparación del comportamiento de pH obtenido de las pruebas experimentales (línea verde), con respecto al modelo (línea roja).....	90
Figura 49. Representación gráfica de la resistencia eléctrica en bentonita sódica (A) y suelo tipo Vertisol pélico (B) en cada sección de la celda a las 3 h de aplicación del campo eléctrico., obtenidas por el modelo matemático; las líneas punteadas representan los valores promedios obtenidos experimentalmente.	91
Figura 50. Representación gráfica del comportamiento (A) de la concentración de los iones a lo largo de la celda obtenido mediante el modelo matemático, y (B) la CE obtenida experimentalmente para ambos suelos.....	92

Índice de tablas.

Tabla 1. Clasificación de arcillas representativas presentes en suelo de acuerdo a su carga y tipo de paquete.....	6
Tabla 2. Ejemplos de diferentes electrodos empleados para la electro-oxidación de contaminantes.....	14
Tabla 3. Comparación de remoción de HC con tres diferentes técnicas.....	23
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del suelo: antes, después del proceso de ER y durante la FTR.	47
Tabla 5. Resultados de contenido y remoción de hidrocarburos fracción media en los puntos muestreados antes y después del proceso de ER, así como durante la fito-remediación.....	52
Tabla 6. Resultados de contenido y remoción de hidrocarburos fracción pesada en los puntos muestreados antes y después del proceso de ER, así como durante la fito-remediación.....	53
Tabla 7. Concentración en mg/Kg de antraceno, benzo (g,h,i) perileno y fenantreno en los diferentes puntos de muestreo (A) antes, (B) después del proceso de ER y (C) durante la FTR.	54
Tabla 8. Propiedades Fisicoquímicas de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's) presentes en el suelo remediado [66].	57
Tabla 9: Conteo microbiológico antes y después del proceso de ER reportado en Unidades Formadoras de Colonias.....	59
Tabla 10. Actividad de la enzima deshidrogenasa del suelo medida antes y después del proceso de ER, así como durante el proceso de FTR después de 30 días de haber efectuado la ER.....	60
Tabla 11. Resumen de los valores de entrada para el modelo creado en Visual Basic, se exhiben datos para el suelo tipo Vertisol pélico y la bentonita sódica.....	69
Tabla 12. Resumen de las propiedades evaluadas del suelo tipo Vertisol pélico.	72
Tabla 13. Resumen de las características fisicoquímicas de la bentonita sódica.	79
Tabla 14. Límites máximos permisibles para fracciones hidrocarburos en suelo.....	126
Tabla 15. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo.	126
Tabla 16. Contenido de HAP's antes del proceso de ER en todos los puntos muestreados.	127

Tabla 17. Contenido de HAP's después del proceso de ER en todos los puntos muestreados.	128
Tabla 18. Contenido de HAP's durante el proceso de FTR en todos los puntos muestreados.	129

Nomenclatura.

HC, Hidrocarburos

HAP's, Hidrocarburos aromáticos policíclicos

K_{ow} , Coeficiente de partición octanol-agua

ER, Electroremediación

1D, Una dimensión

2D, Dos dimensiones

E° , Potencial estándar a 25^o C, en V

E, Potencial en V

DSA, *Dimensional Stable Anodes*, Ánodos dimensionalmente estables

J_i , Flujo total de la especie i en mol/cm³s

C_i , Concentración de la especie i en mol/cm³

φ , Diferencia de potencial en V

D_i^* , Coeficiente de difusión efectivo de la especie i en cm²/s

D_i , Coeficiente de difusión en cm²/s

τ , Tortuosidad, adimensional

n , Porosidad, adimensional

U_i^* , Movilidad iónica efectiva en cm²/Vs

z_i , Número de carga de la especie i

F, Constante de Faraday, 96485 C/equivalente

R, Constante universal de los gases, 8.314510 J/mol K

T, Temperatura absoluta en K

i , Corriente en A

k_{eo} , Coeficiente de permeabilidad electroosmótica en m²/Vs

ϵ , Permitividad del fluido en C/Vm

ζ , Potencial zeta en V

η , Viscosidad del fluido en Ns/m²

t_i , Número de transferencia o de transporte del ion i , adimensional

i_j , Corriente del ion j en A

I , Corriente total del sistema en A

K, Factor geométrico en m

a , Distancia entre electrodos en m

ρ , Resistividad aparente en $\Omega \cdot m$

R, Resistencia en Ω

f_{dif} , Flujo por difusión en mol/s

IncZ, Tamaño de la celda en cm

$\nabla\Phi$, Gradiente de potencial en V

λ , Conductividad molar en Ω/molcm^2

f_{EM} , Flujo por electromigración en mol/s

f_{eo} , Flujo por electroósmosis en mol/s

Δt , Incremento de tiempo en s

A, Área de la celda en cm^2

CE, Conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$

CIC, Capacidad de Intercambio Catiónico en Cmol/Kg

UFC, Unidades Formadoras de Colonias

FEO, Flujo electroosmótico en mL/s o cm^3/min

E_{cell} , Potencial de celda en V

CG-EM, Cromatografía de gases con espectrometría de masas

FTR, Fito-remediación

CO, Carbono orgánico en porcentaje

MO, Materia orgánica en porcentaje

$\text{p}K_a$, Constante de disociación ácida

1.Introducción.

Las emergencias ambientales más recurrentes en el país, así como la limitación de los recursos naturales, obligan a instituciones públicas y privadas a establecer métodos de remediación que hagan frente a los problemas ambientales generados por la necesidad de satisfacer el nivel de vida que actualmente lleva la población en todo el mundo.

En el caso específico para atender la contaminación de suelos, la electroremediación de suelos se presenta como una tecnología viable para reducir los tiempos de implementación, así como la facilidad de remover compuestos orgánicos e inorgánicos en matrices con baja permeabilidad, lo cual ofrece una ventaja frente a técnicas tradicionales. Es así como, la simulación y modelación de suelos surge de la necesidad de interpretar lo que sucede en la matriz del suelo durante la aplicación de un gradiente de potencial; es por ello que mediante el uso de herramientas computacionales y un modelo matemático se busca predecir el comportamiento que describa el proceso, buscado así la evaluación y representación temporal del comportamiento de un sistema de electro-remediación.

Por lo antes mencionado, los resultados de este trabajo de tesis se dividen en tres secciones, en la primera parte se detalla el proceso de electroremediación implementado en una zona industrial petrolera con 275 m² de suelo tratado, así como el acoplamiento de la fito-remediación para obtener un suelo con menor concentración de hidrocarburos evaluando los cambios en las características fisicoquímicas. Posteriormente, en la segunda sección se procedió a la simulación de la presencia de hidrocarburos en campo antes y después del proceso de electroremediación, usando para tal fin datos de resistividad eléctrica, la cual fue empleada como variable indirecta que representa el contenido de hidrocarburos en el subsuelo. Finalmente, la evaluación del efecto del campo eléctrico en una matriz real (suelo tipo Vertisol pélico) y en la bentonita sódica, debido a que de una previa caracterización se encontró que el suelo tipo Vertisol pélico contenía esta arcilla del tipo montmorillonita, es por ello que se empleó la bentonita sódica para representar el sistema mediante la modelación de la ecuación de Nernst-Planck, la cual se evaluó y validó para un arreglo de electrodos 1D (un par de electrodos) a nivel laboratorio en el suelo tipo Vertisol pélico y la bentonita sódica.

2. Marco Teórico.

2.1 El suelo.

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, su importancia radica en el hecho de que es el sustrato sobre el cual se desarrolla la vida vegetal y animal, en él se llevan a cabo diversas actividades que permiten el desarrollo de diferentes formas de vida y por lo tanto, también protege el medio ambiente, ya que actúa como filtro y transformador de los contaminantes producidos sobre todo por el hombre. De esta manera dependiendo del uso que se le dé, el suelo se puede clasificar como: agrícola, forestal, industrial y habitacional.

La naturaleza y composición de un suelo depende del clima (precipitaciones pluviales, cantidad y variaciones de temperatura), características de la roca madre, tipo de organismos que se desarrollan en ellas y el tiempo transcurrido desde que comenzó su proceso de formación (Figura 1).

Todos los suelos se componen de una serie de partículas minerales básicas, producidas por la meteorización y la descomposición de las rocas superficiales, las cuales se clasifican según su tamaño en arena muy gruesa con valores de 2.0 a 1.0 mm, arena gruesa entre 1.0 a 0.5 mm, arena fina de 0.25 a 0.10 mm, limo con valores entre 0.05-0.02 mm y arcilla con tamaños de partículas menores a 0.002 mm [1]. Sus componentes gaseosos son básicamente oxígeno, nitrógeno y monóxido de carbono; el agua que contiene puede ser higroscópica, capilar o freática de acuerdo con el tipo de suelo.

La cantidad de materia orgánica presente en el suelo depende de los restos de animales y plantas en descomposición, así como de la actividad de los organismos vivos que contiene. La descomposición de restos y residuos metabólicos dan origen a lo que se denomina humus. En la composición del humus se encuentra un complejo de macromoléculas en estado coloidal constituido por azúcares, ácidos orgánicos, minerales, etc., en constante degradación y síntesis. La descomposición del humus en mayor o menor grado, produce una serie de productos coloides que en unión con los minerales arcillosos, originan los complejos organominerales, cuya aglutinación determina la textura y estructura de un suelo. Estos coloides existentes en el suelo

presentan carga negativa, lo cual le permite absorber H^+ y cationes metálicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) e intercambiarlos en todo momento de forma reversible [2].

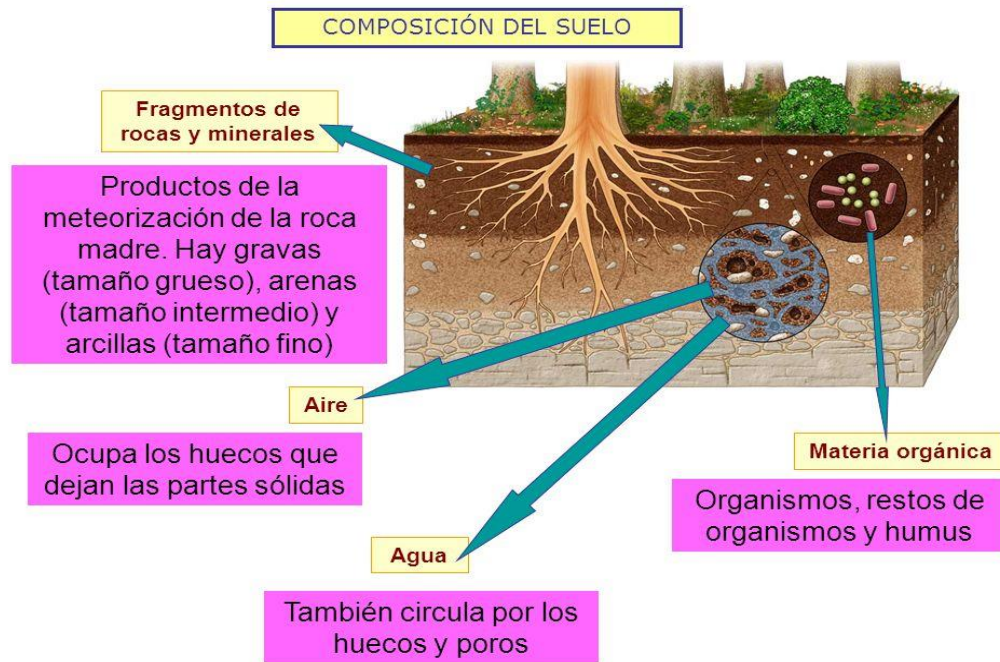


Figura 1. Representación esquemática de la composición del suelo [3].

El suelo forma una serie de capas que en secuencia se llama **perfil del suelo**, a las capas se le denominan **horizontes**. Cada uno de ellos suele tener características y propiedades diferentes en un mismo suelo. Los horizontes se delimitan por: diferencias de color, en sus propiedades físicas como textura, estructura, elementos gruesos así como por diferencias asociadas como la compactidad, plasticidad, dureza, etc. La capa u horizonte O, que es una capa de humus y es la más superficial del suelo, está formada por depósitos de material vegetal. El mantillo es la capa formada por los horizontes A-B, el A es orgánicamente rica, algunos minerales son arrastrados por el agua subterránea y el B es abundante en minerales que descienden de la capa superficial, pero con menos material orgánico. El horizonte C o capa intermedia está formada por pedazos de roca fragmentada y arena, carece de materia orgánica, finalmente el horizonte D o lecho rocoso es la capa profunda, formada por la roca madre que le da origen (Figura 2-A) [4].

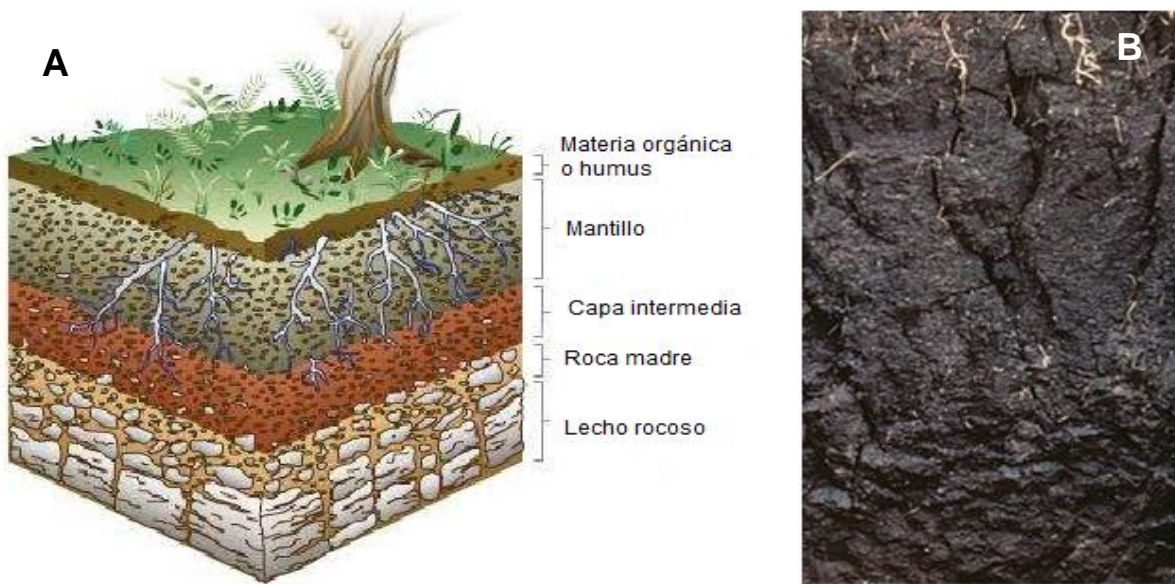
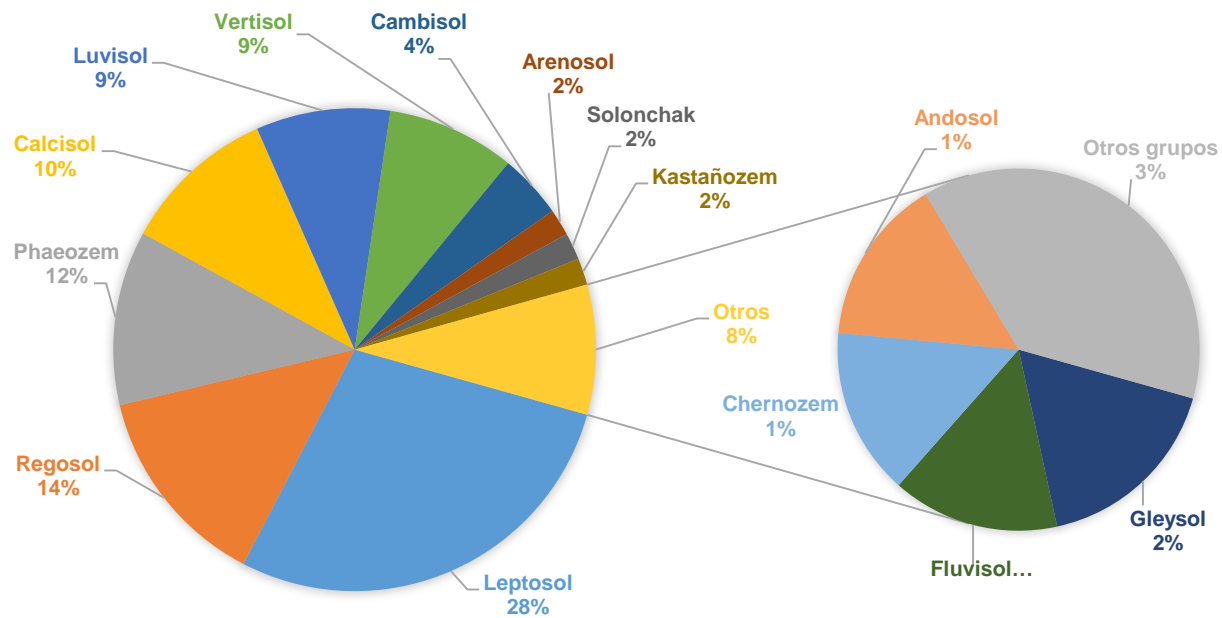


Figura 2. Imagen de las diferentes capas o perfiles del suelo (A), fotografía del perfil de suelo tipo Vertisol pélico (B) [5, 6].

De acuerdo con el INEGI (2007), México por su compleja topografía, ubicación geográfica y clima posee una gran diversidad de suelos, 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO-ISRIC-ISSS, 2007) [7].

Los suelos de mayor abundancia en México son quince (Figura 3), dominan los Leptosoles (28% del territorio), Regosoles (14%), Phaeozems (12%), Calcisoles (10%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8%) que, en conjunto ocupan el 81% del territorio nacional. Algunas características de los suelos de mayor predominancia como los Leptosoles es que son suelos muy delgados, su espesor es menor a 10 cm y descansa sobre un estrato duro y continuo como la roca o tepetate. Los Regosoles están poco desarrollados, los cuales están constituidos principalmente por material suelto semejante a la roca y su uso es principalmente forestal (INEGI, 2007).



Nota: Otros grupos incluye: Umbrisol, Durisol, Acrisol, Plamasol, Solonetz, Cypisol, Nitisol, Alisol, Lixisol, Histosol, Ferralsol y Plintosol; por su poca cobertura a nivel nacional no se incluyen en la figura.

Figura 3. Representación esquemática de los suelos existentes en la República Mexicana, INEGI (2007).

Los Vertisoles son suelos que tienen propiedades vérticas (con grietas y cuñas) que ocupan aproximadamente el 2.4% de la superficie terrestre, están igualmente distribuidas en áreas templadas y tropicales. Estos suelos son de los que sus propiedades están en función de la composición mineralógica de la fracción de arcilla, en este caso de las esmectitas presentes. La mayoría de los Vertisoles se producen en ambientes áridos y semiáridos debido al alto pH de la solución del suelo, lo que da como consecuencia grandes cantidades de bases y sílice soluble. En general, estos suelos tienen una alta capacidad de intercambio catiónico en el orden de 30-80 Cmol/Kg, el pH tiende a ser alcalino en la mayoría de los casos y los cationes dominantes son Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , estos suelos también tienen una alta cantidad de sulfitos o sulfatos [8].

El material original de un suelo tipo **Vertisol pélico** lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmectíticas expandibles con valores de entre 30-35%, este tipo de suelos presentan un color oscuro, tienen grietas anchas y profundas en

períodos de estación seca y se hinchan en contacto con el agua, resultado de grandes cantidades de arcillas montmorillonitas (Figura 2-B).

El término arcilla se utiliza para designar a un conjunto de minerales de pequeño tamaño de partícula, pertenecientes a la subclase de los filosilicatos que son aluminosilicatos hidratados con estructura en hojas, con espaciamentos y contenidos en los espacios interlaminares característicos para cada mineral. Por lo general, las arcillas tienen cargas negativas, por lo que pueden absorber agua entre las láminas, lo que hace que se expandan al humectarse y se contraigan al secarse. Estas propiedades, junto con la elevada superficie específica, hacen que los minerales de arcilla ejerzan una gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos.

Por otra parte, los filosilicatos se pueden clasificar en grupos, subgrupos y especies (Tabla 1) debido a las sustituciones isomórficas que hace que la carga de ellas sea uno de los criterios utilizados para su clasificación.

Tabla 1. Clasificación de arcillas representativas presentes en suelo de acuerdo a su carga y tipo de paquete.

Paquete tipo	Grupo x carga / unidad estructural	Subgrupo	Especie
1:1	Caolinita-serpentina x=0	Caolinitas (dioctaédrica)	Caolinita, nacrita dickita(candita)
2:1	Esmectita-saponita X=0.2-0.60	Esmectita dioctaédrica(Al) Esmectita trioctaédrica (Mg)	Montmorillonita, beidelita Saponita, hectorita, sauconita

Los minerales del grupo de las esmectitas presentan paquete o estructura 2:1 lo que les asemeja a las micas, de las que se diferencian por presentar menos sustituciones isomórficas, de ahí que la carga eléctrica de superficie sea de $x \sim 0.26-0.60$ carga por unidad de forma estructural. Los complejos de superficie con cationes hidratados son de esfera externa, por lo que los cationes son fácilmente intercambiables. De esta manera, la estructura de una esmectita puede representarse como se muestra en la Figura 4.

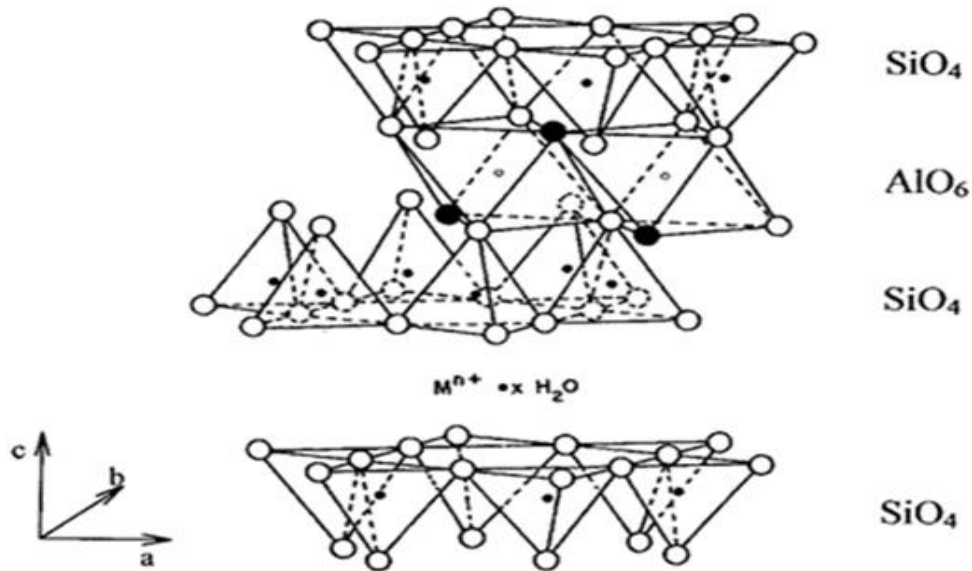


Figura 4. Estructura idealizada de una esmectita (2:1) O-átomos de oxígeno; ● - grupos OH^- ; ● - átomos de silicio y ● - átomos de aluminio [4].

Las sustituciones isomórficas definen las diferentes especies minerales dentro del grupo. La montmorillonita que es el mineral más importante de grupo, presenta una capa octaédrica con aluminio sustituido en parte por Mg^{2+} a lo que se debe la carga eléctrica; su capacidad de expansión y retracción interlamina por el humedecimiento y secado con variaciones de volumen es de 10 a 1. Por lo tanto, su estructura posibilita la hidratación de los cationes interlaminares provocando la separación de las láminas. Además, la capacidad de intercambio catiónico de las esmectitas es alta, su valor se halla en el intervalo de 80 a 150 Cmol/Kg . La superficie específica es muy elevada en el rango de 600 a 800 m^2/g , por lo que la montmorillonita es una arcilla con una actividad coloidal, plasticidad y cohesión elevadas [4].

Debido a las propiedades antes mencionadas de la montmorillonita, y a que de estudios anteriores se determinó la presencia de las bentonitas (arcillas esmectíticas) presentes en los suelos de estudio, en este caso del suelo tipo Vertisol pélico, se elige la bentonita sódica como arcilla representativa para la evaluación de los efectos del campo eléctrico y modelación del pH en suelo.

2.2 La contaminación de suelos.

La contaminación del suelo es la introducción de sustancias ajenas a él en la superficie terrestre, debido a que éstas sustancias no son degradadas o transformadas por los organismos presentes en tiempos relativamente cortos, se acumulan en niveles tales que repercuten negativamente en la vida de las especies que ahí habitan.

Las causas principales de contaminación de los suelos derivan de procesos de industrialización y/o transformación de productos para satisfacer las necesidades del hombre. Residuos domésticos e industriales, subproductos de las refinerías de petróleo, residuos nucleares, productos químicos, son algunos de los materiales que pueden ser nocivos para el suelo, debido a que pueden permanecer activos durante años.

En México, como consecuencia de varios siglos de actividad minera y posteriormente debido a la industria química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido una gran cantidad de contaminantes, los cuales han sido difíciles de cuantificar. Además, los accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias y la disposición clandestina e incontrolada de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (SEMARNAT, 2012).

De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en este tipo de emergencias se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diésel), agroquímicos, gas LP y natural.

Aunado a lo antes mencionado, el rezago en los oliductos y poliductos del país se presentan fugas y derrames donde las causas principales son la corrosión y falla del material; el atraso que existe en la tecnología de transportación ha provocado emergencias ambientales, por ejemplo Petróleos Mexicanos (PEMEX) reportó en el 2007 que se registraron 270 derrames los cuales representaron un volumen de 48200 barriles, además de 323 tomas clandestinas en donde la dependencia estimó una pérdida aproximada de 4 mil 579 millones de pesos (PEMEX, 2007).

El problema ecológico que representan estos sitios para la población y el medio ambiente, han provocado el interés de instituciones públicas y privadas para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

2.3 Los hidrocarburos (HC).

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que contienen átomos sólo de carbono e hidrogeno, se dividen en hidrocarburos alifáticos y aromáticos. Los HC alifáticos incluyen tres clases de compuestos: alcanos, alquenos y alquinos. Los alcanos son HC que tienen enlaces simples carbono-carbono, los alquenos contienen dobles enlaces carbono-carbono y los alquinos son hidrocarburos que tienen un triple enlace.

El segundo grupo lo forman los HC aromáticos, son hidrocarburos cíclicos, los cuales tienen en su estructura cíclica al benceno principalmente, son llamados así debido al fuerte aroma que caracteriza a la mayoría de ellos [9].

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) son compuestos orgánicos que se componen de anillos aromáticos simples que se han unido. Los HAP's se encuentran en el petróleo, el carbón, en depósitos de alquitrán y también como productos de la utilización de combustibles. Como contaminantes han despertado preocupación debido a que algunos compuestos han sido identificados como carcinógenos, mutágenos y teratógenos [10].

De interés especial es el fenantreno ($C_{14}H_{20}$), el cual consiste en tres anillos fusionados de bencenos, es el quinto HAP según su peso molecular (178.2 g/mol), y en su forma pura se encuentra en el humo de los cigarrillos. Este compuesto es insoluble en agua (1-1.6 g/m³), pero soluble en solventes orgánicos ($K_{ow} = 4.52$) [11].

El fenantreno al igual que el resto de los HAP's puede causar efectos agudos y crónicos al sistema nervioso central y tener un efecto cancerígeno; debido a su persistencia en el ambiente y su genotoxicidad se realizan investigaciones para remediar sitios contaminados con estos compuestos [12].

Debido a la industria petroquímica del país, la contaminación de suelos por hidrocarburos es un problema recurrente, es por ello que es necesario implementar técnicas de remediación de suelos que permitan la rehabilitación de zonas afectadas.

Las técnicas de remediación de suelos pueden ser biológicas, fisicoquímicas y térmicas; el uso de alguna en específico va a depender del tipo de suelo, el contaminante y sus características, el tiempo de aplicación así como los costos de implementación. Dentro de las técnicas fisicoquímicas empleadas para la remediación de suelos se encuentra la electroremediación (ER) o tratamiento electrocinético, la cual por su facilidad para remover diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos de matrices arcillosas representa una ventaja frente a otras; esta técnica ha tenido un incremento en su uso tanto a escala laboratorio como en campo, en el cual se emplea una configuración de electrodos 1D (un par de electrodos, ánodo y cátodo) o 2D (más de un ánodo y un cátodo) [13-15].

El uso de la electroremediación en suelos contaminados con HAP's e hidrocarburos en general puede ser especialmente útil, debido a que el transporte por electroósmosis mejora significativamente el flujo y la interacción suelo-solución-contaminante en suelos arcillosos de baja permeabilidad [16].

Las superficies minerales podrían influir crucialmente en la retención de compuestos orgánicos hidrofóbicas bajo ciertas condiciones, por ejemplo en la subsuperficie de los horizontes del suelo y sedimentos acuíferos con pequeñas cantidades de materia orgánica o en revestimientos de arcilla de rellenos sanitarios [17]. Hay varios mecanismos que tratan de explicar la sorción de los HAP's en la superficie de los minerales, entre los cuales se propone una carga inducida por interacciones dipolo-dipolo por la interacción de especies hidrofóbicas no polares como los HAP's con cargas positivas dominantes sobre las superficies de los minerales. Otra sugerencia es basada en la interacción entre sitios catiónicos y los electrones π de los anillos aromáticos. Y finalmente, se sugiere un proceso de partición promovido por la entropía de los HAP's con especies altamente hidrofóbicas, el cual es considerado como un mecanismo dominante en la sorción de solventes polares [18].

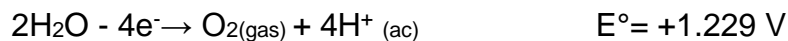
2.4 La electroremediación (ER).

La ER consiste en aplicar un gradiente eléctrico en el suelo a través del uso de un par de electrodos o varios, lo que provocara la hidrólisis del agua presente en el suelo si se emplean potenciales de celda superiores a 1V, a la par se presentan procesos como la **electromigración**, el cual es el transporte de iones hacia el electrodo de carga opuesta, el movimiento del agua de solvatación que involucra el arrastre de los iones presentes denominado **electroósmosis** y el proceso de **electroforesis** que consiste en el movimiento de partículas, bacterias o coloides presentes en el suelo [15, 19].

Otros fenómenos de transporte de masa que ocurren durante el proceso de ER, son la **difusión** que es el movimiento de las especies químicas debido a los gradientes de concentración y la **advección** generada por gradientes hidráulicos [15].

En cuanto a la electrólisis de agua, ésta ocurre sobre la superficie de los electrodos al aplicar una corriente eléctrica, lo que origina una frontera ácida ($\text{pH} \approx 2$) en el ánodo y una frontera básica ($\text{pH} \approx 12$) en el cátodo, debido a la generación de H^+ e OH^- respectivamente. Las reacciones en los electrodos son las siguientes:

En el ánodo:



Y el cátodo:



Cabe mencionar que las reacciones de electrólisis dependen del tipo y disposición de los electrodos [13], así como las especies químicas y potencial eléctrico que se aplique durante la ER. De esta manera, los protones que se generan en el ánodo avanzan a través del suelo hacia el cátodo por:

- Migración de los iones debido al gradiente eléctrico.
- Advección del fluido a través de los poros debido al flujo electroosmótico.

- Por un movimiento del fluido a través de los poros del suelo debido a una diferencia de potencial hidráulico generado internamente o aplicado externamente.
- A la difusión por la existencia de gradientes químicos.

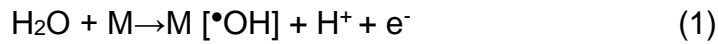
El medio alcalino desarrollado en el cátodo avanza hacia el ánodo por migración iónica y difusión, por lo que el transporte de OH^- se ve opacado por el flujo electroosmótico y la neutralización por los H^+ , que van hacia el cátodo donde los iones pueden recombinarse para formar agua [15].

La aplicación del gradiente eléctrico produce cambios físicos, químicos y electroquímicos complejos en suelos arcillosos que afectan la transferencia de masa y la eficiencia total del tratamiento, no obstante aún no es posible entender bien estos procesos [16].

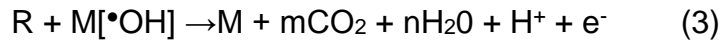
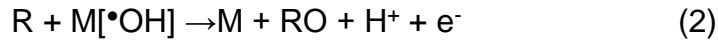
El aplicar una corriente eléctrica puede inducir reacciones redox en la superficie de los electrodos, resultando en la destrucción o transformación de compuestos orgánicos. En ausencia de algún compuesto orgánico oxidable, el oxígeno es producido y en presencia de compuestos orgánicos oxidables, la reacción de oxidación toma lugar [20], siempre y cuando se empleen potenciales de celda superiores a 1V.

El interés de usar la oxidación electroquímica es basado en la habilidad que tiene éste de reaccionar sobre los contaminantes, específicamente con un amplio rango de compuestos orgánicos con uno o dobles enlaces usando el efecto de la corriente directa e indirecta. En la oxidación anódica directa, donde los compuestos orgánicos pueden ser destruidos en la superficie del electrodo, es favorecida mediante el empleo de ánodos dimensionalmente estables (DSA) y en la oxidación indirecta, es donde un mediador es generado electroquímicamente para llevar a cabo la oxidación. De esta manera, se puede desarrollar una conversión electroquímica o combustión electroquímica. La conversión electroquímica solo puede transformar los contaminantes orgánicos no biodegradables a compuestos biodegradables; mientras que la combustión electroquímica produce H_2O y CO_2 , por lo cual no es requerido un tratamiento posterior. En esta investigación se consideró la oxidación anódica; empleando ánodos de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$; los cuales al formar radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) pueden promover la destrucción de los contaminantes orgánicos en la superficie del electrodo [21].

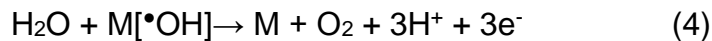
De esta manera, la oxidación anódica se lleva a cabo en dos pasos: la primera reacción (1) es la oxidación de la molécula del agua para la formación de los radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) adsorbidos sobre sitios activos sobre el electrodo “M”:



Subsecuentemente, la reducción de compuestos orgánicos “R” es mediada por radicales hidroxilo adsorbidos (2), y puede resultar en una reacción de oxidación completa:



Donde “RO” representa la oxidación de la molécula orgánica, la cual puede promover la oxidación por radicales hidroxilo, mientras estos son producidos continuamente en el ánodo. La acumulación de $\bullet\text{OH}$ favorece la reacción de combustión (3). Las ventajas de usar los radicales hidroxilo es debido a que son especies capaces de oxidar numerosos complejos orgánicos, químicamente no oxidables o difícilmente oxidables y a su manera eficiente de reaccionar con los dobles enlaces $-\text{C}=\text{C}-$ y atacar los núcleos aromáticos (los cuales son el mayor componente refractario de los HAP’s). Sin embargo, durante la oxidación anódica de contaminantes orgánicos existen reacciones competitivas (reacciones parasitas) que pueden tomar lugar y limitar la formación de radicales hidroxilo, como la formación de oxígeno molecular (4).



La reacción (4) puede ser minimizada usando los electrodos apropiados como Pt, $\text{IrO}_2|\text{Ti}$, $\text{RuO}_2|\text{Ti}$ y $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$, que son usados como materiales anódicos y tienen una buena estabilidad química, así como un tiempo de vida prolongado [21].

Estos materiales han sido empleados para la electro-oxidación de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en aguas, suelos, concreto y otros medios, en la Tabla 2 se presentan algunos ejemplos.

Tabla 2. Ejemplos de diferentes electrodos empleados para la electro-oxidación de contaminantes.

Contaminante	Electrodos	Potencial (V)	Remoción (%)	Tiempo	Referencia
HAP's y fenol.	Pt y Ti	NR	NR	NR	[22]
Hexaclorobenceno, flouranteno, fenantreno y hexano.	Ti	1.5 V/cm	NR	10 días	[23]
Cadmio.	Mallas de Ti/Ru	20 V	99	Diferentes tiempos	[24].
Hydrocarburos.	Ánodo: IrO ₂ - Ta ₂ O ₅ Ti y cátodo Ti	20 V	95	4 horas	[25, 26]

NR indica no reportado.

Debido a lo anterior y a las ventajas que ofrece la ER; la modelación y simulación de suelos puede emplearse como una herramienta que permita predecir e interpretar lo que sucede en una matriz sólida durante la aplicación de un campo eléctrico. Es así como el uso de herramientas computacionales y modelos matemáticos podrían describir el proceso, mediante la evaluación y representación temporal del comportamiento del contaminante en la electro-remediación [27-30].

De pruebas experimentales se sabe acerca de la eficiencia de aplicar un campo eléctrico a suelos contaminados [19, 31]. Sin embargo, es limitado el conocimiento en cuanto a lo que sucede mientras se está aplicando el campo eléctrico. Lo que se conoce hasta el momento y se ha reportado en la literatura, es que durante la electroremediación se observan zonas en donde el contaminante no es removido y sitios en donde decrece la concentración de éstos [26]; en los sitios en donde no se aprecia una disminución del contaminante se atribuye a la propia heterogeneidad del suelo, en la cual al aplicar un gradiente de potencial intervienen fenómenos biológicos, geológicos e hidrológicos al mismo tiempo [32, 33].

Derivado de lo anterior, en esta tesis doctoral se buscó implementar la modelación matemática del proceso de electroremediación, el cual ha sido dirigida principalmente a la remoción de metales pesados y el movimiento de los iones, despreciando en algunos casos los efectos de los procesos de electroósmosis [27-29].

2.5 La fito-remediación (FTR).

El proceso de fito-remediación es una técnica de remediación biológica que consiste en aprovechar la capacidad de ciertas plantas para reducir *in situ* la concentración y/o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el suelo, sedimentos, agua y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y sus microorganismos asociados que conducen a la reducción, mineralización, degradación y/o volatilización de dichos contaminantes [34]. Esta técnica fue acoplada después del proceso de implementación en campo de la ER, con la finalidad de incrementar la calidad y salud del suelo posteriormente de aplicado el campo eléctrico.

La calidad y la salud de los suelos se mide a través de distintos indicadores que evalúan su funcionamiento [35]. Para medir la calidad se considera que tan adecuadas son sus propiedades físicas y químicas para permitir el intercambio de gases, la retención de humedad y de nutrientes, la penetración de raíces, entre otros. Para medir la salud del suelo se toma en cuenta la eficiencia de procesos como los ciclos de nutrientes y los flujos de energía. Uno de los indicadores que se ha utilizado es la magnitud de la actividad de diferentes enzimas involucradas en los procesos antes mencionados [36].

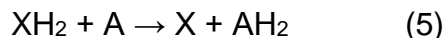
Las enzimas son moléculas de naturaleza proteínica producidas por los seres vivos y que se encargan de acelerar reacciones químicas o hacer posibles aquellas reacciones que de otra manera no se producirían. La velocidad de la reacción catalizada por una enzima depende del pH, de la fuerza iónica, de la temperatura y la presencia o ausencia de inhibidores [37].

La actividad enzimática del suelo es importante porque refleja el estado en el que se encuentran sus poblaciones microbianas y su relación con la biología del suelo, la producción de biomasa, la degradación de contaminantes y la conservación de ecosistemas [38, 39].

La principal actividad de las deshidrogenasas es eliminar átomos de hidrógeno de la molécula del sustrato y transferirlos a un cofactor o coenzima que es reducido al recibir dichos átomos. Las deshidrogenasas están presentes en todos los seres vivos, en particular en levaduras y bacterias. Son claves en el metabolismo energético de las células, ya que participan en la glucólisis, la fermentación y el ciclo de Krebs [40].

La actividad de la deshidrogenasa ha sido utilizada como un indicador de la actividad microbiana del suelo [41, 42]. Se ha encontrado una correlación positiva entre esta actividad y el contenido de hidrocarburos en el suelo. En una primera fase se observa un aumento de la actividad de las deshidrogenasas en el suelo como reflejo de la adaptación y el crecimiento exponencial de los microorganismos, debido a la disponibilidad de nuevas fuentes de carbono introducidas por los hidrocarburos. Posteriormente y como consecuencia de la biodegradación, esta actividad decrece cuando el contenido de hidrocarburos disminuye debido a una menor disponibilidad de los compuestos [43]. La actividad enzimática de las deshidrogenasas se utiliza para comparar suelos naturales, de cultivo y suelos contaminados; basados en que la oxidación biológica de compuestos orgánicos se realiza mediante procesos de des-hidrogenación que se lleva a cabo a través de la enzima deshidrogenasa [36].

La determinación de la actividad de la deshidrogenasa es un reflejo de las actividades oxidativas de la microflora del suelo [44, 45]. Esta enzima intracelular está asociada a los microorganismos proliferantes y no es estabilizada por los coloides inorgánicos (arcillas) y orgánicos (sustancias húmicas) del suelo [46]. Esta enzima es la encargada de la oxidación biológica de los compuestos orgánicos mediante el proceso de deshidrogenación; el cual procede según la siguiente reacción general (5):



Donde XH_2 es un compuesto orgánico dador de hidrógenos y A es el correspondiente aceptor de los mismos [47, 48]. Por lo anteriormente mencionado como pruebas complementarias al proceso de remediación aplicado en campo se evaluó la actividad enzimática y crecimiento bacteriano en el suelo después del proceso de ER y durante el proceso de FTR con la finalidad de evaluar su calidad y salud después de implementadas la técnicas de ER y FTR.

Es durante la implementación en campo que se empleó la simulación mediante resistividad eléctrica para obtener una apreciación de la distribución de los contaminantes orgánicos en el suelo, por ello a continuación se describe en que consiste esta herramienta.

2.6 Resistividad eléctrica como herramienta para la simulación de la presencia de contaminantes en el suelo.

El estudio de resistividad eléctrica en el suelo es una técnica popular en exploración geofísica por su fácil aplicación y la eficiente adquisición de datos. La técnica es ampliamente usada en el subsuelo, ingeniería civil e investigaciones ambientales, hidrológicas y geológicas [49]. La simulación comprende la generación de un sistema imaginario que trata de reproducir el entorno real con base en la observación de su comportamiento, para detectar las interferencias relacionadas a las características del sistema real representado. La simulación es una imitación del comportamiento que tendría la resistividad a través del tiempo.

La finalidad del análisis de resistividad eléctrica es determinar la distribución de éste en el subsuelo, la cual está relacionada con varios parámetros geológicos como el contenido de minerales, arcilla, fluidos, porosidad y el grado de saturación de agua tanto en rocas, como en el suelo [50, 51].

La resistividad eléctrica del subsuelo varía de 10-100 $\Omega.m$ y depende de la concentración de sales disueltas, en el caso de agua de mar la baja resistividad (0.2 $\Omega.m$) se debe al alto contenido de sal. La resistividad eléctrica de diferentes tipos de minerales y materiales se muestra en la Figura 5, ésta va a depender del cuerpo del mineral o de si son cristales individuales pues la naturaleza del cuerpo tiene un efecto significativo. Los HC como el xileno tienen valores altos de resistividad eléctrica ($6.998 \times 10^{16} \Omega.m$), pero si el porcentaje de HC en el suelo y en las rocas es pequeño podría ser posible que no hubiera un efecto significativo en la resistividad total [50].

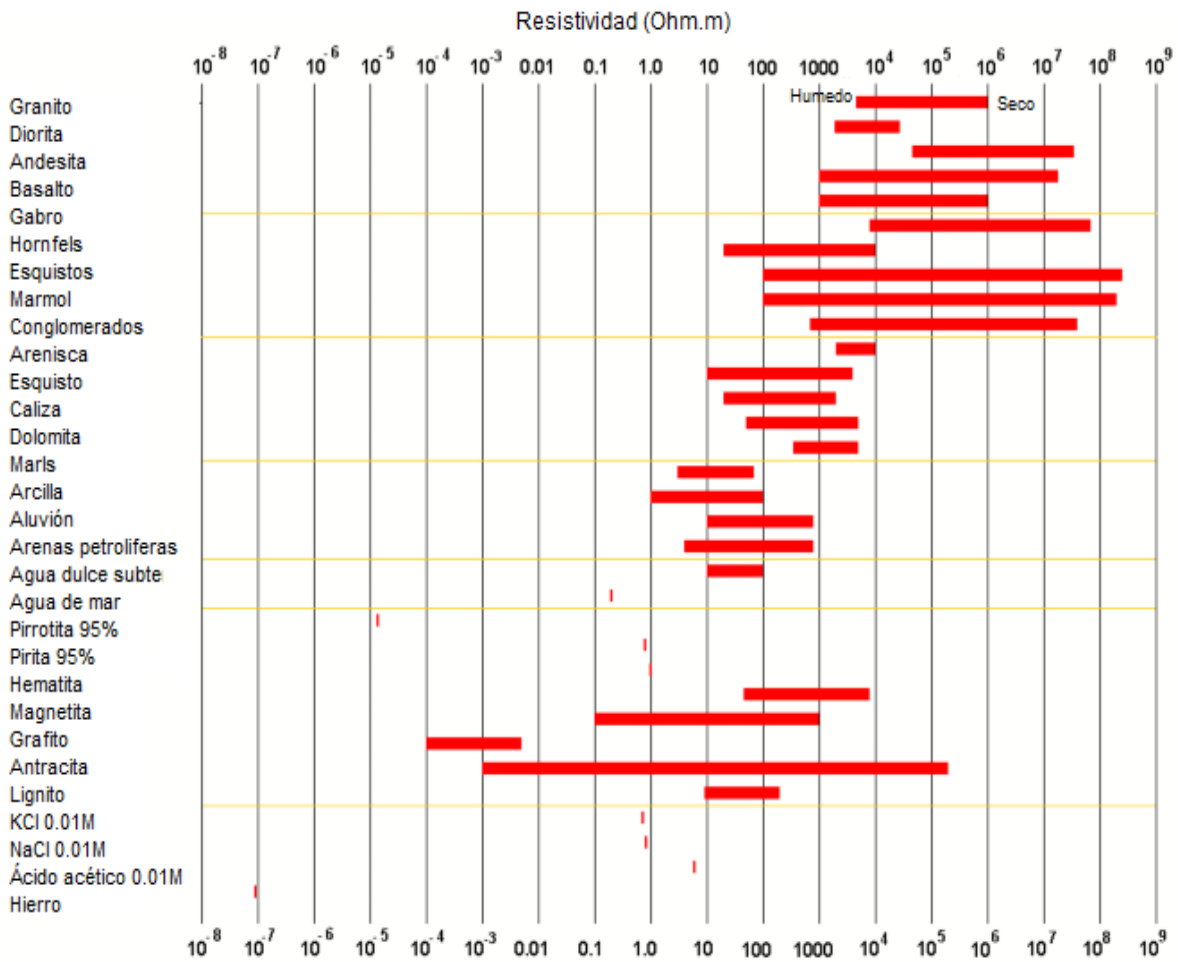


Figura 5. Valores de resistividad de rocas, suelos y minerales [50].

En la Figura 6 se presenta un caso simple de una subsuperficie homogénea y una sola fuente de corriente en la superficie del suelo, en este caso la corriente fluye radialmente lejos de la fuente y la variación del potencial es inversamente proporcional con la distancia de la fuente de corriente [50].

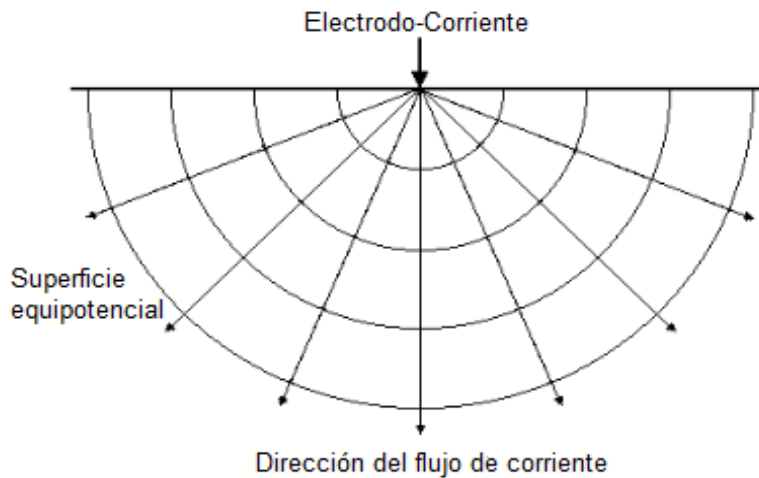


Figura 6. Representación del flujo de corriente desde una fuente de corriente y la distribución de potencial resultante [50].

El propósito de estudios de resistividad eléctrica es determinar la distribución de resistividad en la subsuperficie para hacer medidas en la superficie del suelo, de estas medidas se puede estimar la resistividad de la subsuperficie.

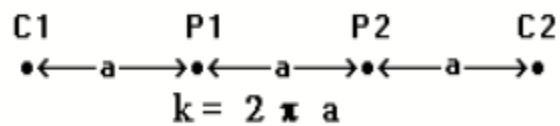
El valor de resistividad de la subsuperficie no es un valor real, pero si un valor aparente de la resistividad homogénea del suelo; que da el mismo valor de resistencia para el mismo arreglo de electrodos. La ley física fundamental usada en los estudios de resistividad eléctrica es la Ley de Ohm que gobierna el flujo de corriente en el suelo, además de considerar el potencial eléctrico, la densidad de corriente y el área del sitio muestreado. Una forma reducida para el caso del arreglo Wenner-Alfa, se expresa en la Ecuación 1, la cual hace una aproximación a la resistividad aparente mediante diferencias finitas y elementos finitos [50].

Es importante mencionar que el análisis de resistividad eléctrica mediante el empleo de imágenes 1D y 2D creadas computacionalmente es cualitativo, y la cual depende de otros estudios complementarios para una mejor interpretación de la zona de análisis.

Como ya se mencionó, los resultados que se obtienen de resistividad eléctrica se basan en el empleo de diferentes arreglos de electrodos, la elección del mejor arreglo depende del estudio de campo a ser mapeada, la sensibilidad del equipo y el nivel de ruido. En la práctica, los arreglos más usados para estudios de imagen 1D y 2D son: Wenner-Alfa, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger, polo-polo y polo-dipolo. Entre las características del

arreglo se debe de considerar: la profundidad del estudio, la sensibilidad del arreglo en cambios horizontales y verticales en la resistividad del subsuelo y la intensidad de la señal [50, 52, 53].

En este trabajo de tesis doctoral se empleó el arreglo Wenner-Alfa (Figura 7) también llamado solo Wenner, en donde un arreglo de 4 electrodos permite tres posibles permutaciones en la posición de electrodos y tiene contornos casi horizontales por debajo del centro de la matriz, debido a esta propiedad el arreglo es relativamente sensible a los cambios verticales en la resistividad del subsuelo y menos sensible a cambios horizontales [49].



*Figura 7. Arreglo Wenner-Alfa usado en estudios de resistividad, donde **K** es el factor geométrico que está en función de **a** que representa la longitud entre electrodos.*

Empleando el método Wenner, el valor de resistividad aparente ($\Omega \cdot m$) puede ser calculado empleando la fórmula reducida:

$$\rho = 2\pi a R$$

Ecuación 1

En donde la R es la resistencia medida como V/I en Ω y a es la distancia entre electrodos en metros [50]. Los datos de resistividad aparente son introducidos al programa RES2MOD que mediante aproximaciones matemáticas devuelve como resultado una aproximación gráfica del comportamiento de resistividad en el subsuelo.

Debido a lo anterior, se establece entonces que la modelación matemática empleando la ecuación de Nernst-Planck y la simulación de resistividad eléctrica en el suelo pueden emplearse como herramientas que permitan tratar de explicar los procesos asociados a la imposición de un campo eléctrico y visualizar el comportamiento de los procesos de transporte, así como la distribución del contaminante en el suelo mediante la resistividad eléctrica.

2.7 Modelado matemático mediante la ecuación de Nernst-Planck.

La modelación partirá de un sistema real y usando la ecuación de Nernst-Planck describirá el transporte de materia entre los electrodos aplicando un campo eléctrico mediante la migración, difusión y convección. Estas tres formas de transporte de materia para cualquier especie química en el suelo se pueden expresar como:

$$J_i = D_i^* \nabla C_i + U_i^* \tau n C_i \nabla \phi + k_{eo} C_i \nabla \phi \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde J_i (mol /cm³ s) involucra el flujo total de las especies i en el sistema, C_i (mol /cm³) es la concentración de la especie i y ϕ (V) es la diferencia de potencial aplicado. Los términos a la derecha de la expresión representan el transporte por difusión, electromigración y electroósmosis respectivamente [27, 30].

Por otra parte, el flujo por difusión se encuentra expresado en términos de D_i^* (cm²/s) que es el coeficiente de difusión efectivo de la especie i , directamente relacionado con el coeficiente de difusión (D_i) de la especie i , la tortuosidad y porosidad del suelo representados como τ y n respectivamente, ambos adimensionales.

$$D_i^* = D_i \tau n \quad \text{Ecuación 3}$$

En contraparte, la electromigración se encuentra afectada por U_i^* (cm²/Vs) que representa la movilidad iónica efectiva, el subíndice i considera un ión específico, D_i es el coeficiente de difusión, z_i la carga, F la constante de Faraday (96485 C/equivalente), R la constante universal de los gases (8.314510 J/mol K) y T (K) representa la temperatura absoluta.

$$U_i^* = \frac{D_i z_i F}{RT} \quad \text{Ecuación 4}$$

Y el proceso de electroósmosis está en función de la permeabilidad electroosmótica:

$$k_{eo} = \left[\frac{\varepsilon \zeta n}{\eta} \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde k_{eo} (m²/Vs) es la permeabilidad electroosmótica, ε (C/Vm) es la permitividad del fluido, (ζ) es el potencial zeta (V), η (Ns/m²) es la viscosidad del fluido y n la porosidad del suelo.

De esta manera, la sumatoria de los procesos involucra el transporte total del sistema, donde la difusión considera gradientes de concentración, el flujo electroosmótico puede

ser obtenido mediante el valor de permeabilidad electroosmótica o medido experimentalmente, y el proceso de electromigración en este caso en particular está basado en el número de transporte.

El número de transporte (t_j) o de transferencia de un ión se define como la fracción de la corriente transportada por un ión en específico (i_j) respecto a la corriente total del sistema y está en función de su movilidad iónica, concentración y la fuerza iónica del electrolito en el fluido del poro.

$$t_j = \frac{i_j}{I} = \frac{z_j c_j u_j}{\sum z_i c_i u_i} \quad \text{Ecuación 6}$$

El asumir que el número de transporte de todos los iones del suelo en el fluido del poro podría ser igual a uno, formaliza la dependencia del número de transporte de un ión individual sobre su movilidad iónica, concentración y la concentración total del electrolito en el fluido del poro. A medida que transcurre la aplicación del campo eléctrico, el número de transferencia de las especies podría incrementarse, así como la concentración iónica de especies específicas incrementa. Esto implica que la concentración de las especies decrece relativamente de la concentración total del electrolito en el fluido del poro, lo cual implicaría que el transporte y la remoción de contaminantes bajo la aplicación de un campo eléctrico podría ser menos eficiente [15].

Por lo antes mencionado y la complejidad de un suelo heterogéneo; el intentar representar los cambios ocurridos en la matriz sólida durante la aplicación del campo eléctrico se vuelve una tarea difícil, debido a la interacción de todos los factores involucrados, es por ello que se considera la modelación a escala laboratorio para tratar de reducir y controlar las variables. Por otra parte, la modelación de un suelo real a nivel campo bajo estas condiciones sería una misión realmente compleja, es por ello que se recurre a la simulación de alguna propiedad del suelo, la cual se pueda relacionar con la presencia o ausencia de contaminantes, en este caso en específico se considera a la resistividad eléctrica del suelo.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Anexo 6. Tablas 14 y 15 extraídas de la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

Tabla 14. Límites máximos permisibles para fracciones hidrocarburos en suelo.

Fracción de hidrocarburos	Uso de suelo predominante (mg/Kg base seca)		
	Agrícola, forestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial
Ligera	200	200	500
Media	1200	1200	5000
Pesada	3000	3000	6000

Tabla 15. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo.

Hidrocarburos Específicos	Uso de suelo predominante (mg/Kg base seca)		
	Agrícola, forestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	10
Benzo(a)pireno	2	2	10
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	10
Benzo(a) antraceno	2	2	10
Benzo(b)fluoranteno	2	2	10
Benzo(k) fluoranteno	8	8	80
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2	2	10

Anexo 7. Resultados del contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos antes y después del proceso de ER, así como durante el proceso de FTR de los sitios muestreados.

Tabla 16. Contenido de HAP's antes del proceso de ER en todos los puntos muestreados.

ANTES DE ELECTRO-REMEDIACIÓN																	
HAP's (mg/Kg)																	
Compuesto	1B	2B	3B	4B	5B	1D	2D	3D	4D	5D	1F	2F	3F	4F	5F	LDM(1)	LPC(2)
Acenaftaleno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	0.43	5.03
Acenaftileno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	0.86	4.99
Antraceno	N.D.	6,62	5.94	6.17	6.67	9.86	5.91	7.27	6.49	4.15	N.D	N.D	4.70	6.44	5.91	1.99	5.01
Benzo(a) antraceno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	0.82	4.95
Benzo (b) flouranteno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	0.28	4.98
Benzo (k) flouranteno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	0.39	5.01
Benzo (g,h,i) perileno	7.36	6.98	4.93	6.23	6.42	7.23	5.36	6.23	5.57	4.75	7.97	7.40	6.53	6.86	5.36	1.16	4.93
Benzo (a) pireno	18.03	18.23	13.02	14.96	14.87	17.69	12.24	15.36	13.90	9.23	19.31	18.06	14.42	16.66	12.80	1.10	5.00
Criseno	23.68	N.D	15.54	21.18	21.48	31.11	N.D	18.20	23.75	9.90	24.67	23.68	17.82	22.47	16.48	0.67	4.95
Dibenzo (a,h) antraceno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	0.65	4.96
Flouranteno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	1.20	5.03
Fluoreno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	2.74	N.D	N.D	N.D	N.D.	4.84	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	2.01	4.93
Indeno (1,2,3-cd) pireno	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	1.09	5.00
Naftaleno	N.D.	N.D	N.D	3.17	3.37	N.D	N.D	N.D	3.31	3.48	N.D	N.D	3.26	3.50	3.48	0.28	4.93
Fenantreno	11.29	6.48	5.43	4.52	11.06	37.96	12.10	9.62	5.26	N.D.	59.47	24.87	6.40	3.92	8.28	1.07	4.98
Pireno	46.67	31.69	26.16	39.74	39.47	66.98	24.07	31.07	41.50	14.52	57.62	47.96	25.52	29.47	31.51	1.01	5.01

N.D. No detectable y <LDM.

(1) LDM= Límite de detección del método.

(2)LPC= Límite de cuantificación práctico.

Tabla 17. Contenido de HAP's después del proceso de ER en todos los puntos muestreados.

DESPUÉS DE ELECTRO-REMEDIACIÓN																	
HAP's (mg/Kg)																	
Compuesto	1B	2B	3B	4B	5B	1D	2D	3D	4D	5D	1F	2F	3F	4F	5F	LDM(1)	LPC(2)
Acenaftaleno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.85	10.06
Acenaftileno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.72	9.99
Antraceno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	6.12	4.31	4.39	N.D.	N.D.	4.66	4.62	N.D.	N.D.	3.99	10.01
Benzo(a) antraceno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.63	9.90
Benzo (b) flouranteno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.56	9.96
Benzo (k) flouranteno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.78	10.02
Benzo (g,h,i) perileno	4.22	3.91	3.70	3.14	2.34	4.51	3.99	4.14	4.18	N.D.	4.86	4.12	4.81	N.D.	2.35	2.32	9.86
Benzo (a) pireno	7.03	8.70	8.70	7.49	5.05	9.54	8.61	8.27	8.57	5.30	9.56	9.32	9.04	N.D.	5.54	2.20	9.99
Criseno	7.84	13.68	18.15	11.67	6.13	27.21	27.84	13.27	10.87	7.35	25.56	20.44	14.81	N.D.	5.04	1.35	9.91
Dibenzo (a,h) antraceno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.29	9.92
Flouranteno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.41	10.07
Fluoreno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4.03	9.86
Indeno (1,2,3-cd) pireno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.18	10.00
Naftaleno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.55	9.86
Fenantreno	N.D.	2.49	4.44	2.44	N.D.	34.18	29.08	N.D.	N.D.	N.D.	22.26	9.68	5.96	N.D.	N.D.	2.14	9.97
Pireno	7.84	10.13	18.33	9.23	3.61	41.14	35.82	4.48	7.11	3.76	44.21	19.01	14.62	N.D.	3.70	2.02	10.02

N.D. No detectable y <LDM.

(1) LDM= Límite de detección del método.

(2)LPC= Límite de cuantificación práctico.

Tabla 18. Contenido de HAP's durante el proceso de FTR en todos los puntos muestreados.

DURANTE FITO-REMEDIACIÓN																	
HAP's (mg/Kg)																	
Compuesto	1B	2B	3B	4B	5B	1D	2D	3D	4D	5D	1F	2F	3F	4F	5F	LDM(1)	LPC(2)
Acenaftaleno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.85	10.06
Acenaftileno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.72	9.99
Antraceno	N.D.	5.93	5.41	5.89	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4.55	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3.99	10.01
Benzo(a) antraceno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.63	9.90
Benzo (b) flouranteno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.56	9.96
Benzo (k) flouranteno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.78	10.02
Benzo (g,h,i) perileno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.32	9.86
Benzo (a) pireno	N.D.	10.37	7.55	N.D.	N.D.	N.D.	7.06	4.58	N.D.	N.D.	11.88	4.70	N.D.	N.D.	N.D.	2.20	9.99
Criseno	23.51	17.04	23.02	25.61	6.33	32.69	12.15	N.D.	9.12	19.78	30.16	7.42	9.99	4.88	5.51	1.35	9.91
Dibenzo (a,h) antraceno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.29	9.92
Flouranteno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.41	10.07
Fluoreno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4.03	9.86
Indeno (1,2,3-cd) pireno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.18	10.00
Naftaleno	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.55	9.86
Fenantreno	13.45	9.26	18.49	10.88	N.D.	41.49	5.37	N.D.	N.D.	8.25	66.48	2.42	N.D.	N.D.	N.D.	2.14	9.97
Pireno	29.35	12.78	31.83	28.43	4.67	44.51	15.68	N.D.	6.76	32.58	43.90	9.24	4.00	6.73	2.93	2.02	10.02

N.D. No detectable y <LDM.

(1) LDM= Límite de detección del método.

(2)LPC= Límite de cuantificación práctico.

Anexo 8. Concentración de fenantreno en NaOH 0.1M a diferentes pH's.

Contaminar la bentonita sódica con una solución de CH_2Cl_2 y fenantreno a una concentración de 150 mg/L, por un periodo de 24 horas se mantienen en contacto. Posteriormente dejar que el CH_2Cl_2 sobrenadante se evapore y que se seque la bentonita sódica. Se humecta ahora con NaOH 0.1M a diferentes pH's (4-6-8-10-12) y se mezcla perfectamente, se mantiene en contacto por 24 horas. Finalmente se realiza una separación de las fases, al líquido sobrenadante se le realiza una extracción líquido-líquido con CH_2Cl_2 el extracto obtenido se analiza por CG-EM (Cromatografía de gases con espectrometría de masas) para cuantificar la concentración de fenantreno solubilizado a los diferentes pH's evaluados.

Anexo 9. Producción científica.

1. Artículos Indizados.

1.1 “*Electrokinetic Treatment of Polluted Soil at Pilot Level Coupled to an Advanced Oxidation Process of Its Wastewater*”. B. Ochoa, L. Ramos, A. Garibay, M. Pérez – Corona, M. C. Cuevas, J. Cárdenas, M. Teutli and E. Bustos. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 2016, 68-76. ISSN: 1474-7065. I. F. 1.477.

1.2 “*The Cone Penetration Test and 2D Imaging Resistivity as Tools to Simulate the Distribution of Hydrocarbons in Soil*”. M. Pérez-Corona, J. A. García, G. Taller, D. Polgár, E. Bustos and Z. Plank. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 2016, 87-92. ISSN: 1474-7065. I. F. 1.477.

1.3 “*Evaluation of IrO₂-Ta₂O₅/Ti electrodes employed during the electroremediation of hydrocarbons-contaminated soil.*” Maribel Pérez-Corona, Arturo Corona, Elías Daniel Beltrán, Jesús Cárdenas y Erika Bustos. *Sustainable Environment Research*, 2013, 279 – 284. ISSN: 1022-7630, I.F. = 0.6.

1.4 “*Electroremediation of hydrocarbons-Contaminated Vertisol type soil employing different electrode configurations*”. Maribel Pérez-Corona, Elías Daniel Beltrán, Santiago Castro, Jorge Luis Corona, Jesús Cárdenas y Erika Bustos. *Sustainable Environment Research*, 2013, 285 – 288. ISSN: 1022-7630, I.F. = 0.6.

2. Capítulos de Libro.

2.1 “*Electrokinetic Treatment of Polluted Soil by Hydrocarbon: from laboratory to field*”. Capítulo del libro: “Soil Contamination”. M. Pérez-Corona, Z. Plank and E. Bustos. 2016. ISBN 978-953-51-4874-6.

2.2 “*Electrokinetic Remediation of Polluted Soil Using Nano-materials: Nano-iron Case*”. Capítulo del libro “Evaluation of Electrochemical Reactors as a New Way to Environmental Protection”. R. A. Herrada, M. Pérez – Corona, R. A. Shrestha, S. Pamukcu and E. Bustos. Editores Juan M. Peralta – Hernández, Manuel A. Rodrigo – Rodrigo and Carlos A. Martínez – Huitle. Ed. Research Signpost, 2014, 37/661. ISBN: 978-81-308-0549-8. Kerala, India.

2.3 *“Comparison of Different Arrangements of Electrodes during the Electrokinetic Treatment of Polluted Soil with Hydrocarbons and Its Final Application in situ.”* Capítulo 4 del libro “Recent Research Development in Electrochemistry”. M. Pérez-Corona, B. Ochoa, J. Cárdenas, G. Hernández, S. Solís, R. Fernández , M. Teutli and E. Bustos. Transworld Research Network, 37 / 601, 2, 2013, 59 – 80. ISBN 978-81-7895-594-0.

3. Artículos de Divulgación.

3.1 *“Magyar – mexikói TÉT együttműködés az intézetben”.* Erika Bustos Bustos, Juan Manríquez Rocha y Maribel Pérez Corona. Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI), Instituto de Geología de Hungría Stefánia, Budapest, Hungría. <http://www.elgi.hu/hu/node/1097> Del 13 al 19 de septiembre del 2014.

4. Registros de Patente.

4.1 *“Equipo y Proceso de Tratamiento Electrocinético con un Arreglo de Electrodo Circular para la Rehabilitación Biológica de Suelo Contaminado con Compuestos Orgánicos in situ y on site ”.*Erika Bustos Bustos, Maribel Pérez Corona, Brenda Ochoa Méndez y Jesús Cárdenas Mijangos. 10 de enero del 2014, número MX/a/2014/000833.

5. Asistencia a congreso nacional e internacional por invitación.

5.1 *“Rehabilitación Electrocinética de Suelos Contaminado con Hidrocarburos Acoplado con un Proceso de Oxidación Avanzada para Re-uso del Agua del Tratamiento”.* Maribel Pérez Corona, Jesús Cárdenas Mijangos, Claudia Ríos Álvarez, Sara Solís Valdéz, Gilberto Hernández Silva, Zsuzsanna Planck, Vera Zsabo, Zoltan Fejes, Erika Bustos Bustos. XXII Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica, San José, Costa Rica, del 14 al 18 de marzo del 2016 (Conferencia).

5.2 *“Evaluación del Tratamiento Electrocinético en una Matriz de Bentonita Simulando el Comportamiento de Propiedades Físicoquímicas en un Reactor con una Configuración de Electrodo 1D”.* Maribel Pérez Corona, José Miguel Rodríguez Maroto, César Gómez

Lahoz, Sara Solís Valdéz, Gilberto Hernández Silva, Erika Bustos Bustos. XXII Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica, San José, Costa Rica, del 14 al 18 de marzo del 2016 (Poster).

5.3 *“The Cone Penetration Test and 2D Imaging Resistivity as Tools to Simulate the Distribution of hydrocarbon in Soil”*. M. Pérez-Corona, J. A. García, G. Taller, D. Polgár, Z. Plank and E. Bustos. Symposium 10: Electrochemical Technology: New Challenges for a More Competitive Economy. 66th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry. Taipéi, Taiwan, 4 to 9 October, 2015 (Poster).

5.4 *“Electrokinetic Treatment of Polluted Soil by Gasoline at Pilot Level Couple with an Advanced Oxidation Process of Residual Water”*. Luis Ramos Huerta, Andrés Garibay Cordero, Brenda Ochoa Méndez, Maribel Pérez Corona, Jesús Cárdenas Mijángos y Erika Bustos Bustos. 13th Symposium on Electrokinetic Remediation. University of Málaga. Del 7 al 10 de septiembre del 2014 en Málaga, España (Poster).

5.5 *“Electro-remediación in situ de suelo contaminado con hidrocarburo”*. M. Pérez Corona, B. Ochoa Méndez, J. Cárdenas Mijangos y E. Bustos Bustos. XXIII Congreso Técnico Científico ININ - SUTIN. El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y el Sindicato Único de Trabajadores de la Industria Nuclear en Toluca, Edo. de Méx., del 4 al 6 de diciembre del 2013 (Poster).

6. Apoyo en formación de talento humano.

6.1 Estancia de Investigación de Laura Cecilia Cruz Santos con el tema *“Caracterización Física de Suelo Contaminado y Electro-remediado Procedente de una Zona Industrial de Refinación”*. Abril, 2016, CIDETEQ.

6.2 Estancia de Investigación de Juana Rueda Ramírez con el tema *“Caracterización Química de Suelo Contaminado y Electro-remediado Procedente de una Zona Industrial de Refinación.”* Abril, 2016, CIDETEQ.

6.3 Estancia de Investigación de Rosa Luz Carbajal López con el tema “*Evaluación de los parámetros fisicoquímicos de suelo contaminado con hidrocarburo después de un tratamiento electrocinético*”. Agosto, 2015. CIDETEQ

6.4 Estancia de Investigación de Braulio Raúl García Díaz con el tema “*Electroremediación de suelo contaminado por hidrocarburos empleando electrodos modificados con nano-partículas de Fe y nanotubos de TiO₂*”, Agosto, 2014, CIDETEQ.

6.5 Estancia de Investigación de Mariana Aguilar Fausto con el tema “*Evaluación de parámetros fisicoquímicos durante la electroremediación de suelos contaminados por hidrocarburos*”. Agosto, 2014, CIDETEQ.

6.6 Estancia de Investigación de Oswaldo Cuevas Zavala con el tema “*Mediciones de la resistividad en suelo antes, durante y después del proceso electrocinético de suelo contaminado con hidrocarburo*”. Agosto, 2014, CIDETEQ.

11. Referencias

1. González Reyes, J., *Elementos para la Interpretación Agronómica de algunas Determinaciones Analíticas de Suelos*. 1993, San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis potosí, Instituto de investigación de zonas desérticas, Departamento de Edafología. 1-9.
2. Higuera, P. and R. Oyarzun. *Mineralogía y procesos de contaminación de suelos: Materia Orgánica*. 2016; Available from: http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema03/Tema_03_Suelos_3_4.htm.
3. Juárez Sanz, M., J. Sánchez Andreu, and A. Sánchez Sánchez, *Química del Suelo y Medio Ambiente*. 2006: Universidad de Alicante.
4. Porta, J., M. López-Acevedo, and C. Roquero, *Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente.*, ed. Mundi-Prensa. 2003, Madrid. 960.
5. C., R. *Perfil de Suelo*. 2016; Available from: <http://es.slideshare.net/ceroal/presentacin-perfil-del-suelo-cesar-rodriguez>.
6. J.J., I. *El Perfil del Suelo*. 2008; Available from: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/10/02/102439>.
7. INEGI. *El Suelo*. 2016; Available from: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/suelo.aspx?tema=T>.
8. Ward, C., *Encyclopedia of Soil Science*. 2008, Dordrecht, The Netherlands: Springer.
9. Harvey, R.G., *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Chemistry and Carcinogenicity*. 1991, Cambridge/ New York/ Port Chester/ Melbourne/ Sydney: Cambridge University Press.
10. Arzayus, K., R. Dickhut, and E. Canuel, *Fate of atmospherically deposited polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chesapeake Bay*. *Environ. Sci. Technol.*, 2001. **35**: p. 2178-2183.
11. Dabestani, R. and I.N. Ivanov, *A compilation of physical, spectroscopic and photophysical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons*. . *Photochemistry and photobiology*, 2009. **70**(1): p. 10-34.

12. Laflamme, R.E. and R.A. Hites, *The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1978. **42**: p. 289-303.
13. Turer, D. and A. Genc, *Assessing effect of electrode configuration on the efficiency of electrokinetic remediation by sequential extraction analysis*. Elsevier, 2004: p. 167-174.
14. De la Rosa Pérez, D., M. Teutli Leon, and M. Ramirez Islas, *Electro-remediación de Suelos Contaminados, una Revisión Técnica para su Aplicación en Campo*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2007. **23**.
15. Acar, B.Y. and N.A. Alshwabkeh, *Principles of Electrokinetic Remediation*. *Environ. Sci. Technol.*, 1993. **27**(13): p. 2638-2647.
16. Reddy, R.K. and E. Saichek, *Enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from clay soil by periodic electric potential application*. *Environmental Science and Health*, 2004. **A39**(5): p. 1189-1212.
17. Müller, S., K.U. Totsche, and I. Kögel-Knabner, *Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to mineral surfaces*. *European Journal of Soil Science*, 2007. **58**: p. 918-931.
18. Tunega, D., et al., *Model Study on sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to goethite*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009. **330**: p. 244-249.
19. Reddy, K.R. and C. Cameselle, *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*. 2009, United States of America: A John Wiley & Sons, INC.
20. Comninellis, C. and C. Pulgarin, *Electrochemical oxidation of phenol for wastewater treatment using SnO₂*. *Applied Electrochemistry* 1993. **23**: p. 108-112.
21. Tran, L.H., et al., *Electrochemical degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote solution using ruthenium oxide on titanium expanded mesh anode*. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. **164**: p. 1118-1129.
22. Alcántara, M.T., et al., *Combined treatment of PAHs contaminated soil using the sequence extraction with surfactant-electrochemical degradation*. *Chemosphere*, 2008. **70**: p. 1438-1444.
23. Pham, T.D., et al., *Combinated ultrasonication and electrokinetic remediation for persistent organic removal from contaminated kaolin*. *Electrochimica Acta*, 2009. **54**: p. 1403-1407.

24. Shen, Z., et al., *Comparison of electrokinetic soil remediation methods using one fixed anode and approaching anodes*. Environmental Pollution, 2007. **150**: p. 193-199.
25. Ochoa, B., et al., *Electrokinetic treatment of polluted soil at pilot level coupled to an advanced oxidation process of its wastewater*. Physics and Chemistry of the Earth, 2016. **91**: p. 68-76.
26. Pérez-Corona, M., *Electro-remediación de suelo contaminado con hidrocarburo in situ*. 2012, CIDETEQ S.C.: Querétaro, México. p. 198.
27. J.M. Paz-García, et al., *Simulation-based analysis of the differences in the removal rate of chlorides, nitrates and sulfates by electrokinetic desalination treatments*. Electrochimica Acta, 2013. **89**: p. 463-444.
28. J.M. Paz-García, et al., *Modeling of electrokinetic processes by finite element integration of the Nernst-Planck-Poisson system of equations*. Separation and Purification Technology, 2011. **79**: p. 183-192.
29. J.M. Paz-García, et al., *Modeling of electrokinetic desalination of bricks*. Electrochimica Acta, 2012. **86**: p. 213-222.
30. Paz-García, J.M., et al., *A generalized model for transport of contaminants in soil by electric fields*. Journal of Environmental Science and Health, 2012. **47**: p. 308-318.
31. Saichek, R.E. and K.R. Reddy, *Electrokinetically Enhanced Remediation of Hydrophobic Organic Compounds in Soils: A review, Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2005, Taylor & Francis: USA. p. 115-192.
32. Rucks, L., et al., *Propiedades Físicas del Suelo*. 2004, Montevideo, Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica.
33. Jordán López, A., *Manual de Edafología*. 2006: Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.
34. Delgadillo-López, A.E., et al., *Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution*. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2011. **14**: p. 597-612.
35. Doran, J.W., et al., *Determinants of soil quality and health*, in *Soil quality and soil erosion* Rattan, Editor. 1999: Florida, EUA.

36. Martínez, M.M., et al., *Técnicas para el análisis de actividad enzimática de suelos*, in *Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos*. 2016.
37. Burns, R.G., *Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology*. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982. **14**: p. 423-427.
38. Doran, J.W., *Soil health and global sustainability, translating science into practice*. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002. **88**: p. 119-127.
39. Gianfreda, L. and P. Ruggiero, *Enzyme activities in soil*, in *Nucleic acids and proteins in soil*, P. Nannipieri and K. Smalla, Editors. 2006, Springer: Alemania.
40. Ríos-Velázquez, C., et al., eds. *Deshidrogenasas*. ed. D.d. Biología. 2008, Universidad de Puerto Rico: Puerto Rico.
41. Barajas-Aceves, M., *Ensayos de metabolismo microbiano en suelo: actividad deshidrogenasa y tasa de mineralización de nitrógeno*, I.N.d. Ecología, Editor. 2008, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales México.
42. Ramírez-Romero, P. and A. Mendoza-Cantú, *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México*, I.N.d. Ecología, Editor. 2008, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales: México.
43. Margesin, R., *Determination of enzyme activities in contaminated soil*, in *Manual for soil analysis monitoring and assessing soil bioremediation*, R. Margesin and F. Schinner, Editors. 2005, Springer: EUA.
44. Ladd, J., *Origin and range of enzymes in soils*, in *Soil Enzymes*, R. Burns, Editor. 1978, Academic Press Inc: New York. p. 51-96.
45. Skujins, J., *History of abiotic soil enzyme research*, in *Soil enzymes*, R. Burns, Editor. 1978, Academic Press Inc: London. p. 1-49.
46. Rossel, D., et al., *Use of enzymes in soil ecotoxicology: a case for deshydrogenase and hydrolytic enzymes*, in *Soil Ecotoxicology*, J. Tarradellas, G. Bitton, and D. Rossel, Editors. 1997, Lewis: Boca Raton, Florida. p. 179-206.
47. Trevors, J., *Dehydrogenase activity in soil. A comparison between the INT and TTC assay* *Soil Biology and Biochemistry*, 1984. **16**: p. 673-674.
48. Acosta, Y. and J. Paolini, *Actividad de la enzima deshidrogenasa en un suelo calciorthids enmendado con residuos orgánicos*. *Agronomía Tropical (online)*, 2005. **55**(2): p. 217-232.

49. Dahlin, T. and B. Zhou, *A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays*. Geophysical Prospecting, 2004. **52**(5): p. 379-398.
50. Loke, M.H., *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys* 2001.
51. Rucker, D.F., M.T. Levitt, and W.J. Greenwood, *Three-dimensional electrical resistivity model of a nuclear waste disposal site*. Applied Geophysics, 2009. **69**: p. 150-164.
52. Loke, M.H., et al., *Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method*. Applied Geophysics, 2013. **95**: p. 135-156.
53. Zhou, W., F.B. Beck, and A.L. Adams, *Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography*. Environmental Geology, 2002. **42**(8): p. 922-928.
54. López, G.I., *Estudio comparativo de tres diferentes métodos de remediación de suelo tipo Gleysol contaminado con hidrocarburo*. 2011, CIDETEQ: Querétaro. p. 155.
55. Romero, L.O., *Estudio Cinético y Termodinámico de Electroodos Empleados en Electro-remediación de Suelo Contaminado con Hidrocarburo*. 2011, CIDETEQ: Querétaro.
56. Scialdone, O., et al., *Electrochemical oxidation of organics at metal oxide electrodes: The incineration of oxalic acid at IrO₂-Ta₂O₅ (DSA-O₂) anode*. Electrochimica Acta, 2009. **54**: p. 1210-1217.
57. Barrón, F. and I. Labastida, *Determinación experimental de la influencia de dos diferentes electrolitos sobre las variables que influyen directamente en el proceso de electrorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en una celda estandarizada a nivel laboratorio*. 2005, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco: México, D.F.
58. Ramírez, D.V., *Caracterización y Posterior Remediación Electro-cinética de Suelo Tipo Vertisol Pélico Contaminado con Hidrocarburo Procedente de una Zona Industrial*, in *Electroquímica*. 2010, CIDETEQ: Querétaro. p. 181.
59. Saichek, E. and K.R. Reddy, *Effect of pH control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil*. Chemosphere, 2003. **51**: p. 273-287.

60. Chang, J. and S. Cheng, *The operation characteristics and electrochemical reactions of a specific circulation-enhanced electrokinetics*. Hazardous Materials 2007. **141**: p. 168-175.
61. Méndez-Albores, E., *Estudio de la interacción suelo- hidrocarburo durante un proceso de electro-remediación*. 2012, CIDETEQ: Querétaro, México. p. 200.
62. García-Melo, J.A., *Construcción del modelo de partición de fenantreno en montmorillonita antes y después del proceso de electro-remediación en condiciones básicas*. 2011, CIDETEQ: Querétaro, México. p. 114.
63. Durán, A., et al., *Propiedades físico-químicas de los suelos*. Universidad de la República de Uruguay: Uruguay.
64. Zuñiga, L.A.G., et al., *Comparación de la capacidad de remoción de fenantreno y la actividad enzimática radical superficial de cultivos radicales (in toto e in vitro) de Cyperus elegans* Polibotanica, 2005. **20**: p. 31-45.
65. Tran, L.H., et al., *Electrolytic Oxidation of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons from Creosote Solution Using Ti/IRO₂ and Ti/SNO₂ Circular Mesh Electrodes*. Environmental Engineering, 2009. **135**(10): p. 1051-1062.
66. McElroy, A.E., J.W. Farrington, and J.M.Teal, *Metabolism of PAH in the Aquatic Environment*, ed. U. Varanasi. 1989, Boca Raton: CRC Press.
67. Salazar, S.P., *Detección y degradación de hidrocarburos polinucleoaromáticos en agua por un cultivo aerobio mixto*, in *Facultad de Ingeniería*. 2010, Universidad Nacional Autónoma de México México. p. 95.
68. Wyszowska, J. and J. Kucharski, *Biochemical properties of soil contaminated by petrol* Polish Journal of Environmental Studies, 2000. **9**: p. 479-485.
69. Rodríguez-Zavala, J.S., *Determinación del paso limitante en aldehído deshidrogenasas atípicas de Escherichia coli*. Educación Bioquímica 2006. **25**: p. 26-27.
70. Casida, L.E., D.A. Klein, and T. Santoro, *Soil dehydrogenase activity*. Soil Science, 1964. **98**: p. 371-376.
71. Casida, L.E., *Microbial metabolic activity in soil as measured by dehydrogenase determinations* Applied and Environmental Microbiology, 1977. **34**: p. 630-636.
72. Henríquez, C., et al., *Actividad enzimática del suelo-deshidrogenasa, B-glucosidasa, fosfatasa y ureasa-bajo diferentes cultivos*. Agronomía Costarricense, 2014. **38**(1): p. 43-54.

73. Inga, R.A. and C.C. Farfán, *Biodegradación de Petróleo Diesel*. 2008, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallos: Lambayeque.
74. Fukue, M., et al., *Use of resistivity cone for detecting contaminated soils layers* Engineering Geology 2001. **60**: p. 361-369.
75. Chou, H., et al., *Evaluation of solute diffusion tortuosity factor models for variously saturated soils* Water Resources Research, 2012. **48**(W10539).
76. Alda, F.L. *Meteorización y edafogénesis*. 2014; Available from: <http://entenderlaciencia.blogspot.com>.
77. PEMEX, ed. *El Petróleo* Gerencia de Información y Relaciones Públicas. 1988: México.
78. Okke, M., *Electrokinetically induced removal of heavy metals from an aged, contaminated sludge- a laboratory experiment* 2011, Universiteit Utrecht.
79. Acar, B.Y. and A.N. Alshwabkeh, *Electrokinetic remediation. I. Pilot-scale test with lead-spiked kaolinite*. Geotech Eng, 1996: p. 173-185.
80. Lageman, R., W. Pool, and G. Seffinga, *Electro-reclamation: theory and practice*. Chemistry and Industry, 1989. **18**: p. 585-590.
81. Ho, S.V., et al., *Scale-up aspects of the LasagnaTM process for the in situ soil decontamination*. Hazard Mater, 1997. **55**: p. 39-60.
82. Asadi, A., et al., *Theory of Electroosmosis in Soil*. Electrochemical Science, 2013. **8**: p. 1016-1025.
83. Instruments, M., *Zetasizer Nano Series, User Manual*. 2004: England.
84. Yukselen, Y. and A. Kaya, *Zeta potential of kaolinite in the presence of alkali, alkaline earth and hydrolyzable metal ions*. Water, Air and Soil Pollution, 2003. **145**: p. 155-168.
85. Zamboni, C., et al., *Caracterización de Ácidos Húmicos y Fúlvicos de un Mollisol bajo dos coberturas diferentes*. REvista Colombiana de Química, 2006. **35**(2): p. 191-203.
86. Vane, L.M. and G.M. Zang, *Effect of aqueous phase properties on clay particle zeta potential and electro-osmotic permeability: Implications for electrokinetic soil remediation processes*. Journal of Hazardous Materials, 1997. **55**: p. 1-22.
87. Shapiro, A.P. and R.F. Probst, *Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis*. Environmental Science and Technology 1993. **27**(2): p. 283-291.

88. Lindgren, E.R., E.D. Mattson, and M.W. Kosak, *Electrokinetic remediation of unsaturated soils*. American Chemical Society, 1994. **Series 554**: p. 33-50.
89. Laursen, S., *Laboratory investigation of electroosmosis in bentonites and natural clays* Can. Geotec. J., 1997. **43**: p. 664-671.
90. García R. E. and S.B. M. *Las arcillas: propiedades y usos.*; Available from: www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.
91. Kaya, A. and Y. Yukselen, *Zeta potential of soils with surfactans and its relevance to electrokinetic remediation*. Journal of Hazardous Materials, 2005. **B120**: p. 119-126.
92. Narasimhan, B. and R.S. Ranjan, *Electrokinetic barrier to prevent subsurface contaminant migration: theoretical model development and validation*. Journal of Contaminant Hydrology, 2000. **42**: p. 1-17.
93. Lan-Houng, T., et al., *Electrochemical degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote solution using ruthenium oxide on titanium expanded mesh anode*. Journal of Hazardous Materials 2009. **164**: p. 1118-1129.
94. Lima, T.A., et al., *Assessing PAH removal from clayey soil by means of electroosmosis and electrodialysis*. Science of the Total Environment, 2012. **435**(436): p. 1-6.
95. Lima, T.A., J.P.G. Loch, and K. Heister, *Suitability of electro-remediation for clean-up of PAH-contaminated clays*, in *World Congress of Soil Science. Soil Solutions for a Changing World*. 2010: Brisbane, Australia.
96. J., S.C.M., *Microbiología de Suelos: Técnicas, métodos y medios de cultivo*, F.d.E.S.Z. UNAM, Editor. 2004: México.
97. SEMARNAT, *NOM-021-SEMARNAT-2000, Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestro y análisis*. 2002, Diario Oficial: México.
98. Inalbon, M.R., *Procedimientos analíticos para suelos normales y salinos*, E.E. Agropecuaria, Editor. 2005: Argentina.