



**CENTRO DE INVESTIGACION Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO EN
ELECTROQUÍMICA, S.C.**

**"COMPARACIÓN DE LAS MEDICIONES DE
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y EXTRACCIÓN
SOXHLET PARA EVALUAR LA REHABILITACIÓN
POR ELECTRO-FITORREMEDIACIÓN
DE UN LEPTOSOL CONTAMINADO CON
HIDROCARBURO."**

TESIS PRESENTADA POR:

**ING. RUBÉN FERNANDO
VALENCIA RODRÍGUEZ**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
EN LA ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**



Santiago de Querétaro, Qro., México, Marzo de 2024



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

Dra. Erika Bustos Bustos

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo con todo mi cariño a:

Mi familia:

Mis padres José Manuel Valencia García y Dulce María Rodríguez Posadas y mis herman@s Dulce, María Luisa Valencia y Jose Manuel, gracias por creer en mí, por su apoyo incondicional, por su amor y compañía en cada etapa de mi vida, este logro es por y para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la realización de mis estudios de maestría.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C. (CIDETEQ) por abrirme las puertas y permitirme seguir formarme como profesionista.

A mi asesora, la Dra. Erika Bustos Bustos por su apoyo, confianza, por representar una inspiración profesional para mí y por brindarme las herramientas necesarias para la elaboración de este trabajo.

A mi comité tutorial por su contribución y seguimiento en el desarrollo de este trabajo. En especial al Dr. Bacame, por su apoyo y consejo cuando lo necesité.

Al personal administrativo y de servicios de CIDETEQ.

Al Centro de Geociencias de la Universidad Autónoma de México (UNAM). A la M. en C. Sara Solís por su paciencia, apoyo y enseñanza en el laboratorio de edafología.

A la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji. A los doctores Eduardo Hernández Sánchez, Jose Alberto García Melo y la alumna Paola Betzai Rodríguez Mendoza, por su apoyo en la experimentación de campo y en la realización de este trabajo.

A mi amiga y compañera de laboratorio, Rosy, por su apoyo y por hacer las horas en el laboratorio más amenas. A mis amigos: Olivares, Jari, Irán, Alejandro, Pamela, Michell, Ricardo, Samantha, Arlet, Rafa y David. Gracias por acompañarme en esta etapa, por las horas de distracción, por brindarme su amistad y estar conmigo en mi día a día. A mis compañeros de laboratorio, Carlos, Moises, Adrián y Víctor. Agradezco su apoyo y compañía durante mi estancia en CIDETEQ.

RESUMEN

En México, el robo de combustible provoca el vertimiento de los hidrocarburos en el suelo mediante la alteración de los tubos por donde se transporta, esto afecta negativamente la calidad de los suelos a su alrededor. Para la detección de plumas por contaminantes orgánicos estudios geo-eléctricos como el de resistividad, proponen ser una técnica práctica y rápida en comparación con estudios químicos de laboratorio. El presente trabajo evaluó la eficiencia de la medida de resistividad eléctrica en un seguimiento de remediación de suelo contaminado de hidrocarburos por acciones de robo de combustible al comparar los resultados obtenidos con los observados en la prueba química de extracción Soxhlet. El tratamiento se realizó empleando la electrofitoremediación como técnica ambiental en un suelo Leptosol del municipio de Tetepango, Hidalgo, con la cual se logró una remoción del 40% del hidrocarburo durante 55 días de tratamiento. Realizando un análisis estadístico se determinó un coeficiente de correlación positivo mayor a 0.70 en todas las muestras de suelo estudiadas. Esto corroboró la alta relación entre las variables de resistividad eléctrica y la masa de hidrocarburos/g de suelo, sosteniendo que, ante la presencia del hidrocarburo por un derrame reciente, los valores de resistividad del suelo aumentan. Aunado a la prueba geofísica y química se emplearon estudios fisicoquímicos y microbiológicos, con el fin de sustentar el comportamiento de la resistividad eléctrica y la presencia del hidrocarburo en las muestras de suelo antes y después de aplicar la electro-fitoremediación.

ABSTRACT

In Mexico, the fuel theft causes the dumping of hydrocarbons on the ground by altering the tubes through which it is transported, this negatively affects the quality of the soil around it. For the detection of plumes due to organic contaminants, geo-electrical studies such as resistivity studies propose to be a practical and rapid technique compared to laboratory chemical studies. The present work evaluated the efficiency of the electrical resistivity measurement in a follow-up remediation of soil contaminated with hydrocarbons due to fuel theft actions by comparing the results obtained with those observed in the Soxhlet chemical extraction test. The treatment was carried out using electro-phytoremediation as an environmental technique in a Leptosol soil in the municipality of Tetepango, Hidalgo, with which a removal of 40% of the hydrocarbon was achieved during 55 days of treatment. By performing a statistical analysis, a positive correlation coefficient greater than 0.70 was determined in all the soil samples studied. This corroborated the high relationship between the electrical resistivity variables and the g of hydrocarbons/g of soil, maintaining that, in the presence of hydrocarbon from a recent spill, the soil resistivity values increase. In addition to the geophysical and chemical test, physicochemical and microbiological studies were used, to support the behavior of electrical resistivity and the presence of hydrocarbon in the soil samples before and after applying electro-phytoremediation.

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado
●OH	
1D	Una dimensión.
2D	Dos dimensiones.
CA	Cerca del Ánodo.
CC	Cerca del Cátodo.
CE	Conductividad Eléctrica en dS/m.
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico en Cmol/Kg.
ER	Electro-remediación.
EFR	Electro-fitoremediación.
M	Concentración molar = mol•L ⁻¹
MO	Materia orgánica.
mL	Mililitro
NMO	Norma Oficial Mexicana.
NMX	Norma Mexicana.
RE	Resistividad eléctrica
SCTRL	Suelo Control.
SC	Suelo Contaminado.
SSSA	Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
USCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. El suelo	5
2.1.1. Composición y clasificación del suelo	5
2.1.2. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo	9
2.2. Leptosol	22
2.3. Contaminación del suelo	23
2.3.1. Fuentes de contaminación del suelo.....	24
2.4. Hidrocarburos	26
2.4.1. Contaminación del suelo por hidrocarburos	27
2.5. Delimitación de suelos contaminados por hidrocarburos empleando tecnologías geofísicas	29
2.5.1. Métodos geoelectrónicos	30
2.5.2. El método de resistividad eléctrica	34
2.6. Determinación de hidrocarburos en suelos contaminados, empleando tecnologías químicas	37
2.6.1. Extracción Soxhlet	38
2.7. Remediación de suelos contaminados	39
2.7.1. Tratamientos físicos de remediación	40
2.7.2. Tratamientos químicos de remediación	41
2.7.3. Tratamientos biológicos de remediación	42
2.8. Electroremediación	43
2.8.1. Electromigración	44
2.8.2. Electroósmosis	44
2.8.3. Electroforesis	44
2.9. Fitorremediación	45
2.9.1. Tecnologías de fitorremediación	46
2.9.2. Electro-fitorremediación	46
3. ANTECEDENTES	50
3.1. Método de resistividad eléctrica en estudios geofísicos ambientales.	51
3.2. Método de electro-remediación	52
3.3. Método de fitorremediación	53
4. JUSTIFICACIÓN	55
5. HIPÓTESIS	58
6. OBJETIVOS	58
6.1. Objetivo general	58
6.2. Objetivos específicos	58
7. METODOLOGÍA	60
7.1. Zona de estudio	62
7.1.1. Localización	62
7.1.2. Geografía y geología	63
7.1.3. Clima	64

7.1.4. Agricultura	64
7.2. Muestro	64
7.3. Aplicación de la electro-fitoremediación <i>in situ</i>	66
7.3.1. Celda electroquímica	66
7.3.2. Elección de electrodos para electro-remediación	66
7.3.3. Electro-remediación	67
7.3.3. Fitorremediación	68
7.4. Caracterización fisiológica del <i>Zea mays</i>	69
7.4.1. Porcentaje de germinación	69
7.4.2. Altura de la planta	70
7.4.3. Diámetro del tallo	70
7.5. Caracterización Edafológica	70
7.5.1. Determinación de materia orgánica	71
7.5.2. Determinación de conductividad eléctrica	72
7.5.3. Determinación de fósforo disponible	73
7.5.4. Determinación de capacidad de intercambio catiónico	74
7.5.5. Determinación de textura por el método de Bouyoucous	75
7.5.6. Determinación de actividad enzimática deshidrogenasa	77
7.5.7. Determinación de bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na)	78
7.6. Análisis microbiológico de las muestras de suelo	82
7.7. Caracterización de la resistividad eléctrica del suelo	82
7.8. Caracterización de hidrocarburos totales por extracción Soxhlet	83
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	85
8.1. Resultados fisiológicos de <i>Zea mays</i>	86
8.2. Resultados edafológicos	90
8.2.1. pH (en agua y en KCl)	92
8.2.2. Conductividad eléctrica	94
8.2.3. Materia orgánica y carga orgánica	95
8.2.4. Capacidad de intercambio catiónico	97
8.2.5. Cationes intercambiables (Ca ⁺² , Mg ⁺² y K ⁺)	98
8.2.6. Fósforo	100
8.2.7. Sodio (Na ⁺)	101
8.2.8. Actividad enzimática de la deshidrogenasa en el suelo	102
8.2.9. Textura	103
8.3. Resultados microbiológicos	104
8.4. Resultados de resistividad eléctrica	107
8.5. Resultados de extracción soxhlet	110
8.6. Resultados de resistividad eléctrica vs Soxhlet	113
9. CONCLUSIONES	117
10. BIBLIOGRAFÍA	120

<i>Figura 2.1. Triangulo de clases texturales.....</i>	11
<i>Figura 2.2. Horizontes estructurales del suelo</i>	13
<i>Figura 2.3. Clasificación de suelos según el índice de pH</i>	17
<i>Figura 2.4. Rutas potenciales interrelacionadas para la contaminación química.</i>	25
<i>Figura 2.5. Diagrama esquemático que muestra la clasificación de los PHC</i>	27
<i>Figura 2.6. Principio básico de los métodos geoeléctrico</i>	31
<i>Figura 2.7. Esquema del arreglo tipo Dipolo-Dipolo</i>	32
<i>Figura 2.8. Esquema del arreglo tipo Wenner</i>	32
<i>Figura 2.9. Esquema del arreglo tipo Schlumberger</i>	33
<i>Figura 2.10. Esquema de un SEV</i>	35
<i>Figura 2.11. Esquema de una calicata eléctrica</i>	36
<i>Figura 2.12. Esquema de los componentes del extractor Soxhlet</i>	39
<i>Figura 2.13. Esquema representativo del proceso de electro-remediación</i>	43
<i>Figura 2.14. Esquema representativo las técnicas de la fitorremediación en las plantas</i>	46
<i>Figura 7.1. Diagrama de la metodología seguida para llevar a cabo la caracterización de suelos</i>	61
<i>Figura 7.2. Ubicación del municipio de Tetepango en el estado de Hidalgo</i>	62
<i>Figura 7.3. Ubicación de la zona de estudio en localidad de Juandho, Tetepango, Hidalgo, México</i>	63
<i>Figura 7.1. Esquema de la distribución de los puntos de muestreo en la celda electroquímica y el suelo control para datos de resistividad eléctrica y extracción Soxhlet</i>	65
<i>Figura 7.4. Esquema de la distribución de los puntos de muestreo en la celda electroquímica para edafológicos y microbiológicos</i>	65
<i>Figura 7.6. A) Representación de celda electroquímica para aplicación de ER en suelo contaminado por HC y materiales de los electrodos empleados. B) Proceso de construcción, aplicación de ER y posterior uso de la celda para aplicación de FR</i>	68
<i>Figura 7.7. Color final verde esmeralda resultante del proceso de titulación de la solución</i>	72
<i>Figura 7.8. Conductímetro y electrodo utilizado para la obtención de la medida de CE de la muestra</i>	73
<i>Figura 7.9. Color final azul resultante del proceso de detección de presencia de fosforo en muestra de suelo</i>	74
<i>Figura 7.10. Efervecencia de la muestra de suelo al aplicarsele peróxido de hidrogeno y agua durante proceso de obtención de textura</i>	76
<i>Figura 7.11. Lectura de la absorbancia de la solución resultante para obtención de actividad deshidrogenasa en muestras de suelo</i>	78

<i>Figura 7.12. Titulación con EDTA-Versenato durante cálculo de Ca y Mg de muestra de suelo</i>	80
<i>Figura 7.13. Técnica de espectroscopia de emisión de flama para cálculos de concentraciones de K⁺ y Na⁺ en muestra de suelo</i>	80
<i>Figura 7.14. Fotografía y partes del resistivímetro “Digital Ground Resistance Tester modelo 4500 de AEMC INSTRUMENTS”</i>	83
<i>Figura 7.15. Equipo empleado durante la técnica de extracción Soxhlet para muestras de suelo contaminado con HC</i>	84
<i>Figura 8.1. Crecimiento en altura y diámetro de Zea Mays a 21 y 49 días de siembra en las distintas condiciones del suelo Leptosol durante proceso de EFR</i>	86
<i>Figura 8.2. Fotos del crecimiento de Zea mays a 49 días de siembra en suelo control, suelo contaminado y suelo electro-fitorremediado</i>	87
<i>Figura 8.3. Gráficas de los valores de pH en agua y pH en KCl en cada punto de muestreo de suelo Leptosol</i>	93
<i>Figura 8.4. Gráfica de los valores de conductividad eléctrica en cada punto de muestreo de suelo Leptosol</i>	94
<i>Figura 8.5. Gráficas de los valores de % MO y % CO en cada punto de muestreo de suelo Leptosol</i>	96
<i>Figura 8.6. Gráfica de los valores de capacidad de intercambio catiónico en cada punto de muestreo de suelo Leptosol.</i>	97
<i>Figura 8.7. Gráfica de los valores Ca⁺², Mg⁺² y K⁺ en cada punto de muestreo de suelo Leptosol</i>	98
<i>Figura 8.8. Gráfica de los valores de fosforo en cada punto de muestreo de suelo Leptosol</i>	100
<i>Figura 8.9. Gráfica de los valores sodio en cada punto de muestreo de suelo Leptosol</i>	101
<i>Figura 8.10. Gráfica de los valores actividad deshidrogenasa en cada punto de muestreo de suelo Leptosol</i>	102
<i>Figura 8.11. Gráfica de los valores de UFC en hongos y bacterias según su cercanía a los electrodos durante la EFR</i>	105
<i>Figura 8.12. Resultados de resistividad eléctrica en las diferentes muestras de suelo Leptosol durante el proceso de EFR</i>	107
<i>Figura 8.13. Prueba de Kruskal-Wallis y prueba bilateral en los datos de resistividad eléctrica de las muestras de suelo</i>	109
<i>Figura 8.14. Gráfica de Medias y Desviación típica en los datos de resistividad eléctrica de las muestras de suelo</i>	109
<i>Figura 8.15. Resultados de extracción Soxhlet eléctrica en las diferentes muestras de suelo Leptosol durante el proceso de EFR</i>	115
<i>Figura 8.16. Prueba de Kruskal-Wallis y prueba bilateral en los datos de extracción Soxhlet de las muestras de suelo</i>	111
<i>Figura 8.17. Gráfica de Medias y Desviación típica en los datos de extracción Soxhlet de las muestras de suelo</i>	112

<i>Figura 8.18. Gráfica de doble eje del comportamiento de resultados de resistividad eléctrica vs Soxhlet de los diferentes tipos de suelo en cada hilera....</i>	115
<i>Figura 8.19. Relación de linealidad entre la variable de resistividad y Soxhlet en cada una de las muestras e hileras de suelo</i>	116

ÍNDICE DE TABLAS

página

<i>Tabla 2.1. Grupos de suelos del Sistema de clasificación WRB</i>	7
<i>Tabla 2.2. Grupos de suelos de acuerdo a su taxonomía</i>	8
<i>Tabla 2.3. Tipos de estructura molecular del suelo</i>	14
<i>Tabla 2.4. Características y funciones principales en el suelo de la microbiota...</i>	21
<i>Tabla 2.5. Métodos geofísicos para localizar plumas de contaminación asociadas a hidrocarburos</i>	30
<i>Tabla 2.6. Aplicaciones del método de resistividad eléctrica para la solución de problemas relacionados al suelo</i>	35
<i>Tabla 2.7. Ventajas y desventajas de la fitorremediación</i>	49
<i>Tabla 8.1. Prueba de Shapiro-Wilk de los datos de crecimiento en altura a los 21 y 49 días de observación en las diferentes muestras de suelo</i>	88
<i>Tabla 8.2. Análisis de varianza ANOVA de los datos de crecimiento en altura a los 21 y 49 días de observación en las diferentes muestras de suelo</i>	88
<i>Tabla 8.3. Prueba de Shapiro-Wilk de los datos de crecimiento en diámetro del tallo a los 21 y 49 días de observación en las diferentes muestras de suelo</i>	89
<i>Tabla 8.4. . Prueba de Kruskal Wallis de los datos de crecimiento en diámetro del tallo a los 21 y 49 días de observación en las diferentes muestras de suelo ...</i>	90
<i>Tabla 8.5. Resultados de parámetros edafológicos en las diferentes muestras de suelo Leptosol</i>	91
<i>Tabla 8.6. Porcentajes de textura en cada punto de muestreo del Leptosol según el sistema aplicado por la USDA</i>	103
<i>Tabla 8.7. Prueba de Shapiro-Wilk de los datos microbiológicos de las bacterias cerca del ánodo y cerca del cátodo en las diferentes muestras de suelo</i>	105
<i>Tabla 8.8. Prueba de Kruskal Wallis de los datos microbiológicos de las bacterias cerca del ánodo y cerca del cátodo en las diferentes muestras de suelo</i>	106
<i>Tabla 8.9. Prueba de Shapiro-Wilk de los datos microbiológicos de los hongos cerca del ánodo y cerca del cátodo en las diferentes muestras de suelo</i>	106
<i>Tabla 8.10. Prueba de Kruskal Wallis de los datos microbiológicos de los hongos cerca del ánodo y cerca del cátodo en las diferentes muestras de suelo</i>	106
<i>Tabla 8.11. Resultados resistividad eléctrica en las diferentes muestras de suelo Leptosol</i>	108
<i>Tabla 8.12. Prueba de Shapiro-Wilk en los datos de resistividad eléctrica de las muestras de suelo</i>	108

Tabla 8.13. Prueba de Kruskal Wallis en los datos de resistividad eléctrica de las muestras de suelo	108
Tabla 8.14. Resultados de la extracción Soxhlet de las diferentes muestras del Leptosol en estudio	110
Tabla 8.15. Prueba de Shapiro-Wilk en los datos de extracción Soxhlet de las muestras de suelo	111
Tabla 8.16. Prueba de Kruskal Wallis en los datos de extracción Soxhlet de las muestras de suelo	111
Tabla 8.17. Resultados de Coeficiente de correlación de Pearson y Coeficiente de determinación en las diferentes muestras de suelo Leptosol	113

1. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera es una actividad económica significativa en México, en los últimos años la producción de compuestos orgánicos como los hidrocarburos (HC) ha aumentado exponencialmente. Sin embargo, la práctica de sistemas de producción inadecuados como la exploración, el almacenamiento, el transporte y la refinación han introducido en el medio ambiente grandes cantidades de producto derramado, tales como hidrocarburos, ocasionando severos problemas ambientales.

Aunado a los problemas de producción de HC, existe la actividad de robo de combustible, conocido en México como “huachicoleo”. Esta práctica no solo es un problema social, ya que, en múltiples ocasiones, las tuberías petroleras al ser alteradas y saqueadas vierten los HC en el suelo, contaminando la zona a su alrededor [1]. En el suelo, el resultado de estas prácticas provoca alteraciones en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, afectando el desarrollo de plantas y animales, así como la salud del ser humano al tratarse de compuestos mutagénicos y carcinogénicos [2]. Por lo que es de suma importancia al ocurrir estos sucesos, poder determinar los espacios geográficos afectados, con el fin de proponer una técnica de remediación ambiental adecuada, que pueda ser aplicada a la brevedad.

Los métodos geo-eléctricos se emplean con frecuencia como una extensión de la geofísica-ambiental. Investigaciones previas han demostrado su eficiencia en la delimitación de zonas contaminadas, tanto en la superficie como a profundidad del área afectada, siendo el valor de resistividad eléctrica el principal indicador de la presencia de contaminantes orgánicos en el suelo, como los hidrocarburos [3]. Al poder realizarse directamente en campo y obteniendo datos al instante sin necesidad de procesarse en un laboratorio, la medida de resistividad eléctrica se considera una técnica práctica, no destructiva y de bajo costo, en comparación con otras tecnologías como la prueba química de Soxhlet.

Aunado a esto, existen técnicas reguladas oficialmente de medición de parámetros fisicoquímicos y biológicos del suelo, tales como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, la actividad de la enzimática deshidrogenasa, entre otros, capaces de indicar especificaciones de su fertilidad. Estos parámetros son sensibles a la presencia de HC y pueden servir como base para corroborar la disposición de estos, así como indicar las especificaciones de fertilidad de un suelo.

Para la remediación de suelos contaminados con HC, hoy en día existe un gran número de técnicas *ex-situ* e *in-situ* empleadas exitosamente. Dentro de las tecnologías, destaca una que comenzó a emplearse a finales del siglo XX, denominada “electro-remediación”. La electro-remediación (ER) es una tecnología que involucra la utilización de campos eléctricos para remover contaminantes mediante mecanismos electro-cinéticos que ocurren en el suelo. Es una tecnología fácil, práctica y viable para hacer frente al desgaste progresivo de los suelos contaminados por derrames de HC [2]. Otra tecnología emergente para el tratamiento de suelos contaminados es la fitorremediación (FR), la cual involucra el uso de plantas específicas, para fijar, absorber, limpiar o reducir la toxicidad de contaminantes externos, como metales pesados e HC [4].

La combinación de ambas tecnologías FR y ER, ha dado una nueva alternativa denominada electro-fitoremediación (EFR), donde mediante la fuerza motriz producida por el paso de corriente eléctrica, los contaminantes pueden migrar a través del suelo a los ánodos o cátodos, lo cual puede facilitar su absorción por las plantas. Por lo anterior, el interés del presente proyecto radica en evaluar la eficiencia de la resistividad eléctrica, al comparar los resultados con los que se obtienen con extracción Soxhlet, aunado a estudios edafológicos (pH, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica entre otros) y microbiológicos (conteo de unidades formadoras de colonias), esto en un seguimiento de remediación de un suelo Leptosol contaminado por HC en el municipio de Tetepango, Hidalgo, antes y después de aplicar la EFR para la degradación del contaminante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 EL SUELO.

El suelo bajo la definición de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) es un cuerpo natural formado por capas compuestas de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua, y esta influenciado por factores como el tiempo, el clima, la topografía y organismos vivos [5].

La definición puede variar según el área de interés que lo estudia, desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie terrestre, a partir de la cual las plantas obtienen sostén, nutrimentos y agua [6]. En geología, el suelo es la aglomeración de rocas desintegradas generalmente apoyadas en la parte superficial más delgada de la corteza [5].

2.1.1 Composición y clasificación del suelo.

2.1.1.1 Composición del suelo.

El suelo está conformado por una mezcla de rocas erosionadas, minerales, materia orgánica, agua y aire. Un suelo en condiciones óptimas contiene aproximadamente 45% de material sólido inorgánico, 5% de materia orgánica, y 50% de espacios porosos, los cuales están ocupados por una proporción igual de fase líquida y gaseosa [7]. La cantidad de cada uno de los componentes del suelo depende de la presencia de agua y vegetación, así como de la compactación del mismo.

La fase sólida del suelo está formada por una parte mineral, cuya proporción oscila entre el 90% y el 99.5%, así como materia orgánica que representa del 0.5% al 10%. La materia orgánica del suelo, también conocida como humus, está formada por microorganismos vivos y muertos en distintos estados de descomposición [8]. Además, el humus mejora la estructura del suelo, aportando agua y minerales a las plantas. La materia mineral del suelo está compuesta de rocas madre fraccionadas en partículas más pequeñas que

varían en tamaño y minerales secundarios. Las partículas del suelo que tienen entre 0.1 y 2 mm de diámetro son arena. Las partículas del suelo entre 0.002 y 0.1 mm se denominan limo, y las partículas aún más pequeñas, de menos de 0.002 mm de diámetro, se denominan arcilla [5]. Dentro de los minerales secundarios se encuentran óxidos, sales y otros compuestos formados en el proceso de erosión y formación del suelo [9].

La fase líquida, es una solución de sustancias minerales solubles en agua. Es la fase más activa y dinámica del suelo, a partir de la cual, las plantas asimilan nutrientes. La solución del suelo incluye cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , etc.), aniones (HCO_3^- , HO^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , H_2PO_4^- , etc.), compuestos orgánicos solubles en agua y gases solubles (CO_2 , O_2 , NH_3 , etc.) [10].

La fase gaseosa es el resultado de la interacción entre el aire atmosférico y los gases formados en el suelo. En su composición, hay un mayor contenido de dióxido de carbono en comparación con el aire atmosférico: de 0.3 hasta más de 3%, y un menor contenido de oxígeno [11]. La fase gaseosa se caracteriza por una alta movilidad, que depende de muchas condiciones: el contenido de materia orgánica, las condiciones climáticas, la naturaleza de la vegetación, etc. Un contenido suficiente de oxígeno en el suelo crea condiciones favorables para la actividad de los microorganismos aeróbicos. Por el contrario, su deficiencia crea condiciones para el desarrollo de bacterias anaeróbicas, que a menudo son patógenas para las plantas. El volumen de aire del suelo está en equilibrio dinámico con la fase líquida: cuanta más agua, menos aire. Los procesos de intercambio de gases en el suelo ocurren constantemente como resultado de la descomposición de la materia orgánica, la respiración de las raíces de las plantas, y los organismos del suelo, así como algunas reacciones químicas [12].

2.1.1.2 Clasificación del suelo.

La clasificación de suelo se refiere a la categorización sistemática de este, basada en sus características intrínsecas distintivas (taxonomía del suelo), así como en los criterios que dictan su uso (ingeniería) [11].

La taxonomía de suelos de la WRB es un sistema jerárquico cuantitativo utilizado para agrupar suelos en función de sus características observables y medibles. Actualmente, los dos sistemas de clasificación más reconocidos que utilizan la taxonomía para sus fines son: la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB por sus siglas en inglés) y la Taxonomía de Suelos de Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) [13].

El objetivo de la WRB es implementar inventarios de suelos y facilitar la interpretación de mapas de los mismos, con el fin de otorgar herramientas prácticas para la toma de decisiones de geólogos, agrónomos, agricultores, etc. A su vez, de esta manera se obtiene información que permita evaluar y conocer el uso potencial de los distintos suelos mientras se monitorea su evolución (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Grupos de suelos del Sistema de clasificación WRB [13].

GRUPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
Histosoles	Suelos con capas orgánicas gruesas.
Antrosoles, Tecnosoles.	Suelos con fuerte influencia humana.
Criosoles, Leptosoles, Solonetz, Vertisoles, Solonchacks	Suelos con enraizamiento limitado o fuertemente influenciados por el agua.
Gleysoles, Andosoles, Podzoles, Plintosoles, Nitisoles, Ferralsoles Planosoles, Stagnosoles.	Suelos regulados por la química de Fe/Al.
Chernozems, Kastanozems, Phaeozems, Umbrisoles.	Acumulación pronunciada de materia orgánica en el suelo mineral superficial
Durisoles, Gipsisoles, Calcisoles.	Suelos de regiones áridas con acumulación de yeso, sílice y carbonato de calcio, respectivamente.
Retisoles, Acrisoles, Lixisoles, Alisoles, Luvisoles	Suelos enriquecidos en arcillas en la parte sub-superficial.
Cambisoles, Arenosoles, Fluvisoles, Regosoles.	Suelos relativamente jóvenes con muy poco o ningún desarrollo de perfil.

La taxonomía del suelo es un sistema de clasificación que sigue un modelo jerárquico agrupando de suelos similares en 12 órdenes generales. Se diseñó para servir de base de soporte en los levantamientos de suelos en EE.UU, pero es reconocida internacionalmente, y adoptada por 55 países principalmente de América Latina y Asia [13]. El sistema contiene seis categorías, del más alto al más bajo nivel de generalización ellas son: orden, sub-orden, gran grupo, subgrupo, familia y serie. Los órdenes de suelo se definen frecuentemente por una sola característica dominante que afecta los suelos en ese lugar (Tabla 2.2), por ejemplo, la vegetación predominante (Alfisol, Mollisol) o las variables climáticas como la falta de precipitación (Aridisol). Bajo esta clasificación el orden del suelo es el primero que se determina al clasificar un suelo, considerando sus características correspondientes como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Grupos de suelos de acuerdo a su taxonomía. [13]

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
Alfisol	Suelos moderadamente lixiviados que tienen una fertilidad nativa relativamente alta. Estos suelos se han formado principalmente bajo bosque y tienen un horizonte subsuperficial en el que se han acumulado arcillas.
Andisol	Suelos que se han formado en cenizas volcánicas u otras eyecciones volcánicas. Se diferencian porque normalmente están dominados por el vidrio y productos de meteorización coloidal. Tienen propiedades ándicas: propiedades químicas y físicas únicas que incluyen una alta capacidad de retención de agua y la capacidad de "fijar" grandes cantidades de fósforo.
Aridisol	Suelos que se caracterizan por estar secos la mayor parte del año y con una lixiviación limitada. Los aridisoles contienen horizontes subsuperficiales en los que se han acumulado arcillas, carbonato de calcio, sílice, sales y/o yeso.
Entisol	Suelos de origen reciente, desarrollados por material no consolidado con características de otros órdenes de suelos. Generalmente no tiene horizontes genéticos excepto un horizonte A. Muchos Entisoles se encuentran en entornos rocosos y empinados.
Gelisol	Suelos de climas muy fríos que contienen permafrost a dos metros de la superficie. Están limitados geográficamente a las regiones polares de altas latitudes y áreas con elevaciones montañosas. Las bajas temperaturas hacen que los procesos de formación del suelo, como la descomposición de materiales orgánicos, avancen muy lentamente. Suele almacenar grandes cantidades de carbono orgánico.
Histosol	Suelos que están compuestos principalmente por materiales orgánicos. Contienen al menos entre un 20 y un 30 por ciento de materia orgánica en peso y tienen más de 40 cm de espesor. Las densidades aparentes son bastante bajas, a menudo inferiores a $0,3 \text{ g cm}^{-3}$. Se les conoce como lodos y tienen propiedades físicas que restringen su uso con fines de ingeniería.
Inceptisol	Suelos que exhiben un desarrollo mínimo de horizontes. Están más desarrollados que los Entisoles, pero aún carecen de las características características de otros órdenes de suelos. No se encuentran en regiones con climas áridos, pero están ampliamente distribuidos, principalmente en pendientes bastante pronunciadas y superficies geomórficas jóvenes.
Molisol	Suelos de los ecosistemas de pastizales. Se caracterizan por un horizonte superficial grueso y oscuro. Este horizonte superficial fértil, conocido como epipedón mólico, resulta de la adición a largo plazo de materiales orgánicos derivados de las raíces de las plantas. Los molisoles se encuentran entre algunos de los suelos agrícolas más importantes y productivos del mundo y se utilizan ampliamente para este propósito.
Oxisol	Suelos muy meteorizados que se encuentran principalmente en las regiones intertropicales del mundo. Estos suelos contienen pocos minerales resistentes a la intemperie y suelen ser ricos en minerales de óxido de Fe y Al. Se caracterizan por una fertilidad nativa baja, como resultado de reservas de nutrientes muy bajas, una alta retención de fósforo por los minerales óxidos y una baja capacidad de intercambio catiónico
Spodosol	Suelos ácidos caracterizados por una acumulación subsuperficial de humus que forma complejos con Al y Fe. Típicamente se forman de material parental de textura gruesa y tienen un horizonte E de color claro superpuesto a un horizonte espódico de color marrón rojizo.
Ultisol	Suelos forestales ácidos, fuertemente lixiviados, con una fertilidad nativa baja. Se encuentran en áreas tropicales y templadas húmedas, generalmente en paisajes antiguos y estables. En ellos se ha producido una intensa erosión de minerales primarios perdiendo Ca, Mg y K.
Vertisol	Suelos ricos en arcilla que se contraen y se hinchan con los cambios en el contenido de humedad. Durante los períodos secos, el volumen del suelo se reduce y se forman grietas profundas y anchas. Luego, el volumen del suelo se expande a medida que se moja. Esta acción de contracción/hinchazón crea serios problemas de ingeniería y generalmente previene la formación de horizontes distintos y bien desarrollados.

La ingeniería geotécnica clasifica los suelos de acuerdo con sus propiedades de ingeniería en relación con su uso como soporte de cimientos o material de construcción [14]. El más utilizado es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS por sus siglas en inglés), este sistema describe la textura y el tamaño de las partículas de un suelo realizando previamente una granulometría.

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 es la encargada de establecer la clasificación de suelos y los procedimientos, para el análisis de los parámetros fisicoquímicos que permitan caracterizarlo de acuerdo al sistema de clasificación FAO/UNESCO/ISRIC (versión 1988 y posteriores) y de la Taxonomía de Suelos.

El sistema de FAO/UNESCO se basa en un sistema de clasificación simplificado y se ha reconocido como el primer sistema de clasificación internacional [15]. El mapa de suelos de la FAO/UNESCO se elaboró con la intención de cartografiar los suelos a escala continental, pero tomando en cuenta otras clasificaciones, como el Field Book for Describing and Sampling Soils, la USDA, la Base de Datos Actualizada Global y Nacional de Suelos y Terreno (ISRIC por sus siglas en inglés) y la WRB. Por razones prácticas, los contenidos de las fuentes tuvieron que ser modificados, resumidos y re-ordenados [16].

2.1.2 Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

2.1.2.1 Propiedades físicas.

Las propiedades físicas del suelo incluyen color, textura, estructura, porosidad, densidad, temperatura y conductividad eléctrica como se describen enseguida:

- **Color:**

El color del suelo está determinado en gran medida por el contenido de materia orgánica, el grado de oxidación y, en algunos casos, la presencia de minerales específicos. El efecto

que tiene la materia orgánica sobre la coloración de los suelos es mucho más marcada en los arenosos que en los limosos y arcilloso, debido al tamaño de las partículas [16]. El color puede afectar indirectamente la temperatura y humedad del suelo, esto a través del efecto de energía irradiada, mientras mayor cantidad de energía calorífica esté presente en el suelo, se causarán mayores grados de evaporación. Los suelos oscuros, con alta energía calorífica, se secan más rápido que los de color más claro [17]. La forma más común empleada para determinar la coloración del suelo es mediante la escala de Munsell, la cual puede utilizarse en laboratorio o incluso directamente en campo.

- **Textura:**

La textura del suelo se refiere a la proporción de partículas del tamaño de arena, limo y arcilla que constituyen la fracción mineral del suelo. Las partículas de arena varían en tamaño desde 0.05 a 2.0 mm, los limos varían desde 0.002 a 0.05 mm, y la fracción de arcilla está formada por partículas de menos de 0.002 mm de diámetro [7]. Una vez que se conocen los porcentajes de fracción mineral del suelo se establece la clase textural del mismo. Las clases texturales dentro del sistema del USDA son 12 y se disponen en un triángulo de textura (Figura 2.1). Las líneas trazadas en el triángulo, fijan los límites porcentuales de cada componente. Por ejemplo si un suelo contiene 40% de arena, 40% de limo y 30% de arcilla corresponde a una textura franca arcillosa [5].

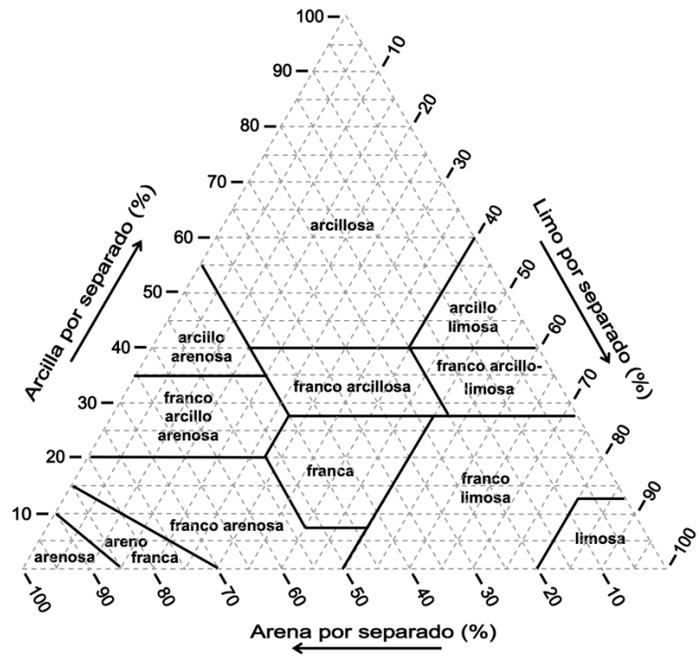


Figura 2.1. Triángulo de clases texturales [5].

La textura afecta varios procesos del suelo, incluida la infiltración, la distribución de agua y aire, la erosión, los procesos químicos y los procesos biológicos. Los suelos con alto contenido de arenas mantienen una baja capacidad de retención de agua, facilitando la lixiviación de minerales y materia orgánica, por lo que no se generan muchos procesos químicos o biológicos en ellos [8].

Por otra parte, los limos en el suelo favorecen su desarrollo estructural, generan una buena distribución del agua y del aire provocando el incremento de procesos químicos y biológicos, pero son fácilmente erosionables ante factores ambientales. Por otra parte, la alta presencia de arcillas en suelo genera tasas de infiltración lentas y una gran capacidad de retención de agua, favoreciendo procesos químicos cuando no está compactada o saturada. [8]

Finalmente, los suelos francos, dado que son una mezcla de arena, limo y arcilla, generalmente tienen un buen flujo de aire y agua por sus espacios porosos, mantienen una buena retención de agua, y son química y biológicamente diversos, así como activos.

Es la clase textural que asegura las mejores cualidades para el desarrollo de las plantas por poseer un adecuado gradiente de partículas finas, que brindan superficie activa, almacenaje de nutrientes y agua, además de una fracción gruesa que posibilita buena permeabilidad y por lo tanto aeración [9].

- **Estructura:**

La estructura describe la disposición y organización de las partículas en el suelo y la tendencia de las partículas individuales del suelo a unirse, formando agregados. La agregación afecta el transporte de agua y aire, interviniendo en el movimiento de solutos y contaminantes, a su vez, afectando la actividad biológica, incluido el crecimiento de las plantas [20]. La estructura del suelo está relacionada con la manera en la que las partículas del suelo se fueron acomodando durante el paso del tiempo en forma de capas con características diferentes debido a su composición mineral, cantidad de materia orgánica, grado de descomposición de la roca, textura granulométrica, etc. [21]. A cada una de las capas se le conocen como horizontes (Figura 2.2), en donde podemos encontrar los siguientes:

- **Horizonte O.** El horizonte O es la parte superior del suelo, se compone principalmente de materiales orgánicos como hojas secas, pastos, pequeñas rocas, ramas, organismos de la superficie y materia orgánica en descomposición. Este horizonte de suelo suele ser de color marrón negro o marrón oscuro y esto se debe principalmente a la presencia de contenido orgánico.
- **Horizonte A.** Este horizonte es rico en materia orgánica y suele confundirse con el humus. Está formada tanto por materia orgánica como por otros materiales en descomposición. Es blanda y porosa para contener suficiente aire y agua, dando lugar a la germinación de las semillas y la extensión de raíces. Aquí se

mantienen principalmente los microorganismos como hongos, bacterias, etc. [22].

- **Horizonte B.** Es el horizonte sub-superficial, presente justo debajo de la capa superior del suelo y por encima del lecho de roca. Es comparativamente más duro y compacto que la capa superficial del suelo. Contiene menos humus, minerales solubles y materia orgánica. Es un sitio de deposición de ciertos minerales y sales metálicas como el óxido de hierro [23]. Esta capa retiene más agua que la capa superior del suelo, y es de color marrón más claro debido a la presencia de suelo arcilloso, está compuesta de nutrientes lixiviados de los horizontes O y A.
- **Horizonte C o subsuelo.** Esta capa está desprovista de materia orgánica y está formada por un lecho de roca quebrada [22].
- **Horizonte R.** Llamado roca madre o material rocoso. Es una capa compactada y cementada. Aquí se encuentran diferentes tipos de rocas como granito, basalto y caliza.

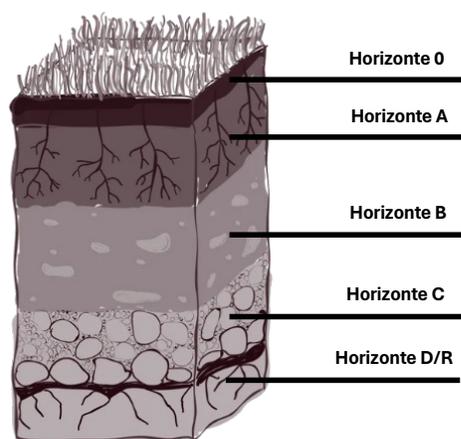


Figura 2.2. Horizontes estructurales del suelo (elaboración propia).

En la Tabla 2.3. se observan los tipos de estructura del suelo relacionados con el horizonte la que pertenecen, mencionando algunas características y una figura representativa.

Tabla 2.3. Tipos de estructura molecular del suelo [23].

TIPO DE ESTRUCTURA	CARACTERÍSTICAS	FIGURA
Granular	Son de forma proximadamente esférica. Generalmente de 1 a 10 mm de diámetro. Más común en horizontes A, donde las raíces de las plantas, los microorganismos y los productos pegajosos de la descomposición de la materia orgánica unen los granos del suelo en agregados granulares.	
Laminar	Pedregales planos que se encuentran horizontalmente en el suelo. La estructura laminar se puede encontrar en los horizontes A, B y C. Comúnmente ocurre en un horizonte A como resultado de la compactación.	
Bloques	Aproximadamente en forma de cubo. Si los bordes y las esquinas están afilados, son llamados bloque angular. Si son redondeados, bloque subangular. Los tamaños suelen oscilar entre 5-50 mm de ancho. Las estructuras en bloques son típicas de los horizontes B, especialmente aquellos con un alto contenido de arcilla. Se forman por expansión y contracción repetidas de minerales arcillosos.	
Prismática o Columnar	Bloques más grandes, alargados verticalmente, a menudo con cinco lados. Los tamaños suelen tener entre 10 y 100 mm de ancho. Las estructuras prismáticas se encuentran comúnmente en los fragipanos.	

La porosidad es la parte del volumen total del suelo que no está ocupada ni por materia mineral ni orgánica, sino que es un espacio abierto ocupado por gases o agua. La porosidad del suelo está inversamente relacionada con la densidad aparente, en un suelo promedio el espacio poroso total suele ser aproximadamente el 50% del volumen del suelo [24]. El tamaño de los poros es un factor importante que afecta los procesos del suelo. Los poros más pequeños (<0,1 μm de diámetro) retienen el agua con demasiada fuerza para que la utilicen las raíces de las plantas, para que las plantas puedan utilizar el agua del suelo se retiene en poros de 0.1 a 75 μm de diámetro [25]. Los macroporos (>75 μm de diámetro) por lo general están llenos de aire pero pueden transportar rápidamente agua y solutos a profundidades mayores [24]. Es importante mencionar, que los suelos con actividad biológica tienen mayor macroporosidad [25].

- **Densidad:**

Se refiere al peso por volumen del suelo. Existen dos tipos de densidad, real y aparente. La medida estándar de la densidad del suelo es la densidad aparente, se define como la proporción del peso de un suelo en relación con su volumen. Se expresa como una

unidad de peso por volumen y comúnmente se mide en unidades de gramos por centímetro cúbico (g cm^{-3}). La densidad aparente es un indicador de la cantidad de espacio poroso disponible dentro de los horizontes individuales del suelo, ya que es inversamente proporcional al espacio poroso. Las densidades típicas de partículas son 2.65 g cm^{-3} para suelos minerales y 1.3 g cm^{-3} para materia orgánica [26]. Varias actividades humanas afectan la densidad aparente. Los suelos en los sitios de construcción generalmente se compactan como resultado de la excavación, mezcla, almacenamiento y tráfico de equipos.

- **Temperatura:**

La temperatura del suelo es un valor cambiante que depende de diversos factores, siendo la radiación solar el de mayor influencia en sus variaciones. La cantidad de radiación solar es la principal fuente de calor para el suelo, debido a esto, la temperatura del suelo varía a diferentes profundidades, siendo las capas someras las más cálidas. La radiación solar depende a su vez de la estación del año y la ausencia/presencia de luz solar, las nubes y la temperatura del aire [28].

Por otra parte, los suelos más oscuros absorben más luz solar calentándose más rápido, esto a su vez está relacionado con la cantidad de materia orgánica, ya que los suelos con alto contenido de material orgánico suelen ser más oscuros. La vegetación es otro factor importante, un suelo descubierto se calienta más rápido que uno con presencia vegetal [27].

La humedad igual genera variaciones en la temperatura del suelo, los suelos húmedos conducen mejor el calor que los secos, ya que la tierra seca se calienta más rápido durante el día que los suelos húmedos, y se enfría más rápido por la noche. [28]

Por último, la composición del suelo y textura juegan un papel fundamental, la arcilla tiene una mayor capacidad térmica en comparación con la arena. Sin embargo, la arena se calienta más rápido que la arcilla debido a la menor porosidad. La conductividad térmica aumenta en los suelos más finos. No obstante, los factores que afectan a la temperatura del suelo son complejos y dependen de la forma en que se combinen [27].

- **Conductividad eléctrica.**

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de un material para transmitir una corriente eléctrica. Comúnmente se expresa en unidades de miliSiemens por metro (mS m^{-1}) o deciSiemens por metro (dS m^{-1}) [36]. La conductividad eléctrica del suelo mide su capacidad de conducción iónica entre los poros del mismo. La CE es un proceso electrolítico que en el suelo tiene lugar principalmente a través de los poros llenos de agua. Los cationes y aniones de las sales disueltas en el agua conducen la corriente eléctrica, en consecuencia, la concentración de iones determina la CE de los suelos [37].

La CE se ha utilizado como un indicador indirecto de la concentración de sodio, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, textura del suelo, espesor del suelo, nutrientes, capacidad de retención de agua y condiciones de drenaje [39, 42]. Un factor importante que delimita los valores de CE en el suelo es la porosidad. La porosidad afecta la conducción de la corriente eléctrica en el suelo al proporcionar el espacio para el paso del agua. Una mayor porosidad del suelo aumenta el potencial de conducir electricidad cuando está húmedo, por lo tanto un alto contenido de arcilla tendrá valores de CE más elevados que los suelos arenosos debido a la retención de humedad generada por la compactación de las partículas. [36-37, 41].

Es importante recordar que mientras la arena presenta una alta cantidad de poros grandes, las arcillas tienen una alta cantidad de poros pequeños, por lo que el agua

circula lentamente a través de ellos, generando una velocidad de infiltración baja, favoreciendo la humedad y a su vez la CE del suelo.

2.1.2.2 Propiedades químicas.

Algunas de las propiedades químicas del suelo incluyen pH, capacidad de intercambio catiónico y las bases intercambiables.

- pH.

El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad del suelo. Es una propiedad importante porque está relacionada con el crecimiento de las plantas, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana del suelo, el ciclo químico de otros elementos y la movilidad de contaminantes como los metales [29]. El pH en suelo varía de 1 a 14, siendo 7 el valor neutro, un pH por debajo de 7 es ácido, y por encima de 7 es alcalino (Figura 2.3.).

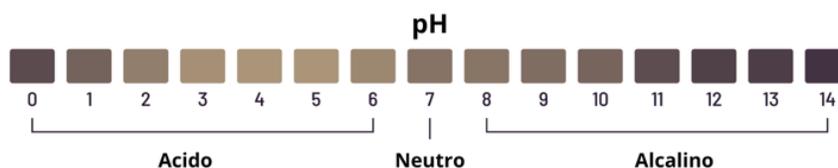


Figura 2.3. Clasificación de suelos según el índice de pH (elaboración propia).

El rango de pH deseable para un crecimiento óptimo de las plantas varía entre cultivos. Mientras que algunos cultivos crecen mejor en el rango de 6.0 a 7.0, otros crecen bien en condiciones ligeramente ácidas. Los suelos se vuelven ácidos cuando los elementos básicos como el calcio, magnesio, sodio y potasio contenidos en los coloides del suelo son reemplazados por iones de hidrógeno, por lo que suelos formados en condiciones climáticas con gran número de precipitaciones son más ácidos que suelos en lugares áridos [29].

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).**

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la capacidad total de un suelo para retener cationes intercambiables. Los suelos arcillosos tienen una CIC más alta que los suelos arenosos, pero la materia orgánica del suelo tiene el mayor efecto sobre la CIC del suelo, ya que la materia orgánica tiene una CIC aproximadamente 4 veces mayor que la de la arcilla. Los principales iones asociados con la CIC son calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+); en suelos ácidos, el aluminio (Al^{3+}) y el manganeso (Mn^{2+}) [30]. Las unidades de CIC son centimoles por kilogramo de suelo (cmol/kg). Los valores típicos varían desde menos de 5 cmol/kg para arenas hasta más de 40 para arcillas [31].

- **Bases intercambiables.**

Las bases intercambiables también conocidas como nutrientes principales, son los elementos cargados positivamente que un suelo en particular es capaz de retener. Los cationes más abundantes con carga eléctrica positiva (+) en el suelo incluyen calcio, magnesio, sodio y potasio.

- El calcio (Ca^{+2}) es fundamental para la estructura saludable del suelo, y es importante para un proceso llamado floculación [16]. En el proceso de floculación, las partículas de arcilla se juntan separándose de otras partículas del suelo, ayudando a mantener una buena aireación [32]. El calcio también es un importante nutriente vegetal, las plantas lo necesitan para desarrollar paredes y membranas celulares fuertes. Por el contrario, una cantidad insuficiente de Ca^{+2} provoca una susceptibilidad a una variedad de enfermedades y problemas pos-cosecha, especialmente en productos como las manzanas y el apio [31].
- El magnesio (Mg^{+2}) igual tiene una función importante en el mantenimiento de la estructura del suelo. Junto con el calcio, el Mg^{+2} también forma puentes entre

minerales arcillosos cargados negativamente. Esto sustenta una estructura de suelo estable que evita la sedimentación, ayudando al suelo a cumplir su función de almacenar una gran cantidad de agua disponible para las plantas [33]; su relevancia recae en ser un nutriente importante para las plantas. El magnesio es el núcleo central de la molécula de clorofila en el tejido vegetal, por lo tanto, indispensable para la síntesis, transporte y almacenamiento de fitonutrientes importantes, como carbohidratos, proteínas y lípidos [34]. Además, El Mg^{+2} activa más enzimas que cualquier otro nutriente vegetal, y regula el equilibrio energético de las plantas, ya que es necesario para unir las enzimas y el portador de energía ATP. Por último, el Mg^{+2} protege las plantas mediante un mejor crecimiento de las raíces, permitiendo el acceso al agua en capas más profundas del suelo.

- El sodio (Na^+) está presente en el suelo de manera natural, principalmente en áreas con escasas precipitaciones y alta evaporación. No obstante, un alto contenido de Na^+ en el suelo (suelos sódicos) genera efectos negativos en su estructura y es dañino para el crecimiento vegetal [32]. Los principales procesos físicos asociados con altas concentraciones de Na^+ son la dispersión del suelo, así como el crecimiento de las partículas de arcilla y los agregados. Las fuerzas que unen las partículas de arcilla se interrumpen cuando se interponen demasiados iones de Na^+ entre ellas. Cuando se produce esta separación, las partículas de arcilla se expanden provocando una hinchazón y dispersión del suelo, esto a su vez genera una obstrucción en los poros del suelo, reduciendo su permeabilidad [33]. El bloqueo de los poros dificulta el crecimiento de las raíces, el intercambio gaseoso y el movimiento del agua.
- Hay tres formas de “reservorios” de potasio (K^+) en el suelo: no disponibles, de disponibilidad lenta o “fijos”, y fácilmente disponibles. El K^+ no disponible se encuentra en minerales del suelo como feldspatos y micas durante períodos extremadamente largos, no pudiendo satisfacer las necesidades de potasio de las plantas en crecimiento [31-32]. El K^+ de disponibilidad lenta queda atrapado entre

capas de minerales arcillosos, con el tiempo, estará disponible para las plantas. Este fenómeno ocurre en suelos con alto contenido de arcilla, cuando estas se secan se contraen y se hinchan, fijando grandes cantidades de K^+ durante el proceso, pero los liberan cuando se vuelven a humedecer. El K^+ es absorbido en grandes cantidades por las plantas, se utiliza en la fotosíntesis, el transporte de azúcar, el movimiento de agua y nutrientes, la síntesis de proteínas, y la formación de almidón por las plantas. Un nivel adecuado de potasio en las plantas aumenta la resistencia a las enfermedades, la tolerancia al estrés hídrico, la resistencia al invierno, la tolerancia a las plagas de las plantas, y la eficiencia de absorción de otros nutrientes [35, 38, 40].

Idealmente en los análisis de suelos, las bases deben estar en los siguientes niveles por cada base de intercambio para un crecimiento adecuado de las plantas, esto naturalmente varía por el tipo de suelo y las condiciones ambientales de la zona. $Ca^{+2} = 7$ a 12 cmol kg^{-1} ; $Mg^{+2} = 1$ a 2 cmol kg^{-1} ; $K^+ = 0,4$ a $0,6 \text{ cmol kg}^{-1}$; $Na^+ =$ menor a 1 cmol kg^{-1} y suma de bases = mayor a 10 cmol kg^{-1} [33, 39].

2.1.2.2 Propiedades biológicas.

Las propiedades biológicas del suelo son principalmente la meosbiota, la macrobiota y la microbiota.

- **Biota.**

Biota se refiere al conjunto de los organismos vivos presentes en el suelo. Hay diferentes formas de clasificar la biota del suelo, puede ser según su función, tamaño o método de producción de energía (es decir, autótrofo o heterótrofo) [42]. La clasificación de la biota por tamaño, está conformada por la microbiota (microorganismos), la mesobiota y la macrobiota. La microbiota mide menos de 0.2 mm y está formada por bacterias,

actinomicetos, hongos, algas y protozoos, la característica de cada uno se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características y funciones principales en el suelo de la microbiota. [42 y 43].

MICROBIOTA DEL SUELO	CARACTERÍSTICAS	FUNCIONES EN EL SUELO
Bacterias	Son el grupo biótico más diverso y abundante del suelo. Las bacterias suelen tener un tamaño de entre 0,4 y 2 μm y varían en forma. Algunas bacterias tienen flagelos, lo que las hace móviles, pero la mayoría de las veces se adhieren a superficies mediante intercambio iónico.	<ul style="list-style-type: none"> Las bacterias descomponedoras convierten la energía de la materia orgánica del suelo en formas útiles para otros organismos en la red alimentaria del suelo. Las bacterias mutualistas, forman asociaciones con plantas para fijar nitrógeno. Un tercer grupo de bacterias son los patógenos.
Hongos	Los hongos son eucariotas, organismos con un verdadero núcleo celular. La mayoría de los hongos son heterótrofos aeróbicos. Se dividen en cinco grupos principales, todos los cuales se encuentran en el suelo como patógenos de plantas e insectos. Hay cuatro grupos principales de hongos del suelo: Zygomycota, Ascomycota, Basidiomycota y Deuteromycota.	<ul style="list-style-type: none"> Junto con las plantas juntos regulan muchos procesos del suelo, incluido el ciclo del carbono y el reciclaje de nutrientes. Suprimen las enfermedades de las raíces de las plantas. Promueven plantas más saludables al atacar los patógenos de las plantas con enzimas fúngicas.
Algas	Las cianobacterias y las algas son organismos fotosintéticos, aunque las cianobacterias son procarióticas y las algas eucariotas. Las algas se encuentran entre los primeros organismos en colonizar el suelo.	<ul style="list-style-type: none"> Las cianobacterias también pueden fijar nitrógeno. Excretan material importante para la agregación del suelo. Son una importante fuente de alimento y son importantes en el ciclo de nutrientes.
Protozoos	Los protozoos son especies unicelulares que se alimentan principalmente de bacterias, pero también comen otros protozoos, materia orgánica soluble y, a veces, hongos. Son mucho más grandes que las bacterias y móviles en el suelo. Los protozoos incluyen ciliados, flagelados y amebas. El tipo más frecuente depende de la fuente primaria de alimento (por ejemplo, bacterias, hongos).	<ul style="list-style-type: none"> Los protozoos desempeñan papeles importantes en el ciclo de nutrientes a través de su depredación. Liberan grandes cantidades de nitrógeno. Controlan las poblaciones de bacterias en el suelo.
Actinomicetos	Especies heterótrofas, aerobias y mesófilas. Crecen en un rango de temperatura entre 25°C y 30°C y son poco tolerantes a la acidez, razón por la cual requieren pH neutro para su óptimo crecimiento.	<ul style="list-style-type: none"> Degradar compuestos orgánicos complejos Fijar nitrógeno. Producen importantes enzimas del suelo como amilasa, lipasa y celulasas.

La mesobiota, representa a los organismos del suelo de tamaño intermedio (varían de 0.2 a 10 mm de tamaño), incluidos pequeños animales invertebrados como los anélidos, artrópodos, nematodos y moluscos [44]. Estos organismos se eliminan fácilmente de una muestra de suelo utilizando un embudo de Tullgren [43].

La mesobiota juega un papel importante en el ciclo de nutrientes en el suelo, principalmente a través de su depredación de bacterias y hongos. Pueden suprimir la degradación del material orgánico y reducir el ciclo de los nutrientes si son demasiado abundantes, pero generalmente tienen un efecto positivo en el suelo. [44]

La mesobiota tiende a ser más abundante en las capas superiores del suelo debido a la mayor presencia de material orgánico, pero su actividad también aumenta en la rizosfera. La mayoría de las especies son susceptibles a la alteración del suelo, debido a procesos de cultivo ya que estos realizan cambios físicos en el mismo [45].

La macrobiota la conforman los organismos del suelo más grandes que pueden seleccionarse manualmente a partir de una muestra de suelo. Los ejemplos incluyen pequeños animales vertebrados excavadores, insectos, lombrices de tierra y material vegetal como raíces de árboles, e insectos y lombrices de tierra más grandes. Comprenden la fracción más pequeña de la biomasa pero son importantes en los procesos físicos y en el ciclo de nutrientes. Debido a su movilidad, afectan la estructura y la geometría de los poros del suelo, además mueven material orgánico dentro de él [44]. Las lombrices de tierra son el grupo funcional macrobiótico más importante, ya que rompen el material orgánico en componentes más pequeños, y mezclan la basura orgánica que pudiera existir en el suelo con los organismos del suelo en sus intestinos. Aunado a eso, aumentan la dispersión de microorganismos y crean macroporos en el suelo, que son importantes en el transporte de agua y aire.

2.2 LEPTOSOL.

El Leptosol es uno de los 30 grupos de suelos del sistema de clasificación de la FAO-UNESCO, también son conocidos en otras clasificaciones de suelos como Litosoles y Redzines. Su nombre deriva del vocablo griego "leptos" que significa delgado, haciendo referencia a su carácter somero [46]. Los Leptosoles son suelos someros (con profundidades no mayores a 35 cm), ricos en fragmentos gruesos de minerales y con poca influencia de los procesos de formación del suelo. A menudo, contienen grandes cantidades de grava y son muy susceptibles a la erosión y la desecación según el clima y la topografía, particularmente comunes en áreas montañosas y con un relieve complejo, hecho que explica su amplia distribución en México. Son el grupo de suelos más extenso del mundo y ocupan alrededor del 13% de la superficie terrestre continental total de la Tierra [5].

En México, los Leptosoles son comunes en la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Sur, las penínsulas de Yucatán y Baja California y a lo largo del desierto de Chihuahua [46].

La utilización de los suelos leptosoles no es muy ideal para la agricultura, aunque con un buen manejo es factible para hortalizas como maíz, papas, y otros, así como pastos. Sus limitaciones son su escasa profundidad y abundantes rocas que confieren propiedades como la poca retención de agua, y una alta erosión que impide la facilidad para el crecimiento de las plantas [5].

2.3 CONTAMINACIÓN DEL SUELO.

La contaminación del suelo es la adición de todo agente químico, biológico, o físico en el mismo, que cause efectos adversos en los seres humanos, animales, vegetales o materiales que se encuentren expuestos, y en cantidades tales sobrepasen los niveles de los que se encuentran regularmente en la naturaleza. La contaminación del suelo alberga un amplio espectro de consecuencias negativas que afectan a las plantas, los animales, los seres humanos y el ecosistema en su conjunto [48-49].

Dado que el suelo es la principal fuente de generación de alimentos en los humanos, su contaminación tiene graves consecuencias para nuestra salud. Los cultivos y las plantas que crecen en suelos contaminados, mediante un proceso llamado bioacumulación logran absorber y acumular en sus fibras gran parte del contaminante, transmitiéndolos a otros seres vivos que las consumen provocando diversos tipos de enfermedades [49, 51]. La contaminación generalizada del suelo tiene un impacto en el equilibrio ecológico de cualquier sistema. Cuando la química del suelo cambia tan drásticamente en tan poco tiempo, la mayoría de las plantas no logran adaptarse, al igual que la mayoría de hongos y bacterias, lo que genera cambios en la estructura del suelo agravando el problema de su erosión. Aparte de eso, podría obligar a otros depredadores a trasladarse en busca de alimento [50]. Finalmente, la fertilidad del suelo disminuye, haciendo que el

suelo sea inadecuado para la agricultura y la supervivencia de cualquier vegetación local, incluso llegando a provocar hambrunas si las plantas no pueden crecer en él [48, 50-51].

El deterioro de los suelos en México afecta a múltiples componentes del medio social y natural, por lo que varias instancias se involucran en su protección y saneamiento: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), organizaciones internacionales como la FAO, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, e instituciones académicas y civiles, entre las más destacadas.

2.3.1 Fuentes de contaminación del suelo.

Los suelos pueden estar contaminados con una amplia gama de compuestos, tanto por insumos directos como la aplicación de pesticidas y fertilizantes, como por insumos indirectos como inundaciones y deposición atmosférica. Los suelos contaminados a su vez, representan una fuente secundaria de emisiones de contaminantes al aire, aguas superficiales, aguas subterráneas y finalmente, a los océanos. El origen de la contaminación del suelo puede ser natural o antropogénico [51].

- **Fuentes naturales.**

Contaminantes como oligoelementos y radionúclidos entre otros, se producen naturalmente en los suelos debido a procesos geológicos y edafológicos sin influencia antropogénica [49-50]. Los volcanes son la fuente de contaminación natural más significativa, expulsando elementos como aluminio, cobre, flúor, níquel, plomo, manganeso, mercurio y zinc en cantidades no saludables para el medio ambiente. [50]

- Fuentes antropogénicas.

Las principales fuentes antropogénicas de contaminación del suelo son los compuestos químicos usados o producidos como derivados de actividades industriales, desechos domésticos y municipales, incluyendo las aguas residuales, los agroquímicos y los productos derivados del petróleo (Figura 2.4.). Estos compuestos químicos son liberados al medio ambiente, por ejemplo los procedentes de derrames de petróleo o de la lixiviación desde los vertederos, o intencionalmente, como sucede con el uso de fertilizantes y plaguicidas, irrigación con aguas residuales no tratadas, o la aplicación en suelos de lodos de depuradora [52].

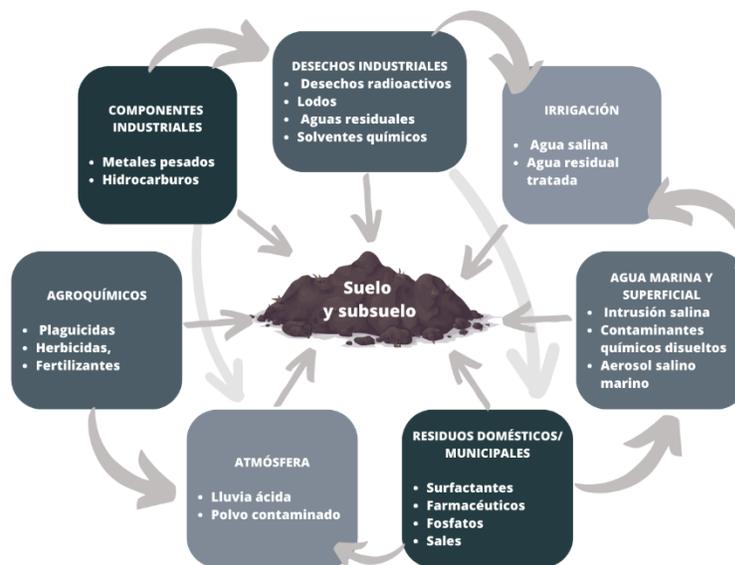


Figura 2.4. Rutas potenciales interrelacionadas para la contaminación química [53].

Las actividades industriales liberan contaminantes a la atmósfera, el agua y el suelo, sin embargo, los contaminantes líquidos y gaseosos al ser liberados a la atmósfera o cuerpos acuíferos, pueden ingresar al suelo directamente a través de la lluvia ácida, infiltración y/o deposición atmosférica. Las actividades potencialmente contaminantes pueden ser agrupadas en seis categorías principales: 1) industrias energéticas; 2) producción y procesamiento de metales; 3) industria mineral; 4) industria química; 5) manejo de

desechos y 6) otras actividades (que incluyen la producción de papel y cartón, la fabricación de fibras o textiles entre otras) [53].

La eliminación de desechos municipales en rellenos sanitarios, vertederos al aire libre y la incineración, son las tres formas más comunes de manejar los desechos. De esta manera muchos contaminantes, como los metales pesados, los compuestos farmacéuticos, detergentes, los productos para el cuidado personal y sus derivados, se acumulan en el suelo mediante a procesos de lixiviación [52].

2.4 HIDROCARBUROS.

El término hidrocarburo (HC) se refiere a un compuesto químico orgánico que está formado exclusivamente por átomos de hidrógeno y carbono [54]. Los hidrocarburos son un recurso natural no renovable y son la base del petróleo crudo, el gas natural, el carbón y otras fuentes de energía importantes. Producen dióxido de carbono, agua y calor cuando se queman, son sustancias apolares, tienen temperaturas de fusión y ebullición relativamente bajas y son poco o nada solubles en disolventes polares [56].

Los hidrocarburos de petróleo (PHC por sus siglas en inglés) se definen como cadenas de carbono en el rango de C_6 a C_{35} en diferentes configuraciones estructurales y con diferentes propiedades físicas y químicas. Estos compuestos consisten principalmente en HC y en menor cantidad de otros constituyentes no hidrocarburos, como nitrógeno, oxígeno y azufre. Se clasifican en términos generales en dos fracciones principales: hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos (Figura 2.5.) [55]. Antes de su procesamiento para convertirse en solventes complejos como el petróleo crudo, la gasolina o el diésel, los PHC están compuestos en promedio, por ~57% de hidrocarburos alifáticos, ~29% de hidrocarburos aromáticos, ~14% de asfaltenos, y otros compuestos polares como sulfúros orgánicos [56].

- Los hidrocarburos alifáticos incluyen hidrocarburos de cadena lineal o ramificada, que pueden ser insaturados (alquenos y alquinos) o saturados (alcanos). Los alcanos son aquellos cuyos enlaces de carbono son simples, carbono-carbono. La fórmula general de los alcanos es C_nH_{2n+2} y un ejemplo sería el etano. Los alquenos u olefinas tienen enlaces dobles de carbono-carbono $CH_2=CH_2$ por ejemplo el limoneno, y finalmente los alquinos o acetilenos tienen enlaces triples de carbono-carbono, por ejemplo el etino $HC\equiv CH$ [55].
- Los hidrocarburos aromáticos tienen moléculas cíclicas, es decir, los átomos de carbono forman un círculo. En este grupo los hidrocarburos monocíclicos son aquellos en los que se sustituye una molécula de hidrógeno del anillo bencénico por cadenas laterales, es decir, por residuos hidrocarbonados por ejemplo, el benceno o el tolueno, mientras que los policíclicos son los que contienen dos o más núcleos de benceno (Figura 2.5).

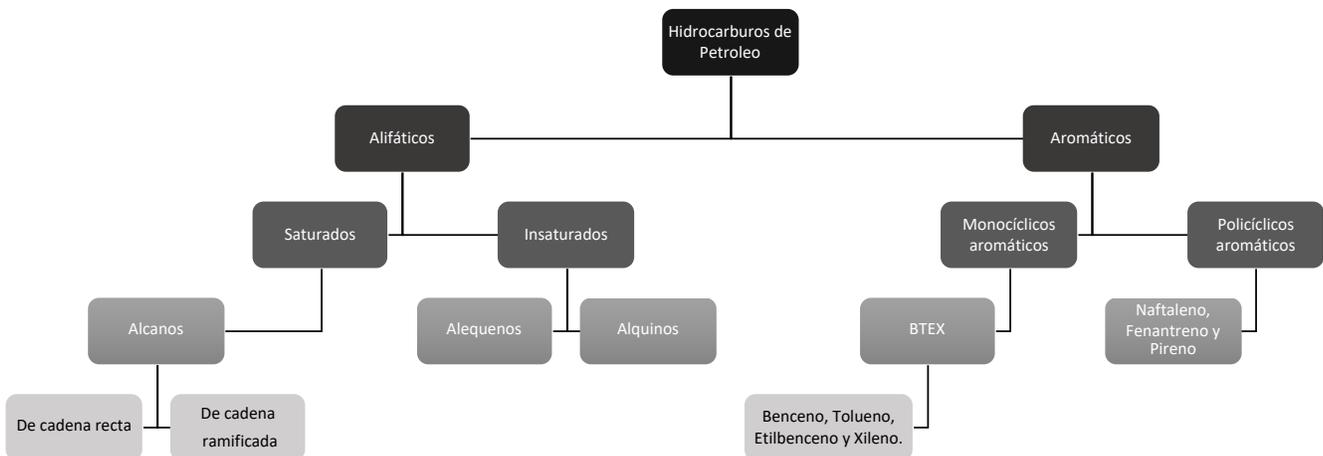


Figura 2.5. Diagrama esquemático que muestra la clasificación de los PHC [56-57].

2.4.1 Contaminación del suelo por hidrocarburos.

La introducción de hidrocarburos en el suelo cambia inmediatamente sus propiedades y funcionamiento. Los HC se acumulan en los suelos debido a su persistencia e

hidrofobicidad, por lo que tienden a ser retenidos durante periodos de tiempo prolongados, generando daños cruciales al suelo y a todo el ecosistema que lo rodea debido a su alta toxicidad y a su capacidad mutagénica y carcinógena [58]. El alcance de las afectaciones depende del tipo de suelo y el tipo y concentración del hidrocarburo. La NOM-138-SEMARNAT/SS-2012 es la norma mexicana que establece los límites máximos permisibles de HC en suelos, así como especificaciones para su caracterización y remediación.

- **Afectaciones físicas.**

Como resultado de la contaminación se crea una capa de hidrocarburo que recubre las partículas del suelo, provocando cambios en el color, a gris o marrón oscuro. Los cambios de color de la superficie del suelo dan como resultado propiedades reflectantes de la luz más bajas, este efecto facilita el calentamiento del suelo y a su vez genera un deterioro en su capacidad de absorber y retener la humedad, esto conduce a una pérdida considerable de conductividad y concentraciones del agua [59]. Como resultado del gran aumento de las condiciones hidrofóbicas, las capas someras contaminadas se secan, mientras que las capas inferiores más limpias de HC sufren de humedad excesiva, lo que genera condiciones incorrectas del flujo de aire y el agua, y a su vez el desarrollo de procesos anaeróbicos [60].

- **Afectaciones químicas.**

Las aguas adyacentes al HC contienen un alto contenido de sodio. Los iones de sodio son absorbidos en el suelo y reemplazan sus cationes que equilibran el pH, elevando así el pH. Además, el HC cambia las propiedades redox del suelo, esto debido a la aireación ineficaz y las condiciones anaeróbicas en profundidad, reduciendo su potencial redox. Por lo tanto, la contaminación por HC eleva el carbono orgánico del suelo entre 2 y 10 veces, pero disminuye concentraciones de elementos importantes como el calcio, el

fósforo y el potasio, esto se ve reflejado en su capacidad de intercambio catiónico y es debido a que los HC interfieren en los sitios de intercambio de cationes por su adsorción en los mismos [59].

Por otra parte, mediante un fenómeno electroestático, los nutrientes pueden adherirse naturalmente a las moléculas del suelo, al tener esta carga negativa, mientras que el calcio, el magnesio y el potasio están cargados positivamente, pero al haber una contaminación por HC, estos interfieren con este fenómeno inhibiendo su intercambio y haciendo que el suelo pierda sus propiedades fértiles [61].

- **Afectaciones bióticas.**

Los HC matan o inhiben muchas especies microbianas del suelo que no son capaces de asimilarlos o degradarlos, alterando así la funcionalidad de dicha comunidad. De manera natural los microorganismos del suelo ayudan a que los nutrientes estén disponibles para las plantas, por lo que su reducción en número o actividad las afecta directamente. Aunado a que en condiciones anormales del aire y agua por obstrucción de espacios porosos, se reduce la solubilidad y disponibilidad de micronutrientes en las plantas para su desarrollo, provocando hipoxia en las plantas maduras, evitando su crecimiento, y en las semillas inhibiendo su germinación. Algunos HC pueden ser absorbidos por especies vegetales específicas mediante procesos de bioacumulación, por lo que representa un riesgo para el ganado, la vida silvestre y los insectos herbívoros [61].

2.5 DELIMITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS EMPLEANDO TECNOLOGÍAS GEOFÍSICAS.

Los accidentes por prácticas incorrectas de operación en las industrias petroleras, así como el robo de hidrocarburos mediante el sabotaje de tuberías, generan derrames del combustible tanto en el suelo como en cuerpos de agua [5]. Dado que estos derrames

alteran todo el ecosistema a su alrededor de manera negativa, es necesario poder delimitar las zonas afectadas tanto a nivel superficial como a profundidad.

En el caso de suelos contaminados por HC, la geofísica ambiental consta de tecnologías que permiten delimitar y mapear la presencia de estos fluidos en los distintos horizontes geológicos [62]. La Tabla 2.5. compara algunas de las tecnologías aplicables a este problema particular, según los objetivos, beneficios, limitaciones y costo de cada una.

Tabla 2.5. Métodos geofísicos para localizar plumas de contaminación asociadas a hidrocarburos [5, 63].

CRITERIOS / TECNOLOGÍAS	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	MÉTODO ELECTROMAGNÉTICOS	MÉTODO MAGNETO-TELÚRICO	POTENCIAL ESPONTANEO
OBJETIVOS	<ul style="list-style-type: none"> Plumas en superficie. Plumas moderadamente profundas. 	<ul style="list-style-type: none"> Plumas en superficie. Plumas moderadamente profundas. 	<ul style="list-style-type: none"> Plumas moderadamente profundas. Plumas muy profundas. 	<ul style="list-style-type: none"> Plumas en superficie. Plumas moderadamente profundas.
BENEFICIOS	<ul style="list-style-type: none"> Flexibilidad en diseño de adquisición. No introduce ruido ambiental. Muy rápida en zonas de estudio pequeñas. Material de adquisición diseñado para uso rudo. Material de adquisición no requiere del uso de un técnico. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor profundidad de investigación. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor profundidad de investigación Insensibilidad a ruido ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> Procedimiento sencillo en campo.
LIMITACIONES	<ul style="list-style-type: none"> Logística compleja para mayor profundidad de investigación, así como en zonas de mayor tamaño. Requiere contacto con la superficie del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> Logística compleja para mayor profundidad de investigación, así como en zonas de mayor tamaño. Material de adquisición requiere del uso de un técnico. 	<ul style="list-style-type: none"> Logística de campo moderadamente compleja. No funciona para visualizar el subsuelo demasiado somero. Material de adquisición requiere del uso de un técnico. 	<ul style="list-style-type: none"> Interpretación de fuente de anomalías en datos puede ser ambigua.
COSTO RELATIVO	Bajo	Moderado	Moderado	Bajo

La importancia de tener un estimado de la cantidad de suelo contaminado así como de las características geológicas del sitio, es poder elegir correctamente la tecnología de remediación a emplear para un eficiente saneamiento del suelo, así como definir las características geológicas que pudiesen intervenir en el proceso de migración del contaminante [64].

2.5.1 Métodos geoeléctricos.

Los métodos de prospección eléctrica, también denominados geoeléctricos realizan mediciones eléctricas indirectas en la superficie del suelo para investigar las condiciones del subsuelo en un área; se clasifican en activos y pasivos. Las técnicas activas, como la resistividad eléctrica (RE) y la polarización inducida (PI), requieren introducir corrientes

eléctricas generadas artificialmente en el suelo con pares de electrodos. El método pasivo de potencial propio (SP), utiliza campos eléctricos naturales dentro de la Tierra [65].

El principio básico detrás de los métodos geoelectricos activos es la inyección de corriente (I) en el suelo mediante un par de electrodos (A y B), esta corriente provoca una diferencia de potencial (V) en el suelo que se mide mediante un par de electrodos separados (M y N). A partir de los dos valores medidos I y V se determina un factor K mediante las distancias de los cuatro electrodos (A, B, M y N) para así obtener la resistividad eléctrica aparente $\rho(a)$ (Figura 2.6.).

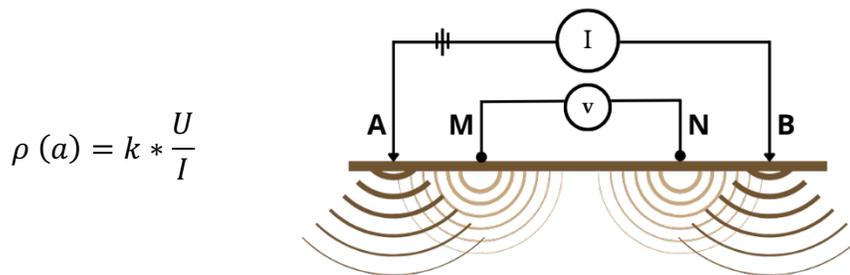


Figura 2.6. Principio básico de los métodos geoelectricos (elaboración propia).

La magnitud del factor geométrico (k) se determina por la distancia entre los electrodos del dispositivo. Las distancias varían según el tipo de arreglo y el propósito del estudio. Hay diferentes tipos de arreglos debido a que los electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano de superficie del terreno, pero, las distintas separaciones ayudan a que el trabajo sea más eficiente en campo, los arreglos más comunes son el arreglo Wenner, Schulmberger y Dipolo - Dipolo [62].

- **Dipolo-Dipolo.**

El arreglo consiste en cuatro electrodos dispuestos en forma lineal –ABMN– sobre un perfil (Figura 2.7.). El espaciamiento entre los electrodos de corriente es representado en la figura por el factor “a”, el cual mantiene la misma distancia entre los electrodos de

potencial y siempre se mantienen fijos, en cambio, el factor “n” se va incrementando, ya que con esto se busca aumentar la profundidad de investigación [63-64]. Las principales ventajas del arreglo dipolo-dipolo son su alta resolución y capacidad multicanal, además, proporciona una imagen muy detallada en lugar de mostrar una imagen "grande" como la matriz Wenner. La desventaja de este conjunto es que los dipolos perderán la señal si se colocan demasiado separados, disminuyendo así la capacidad de ver más profundamente en la Tierra [63].

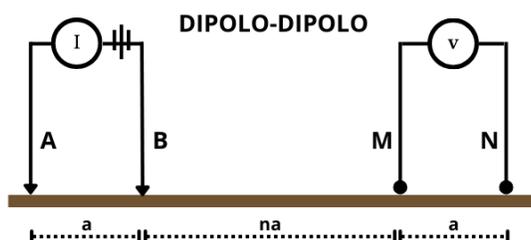


Figura 2.7. Esquema del arreglo tipo Dipolo-Dipolo (elaboración propia).

- Wenner.

Este arreglo consta de cuatro electrodos en línea, separados por intervalos iguales (Figura 2.8.). La matriz Wenner fue inventada en 1915 por el físico estadounidense Frank Wenner. La matriz Wenner se usa comúnmente en la creación de perfiles someros para la exploración lateral del suelo, por lo que es ampliamente recomendada en las calicatas eléctricas, pero está en desventaja al realizar estudios eléctricos verticales, ya que su separación se tiene que mantener constante y no esta diseñada para obtener datos a grandes profundidades [64].

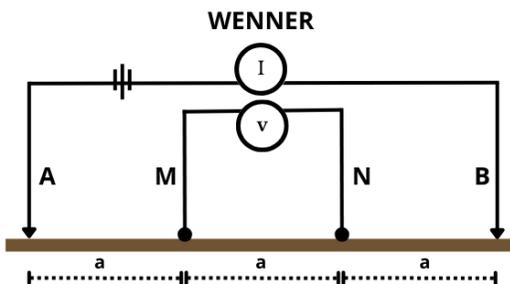


Figura 2.8. Esquema del arreglo tipo Wenner (elaboración propia).

- Schlumberger.

La matriz de Schlumberger es una matriz en la que se colocan cuatro electrodos en línea alrededor de un punto medio común. Los dos electrodos exteriores, A y B, son electrodos de corriente, y los dos electrodos interiores, M y N, son electrodos de potencial colocados muy juntos (Figura 2.9.). En este tipo de arreglo, para cada medición, los electrodos de corriente A y B se mueven hacia afuera para lograr una mayor separación durante todo el estudio, mientras que los electrodos de potencial M y N permanecen en la misma posición. La distancia razonable entre M y N debe ser igual o menor que un quinto de la distancia entre A y B al principio. Esta relación llega hasta un décimo o un quinceavo dependiendo de la intensidad de la señal. El conjunto de Schlumberger se utiliza comúnmente para sondeos eléctricos verticales (SEV) debido a que proporciona una mejor resolución en zonas poco someras, por lo que su diseño facilita el mover solo los electrodos externos cuando se requiera de un mayor alcance a profundidad [65].

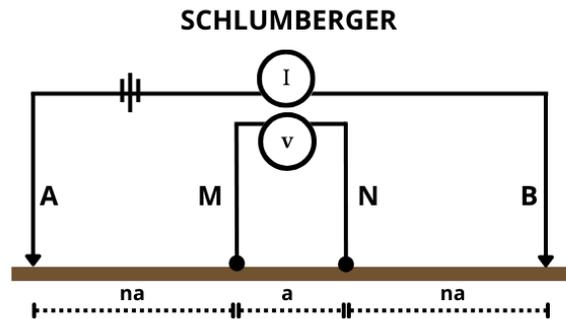


Figura 2.9. Esquema del arreglo tipo Schlumberger (elaboración propia).

2.5.2 El método de resistividad eléctrica.

Mide la resistividad eléctrica del suelo (inversa de la conductividad eléctrica). En los estudios de resistividad eléctrica, se introducen en el suelo corrientes eléctricas generadas artificialmente por un par de electrodos introducidos en el suelo o en pozos, las diferencias de potencial resultantes se miden en la superficie [65].

Los diferentes tipos de composiciones de suelo, sedimentos y rocas tienen diferentes resistividades eléctricas. Los estudios de RE permiten determinar la distribución espacial de las características resistivas o conductoras de los materiales terrestres del subsuelo. Las condiciones anómalas o faltas de homogeneidad dentro del subsuelo, como capas eléctricamente conductoras, se infieren porque desvían la corriente y distorsionan los potenciales. La litología, la mineralogía, la química de los fluidos de los poros, el contenido de arcilla, el contenido de materia orgánica y el contenido de agua afectan la resistividad eléctrica. Las lecturas eléctricas se registran utilizando un instrumento de resistividad eléctrica llamado resistivímetro [63, 66].

El método de resistividad eléctrica se diseñó por primera vez para determinar la estructura vertical de las capas de la tierra, llegando a conocerse como sondeo eléctrico vertical (SEV). Sin embargo, ahora se utilizan ampliamente métodos más sofisticados de imágenes de resistividad eléctrica en 2D, 3D y 4D con el fin de mapear variaciones eléctricas laterales y verticales en el subsuelo. Dentro de los más comunes se encuentran, los SEV, las calicatas eléctricas y la polarización inducida, así como la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) [66]. Esta gran variedad de tecnologías permite la apertura de un abanico de posibilidades de aplicación, permitiendo solucionar distintos problemas relacionados al suelo (Tabla 2.6.).

Tabla 2.6. Aplicaciones del método de resistividad eléctrica para la solución de problemas relacionados al suelo [64, 66, 70].

APLICACIONES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	
Problemas geológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios de geología kárstica. • Localización de sumideros, huecos y sistemas de cuevas. • Mapeo litológico y estratigráfico. • Localización de estructuras geológicas (fisuras, fallas, zonas de fractura, zonas de corte).
Problemas ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Detección de vertederos. • Mapeo de intrusiones salinas. • Caracterización ambiental de un sitio. • Mapeo de contaminantes en suelos y aguas subterráneas. • Mapeo y monitoreo de columnas de contaminantes y lixiviados.
Problemas de ingeniería	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeo de servicios públicos. • Mapeo de hundimiento. • Mapeo de resistividad del suelo para protección catódica. • Localización de pozos mineros y trabajos mineros.
Problemas arqueológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Investigaciones arqueológicas. • Delineación del sitio arqueológico. • Mapeo de estratigrafía de suelos para investigaciones geoarqueológicas.
Problemas hidrológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Exploración de aguas subterráneas. • Estudios hidrogeológicos. • Evaluación del potencial y heterogeneidad del acuífero. • Mapeo y seguimiento de la contaminación de las aguas subterráneas.
Problemas de recursos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Exploración de minerales. • Mapeo de diques enterrados y otros yacimientos. • Exploración geotérmica poco profunda.

- **Sondeos eléctricos verticales.**

Si se mantiene el punto central (I) y se va abriendo sucesivamente la distancia A-B y N-M, la corriente eléctrica atravesará cada vez a mayor profundidad [67]. Los sucesivos valores de $\rho(a)$ a obtener corresponderán a profundidades cada vez mayores, por lo que decimos que estamos realizando un sondeo eléctrico vertical (SEV) [68]. En la Figura 2.10. se aprecia que la profundidad de investigación va aumentando según pasamos de A-B a A'-B' y a A''-B'' & M-N a M'-N' y a M''-N''.

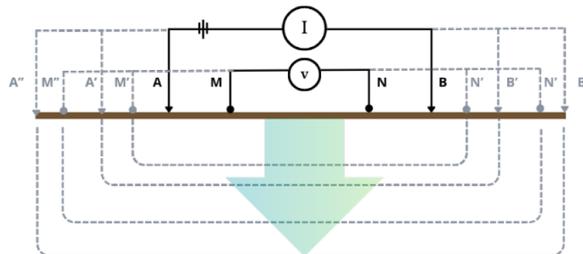


Figura 2.10. Esquema de un SEV. A medida que se abre la distancia AB y NM, aumenta la profundidad de investigación (elaboración propia).

- **Calicata eléctrica.**

En una calicata eléctrica se mantiene la apertura AB y se mueve lateralmente todo el dispositivo junto con el arreglo o bien, se desplazan de manera intercalada los electrodos hacia la izquierda o derecha del arreglo (Figura 2.11.). La profundidad de investigación se mantendrá aproximadamente constante, pero se investigará las variaciones laterales del terreno, esto permitirá un estudio somero que abarque de manera rápida una mayor extensión del área [67].

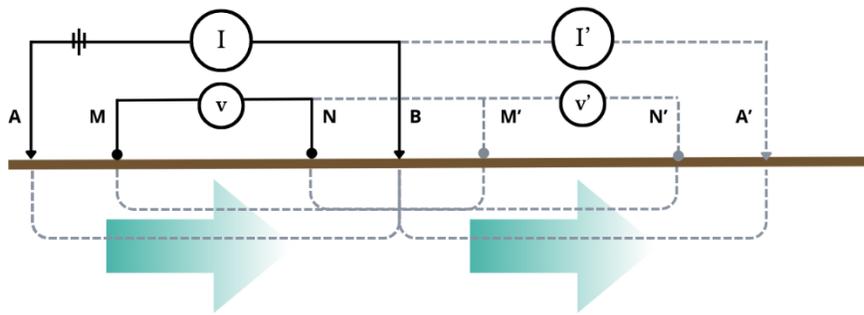


Figura 2.11. Esquema de una calicata eléctrica (elaboración propia).

- **Polarización inducida.**

La polarización inducida (PI) es una técnica complementaria al levantamiento de resistividad eléctrica. Los materiales del suelo (por ejemplo, suelos, fluidos, sedimentos y rocas) pueden disipar (resistencia) y almacenar (capacitancia) la energía asociada con una corriente eléctrica aplicada que fluye a través de ellos. Por lo tanto, las propiedades resistivas y capacitivas de los materiales del subsuelo se miden con un medidor de resistividad eléctrica en un estudio PI [69, 72]. Los métodos de PI y resistividad eléctrica se implementan de manera similar; sin embargo, lo ideal es utilizar electrodos de potencial no polarizante en un estudio de IP. Las mediciones de PI se pueden realizar en modo de dominio de tiempo o de frecuencia.

- **Tomografía de resistividad eléctrica.**

La tomografía de resistividad eléctrica (TER) es el método geoeléctrico más completo y avanzado, ya que permite determinar las variaciones verticales y horizontales de la resistividad eléctrica del subsuelo, a partir de múltiples mediciones en diferentes combinaciones de cuatro electrodos, permitiendo realizar mapas de resistividad eléctrica aparente en 2D, 3D y 4D. Los datos de la TER se recopilan rápidamente mediante un medidor de resistividad eléctrica automatizado de electrodos múltiples [70-71].

2.6 DETERMINACIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS, EMPLEANDO TECNOLOGÍAS QUÍMICAS.

Una vez delimitada la zona contaminada con posible presencia de hidrocarburos, se puede acudir a métodos químicos directos que midan las cantidades en gramos de HC por gramos de suelo (g HC g^{-1} suelo), esto con el fin de corroborar la existencia de los mismos y calcular sus concentraciones en el suelo para conocer el grado de contaminación. [75]

A la medida de una concentración o masa de hidrocarburos de petróleo en una cantidad dada de suelo o agua, se le conoce como hidrocarburos totales de petróleo (TPH por sus siglas en inglés). Aunque la palabra “total” no está empleada correctamente, dado que muy pocos de los procesos para cuantificar HC pueden medir todos los encontrados en una muestra dada, debido a que se pierden HC volátiles en el proceso de muestreo o a veces HC no procedentes del petróleo aparecen en el análisis, como la materia orgánica [73].

Una de las técnicas más utilizadas en el análisis de TPH en suelos, es la establecida en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-134-SCFI-2006, la técnica de extracción Soxhlet.

2.6.1 Extracción Soxhlet.

La extracción Soxhlet es el proceso de transferir los componentes parcialmente solubles de un sólido a fase líquida, utilizando un extractor Soxhlet [73]. Un extractor Soxhlet es un aparato de laboratorio hecho de vidrio, inventado en 1879 por Franz Von Soxhlet, diseñado originalmente para la extracción de un lípido de un material sólido. El extractor tiene tres secciones principales: un percolador (caldera y reflujo) que hace circular el solvente, un dedal (generalmente hecho de papel de filtro grueso) que retiene el sólido a extraer y un mecanismo de sifón, que vacía periódicamente el dedal (Figura 2.12.).

Durante la extracción, el vapor del solvente fluirá por el brazo de destilación, hacia la cámara principal (que alberga el dedal de sólido) y hacia el condensador donde se condensará y goteará. El disolvente llenará la cámara principal, disolviendo parte del compuesto deseado de la muestra sólida. Una vez que la cámara está casi llena se vacía mediante el sifón, devolviendo el disolvente al matraz de fondo redondo para comenzar nuevamente el proceso. Cada vez que se repite la extracción, se disuelve más el compuesto deseado, dejando las impurezas insolubles en el dedal [74].

En suelos contaminados por HC, la extracción Soxhlet busca separar todas las posibles grasas de HC de las partículas de suelo mediante el uso de un solvente, empleando un sistema automatizado. Normalmente para suelos con HC se pueden utilizar tres diferentes disolventes: metanol, hexano o diclorometano, siendo el metanol el de mayor eficacia para recuperar los hidrocarburos del suelo [75].

Este método es uno de los procedimientos de lixiviación sólido-líquido más apropiados para la extracción de compuestos orgánicos no volátiles y semivolátiles presentes en muestras de suelo, debido a que garantiza una transferencia efectiva de los HC presentes en el suelo al solvente [73].

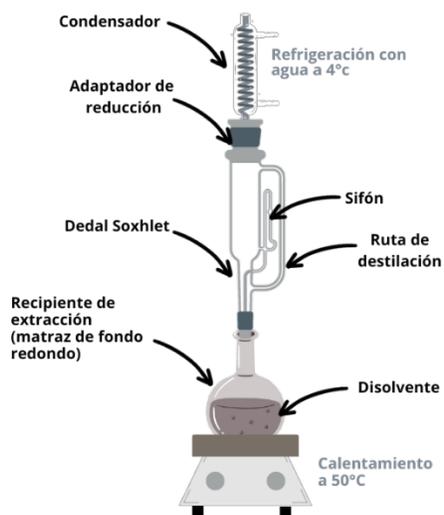


Figura 2.12. Esquema de los componentes del extractor Soxhlet (elaboración propia).

2.7 REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS.

La remediación es el tratamiento o el conjunto de técnicas que se realizan con el fin de recuperar la calidad de un suelo contaminado. Pevio a cualquier tipo de tratamiento de suelos para su remediación, es necesario realizar estudios del sitio contaminado, ya que la selección de la técnica a emplear dependerá de las características físicas, químicas y biológicas del suelo a recuperar; así como del tipo de contaminante y de las necesidades de la persona interesada [76].

Las técnicas de remediación incluyen tanto la transferencia de contaminantes de una matriz a otra para un tratamiento posterior, el confinamiento, la reducción, o en el mejor de los casos, la remoción total de los contaminantes en la misma zona. Bajo estas alternativas, los principios de las técnicas de remediación se pueden dividir en físicos, químicos o biológicos.

2.7.1 Tratamientos físicos de remediación.

La remediación física incluye principalmente los métodos de sustitución de suelos y el de desorción térmica.

- **Sustitución.**

El material contaminado se retira y se transporta a instalaciones de tratamiento, confinamiento y/o eliminación autorizadas fuera del sitio. Posteriormente, se utiliza suelo limpio con las mismas características fisicoquímicas del suelo de la zona para reemplazar al que está contaminado, de esta manera se eliminan las concentraciones del contaminante y se restablece la capacidad ambiental de los suelos para realizar sus tareas [77].

La sustitución se aplica a toda la gama de grupos de contaminantes y de suelo pero, la principal desventaja es que la distancia desde el sitio contaminado, así como la cantidad de suelo a transportar hasta la instalación de confinamiento más cercana con los permisos requeridos, podría afectar potencialmente el costo.

- **Desorción térmica.**

Se basa en la aplicación de calor mediante vapor, microondas, o radiación infrarroja para volatilizar y/o descomponer los compuestos orgánicos que afectan al suelo a temperaturas que oscilan entre los 90°C y los 540°C. La desorción térmica se diferencia de la incineración, porque la desorción no altera las características físicas del suelo, favoreciendo su reutilización [78].

La principal ventaja del tratamiento de desorción térmica es que es *in-situ*, por lo que permite tratar el suelo sin necesidad de excavarlo ni transportarlo, lo que supone un

importante ahorro de costos. Sin embargo, el tratamiento generalmente requiere períodos de tiempo largos y no hay certeza sobre la uniformidad del tratamiento debido a la variabilidad de las características del suelo, porque la eficacia del proceso es más difícil de verificar. Además, es uno de los tratamientos más costosos debido al uso de energía y del equipo requerido.

2.7.2 Tratamientos químicos de remediación.

En la remediación química se incluyen técnicas como la lixiviación química, la remediación electrocinética o electro-remediación y la vitrificación.

- **Lixiviación química.**

Se lava el suelo contaminado utilizando agua, reactivos químicos de limpieza u otros fluidos o gases que puedan disolver los contaminantes del suelo. La desventaja que presenta, es que el suelo pueda perder sus compuestos nutritivos debido al arrastre del agua, los suelos de baja permeabilidad o heterogéneos son difíciles de tratar, y los surfactantes pueden adherirse al suelo y reducir la porosidad efectiva del suelo [77].

- **Remediación electrocinética o electro-remediación (ER).**

Es una tecnología novedosa que se basa en la aplicación de voltaje en el suelo mediante el empleo de 2 o más electrodos para formar un gradiente eléctrico, y que el contaminante sea arrastrado hacia uno de los electrodos mediante procesos electrocinéticos [78].

- **Vitrificación.**

Se refiere al calentamiento del suelo a temperaturas de 1400 a 2000 °C, para que la materia se volatilice o descomponga [79].

2.7.3 Tratamientos biológicos de remediación.

En las tecnologías de remediación biológicas de suelo se incluyen la fito-remediación y la bio-remediación.

- **Fito-remediación (FR).**

Consiste en aprovechar la capacidad de ciertas plantas para reducir la concentración y/o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el suelo, esto a partir de procesos bioquímicos realizados por ellas y sus microorganismos asociados a las raíces que conducen a la reducción, mineralización, degradación y/o volatilización de los contaminantes. Existen diferentes tipos de fito-remediación, pero las técnicas más comunes son la fitoestabilización, la fitovolatilización y la fitoextracción [80].

- **Bio-remediación.**

Se basa en la capacidad de los microorganismos para degradar o destruir los contaminantes, ya sea evitando la migración a partes más profundas del subsuelo, o transformandolos a través de modificaciones de sus características físicas o químicas en sustancias menos peligrosas [110].

2.8 ELECTRO-REMEDIACIÓN

El proceso de electro-remediación (ER) o remediación electro-cinética (REC), es una tecnología basada en la generación de un campo eléctrico de baja intensidad a través de la aplicación de una corriente directa por medio de electrodos (ánodo y cátodo) esto moviliza partículas cargadas eléctricamente, lo que hace que los iones y el agua se muevan hacia los electrodos [81] (Figura 2.13.). Los electrodos juegan un papel importante al producir las reacciones de hidrólisis, así como los procesos de oxidación-reducción. Los iones metálicos, los iones de amonio y los compuestos orgánicos cargados positivamente se mueven hacia el cátodo. Aniones como cloruro, cianuro, fluoruro, nitrato y compuestos orgánicos cargados negativamente se mueven hacia el ánodo [82]. Normalmente los utilizados durante el tratamiento electrocinético de suelos están constituidos solamente por un material como el acero o el Ti. Sin embargo, estos materiales pueden ser recubiertos con una gran diversidad de compuestos proveyéndole propiedades diferentes al electrodo.

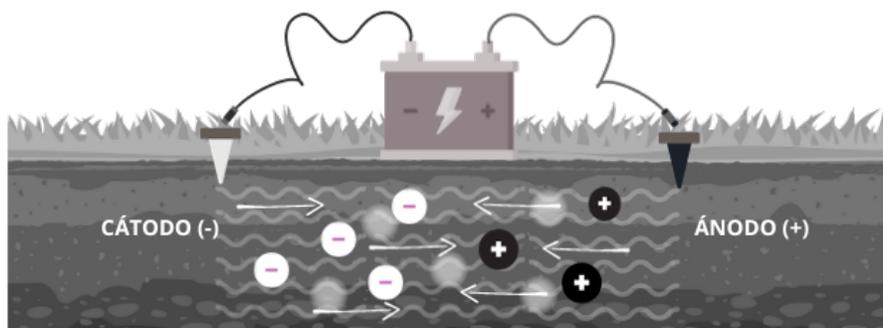


Figura 2.13. Esquema representativo del proceso de electro-remediación (elaboración propia).

La corriente crea un frente ácido en el ánodo, y un frente básico en el cátodo. Esta generación de condiciones ácidas *in-situ* puede ayudar a movilizar los contaminantes metálicos absorbidos, para transportarlos al sistema de recolección en el cátodo [76]. En este proceso, los fenómenos de transporte de masa que intervienen son:

2.8.1 Electromigración.

El fenómeno consiste en el movimiento de iones hacia los electrodos de carga opuesta, es decir, los iones de carga negativa (aniones) se moverán hacia el electrodo cargado positivamente (ánodo), y los iones de carga positiva (cationes) se dirigirán hacia el electrodo cargado negativamente (cátodo) [81].

2.8.2 Electroósmosis.

Se refiere al transporte de masa del fluido a través de los poros del suelo bajo la influencia de un gradiente de potencial. Un campo eléctrico en un suelo humectado genera un movimiento de los iones, dirigiéndolos hacia el electrodo polarizado con carga opuesta. Este proceso provoca un movimiento del agua, arrastrando el fluido a través de los poros del suelo. La electro-migración siempre va a generar un flujo electro-osmótico a través de los poros del suelo cuando este se encuentre humectado. Para la remoción de compuestos sin carga o débilmente cargados, como los HC, la electroósmosis es el mecanismo de transporte más importante, debido al flujo del electrolito [82].

2.8.3 Electroforesis.

Se define como el flujo de masa de partículas, bacterias o coloides presentes en el suelo cargadas disueltas o suspendidas en el fluido entre los poros, debido a la imposición de un campo eléctrico [83].

Además de estos fenómenos de transporte, están presentes otras reacciones inducidas electroquímicamente dentro del suelo, así como reacciones redox que ocurren en las superficies de los electrodos, como la electrólisis del agua. La eficiencia de la ER depende de la naturaleza de las sustancias presentes en el suelo, así como de las propiedades del mismo. El proceso de electrólisis de agua ocurre en la superficie de los electrodos, al aplicar una corriente eléctrica suficiente que origina una frontera ácida en

el ánodo debido a la generación de iones de hidrógeno (H^+), y una frontera básica en el cátodo por la creación de iones de hidroxilo (OH^-), los cuales se mueven hacia electrodos de carga opuesta. Las reacciones de electrólisis dependen del tipo y disposición de los electrodos, así como del electrolito y el potencial eléctrico que se use durante la electro-remediación [82].

Las reacciones redox producidas por el flujo eléctrico en la superficie de los electrodos destruyen los compuestos orgánicos, principalmente alrededor de los ánodos. Si no se encuentra algún compuesto orgánico oxidable, se produce oxígeno, pero en presencia de compuestos orgánicos oxidables la reacción de oxidación toma lugar, bajo potenciales de celda superiores a 1V. La oxidación anódica y la electrólisis son favorecidas mediante el empleo de ánodos inertes, como carbono, grafito o platino, para que no se introduzcan residuos en la masa de suelo tratada. Además, tienen una buena estabilidad química, así como un tiempo de vida prolongado. Los electrodos metálicos pueden disolverse como resultado de la electrólisis e introducir productos corrosivos en la masa del suelo [81].

2.9 FITORREMEDIACIÓN

La fito-remediación es un conjunto de tecnologías *in-situ* o *ex-situ* que reducen la concentración de compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas [84]. Esta técnica utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes. Se han identificado una amplia diversidad de especies vegetales que se emplean para este fin, algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras [80].

2.9.1 Tecnologías de fitorremediación.

La fitorremediación se basa en los mecanismos fisiológicos básicos que realizan las plantas y los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición para tratar contaminantes [85]. Dependiendo del contaminante, las condiciones del suelo y el nivel de limpieza requerido, las técnicas de fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización) [87] (Figura 2.14.).

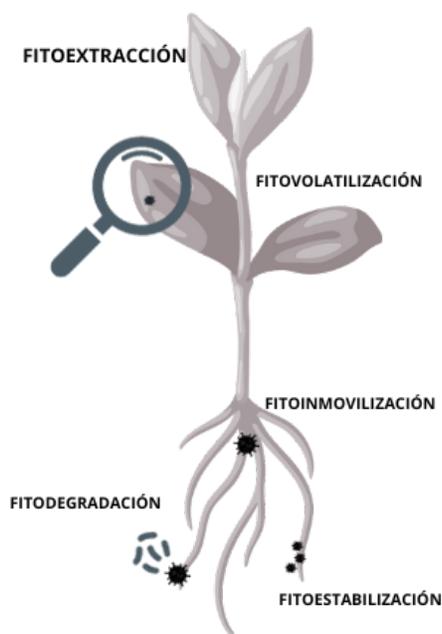


Figura 2.14. Esquema representativo las técnicas de la fitorremediación en las plantas (elaboración propia).

- **Fitodegradación.**

Algunas plantas tienen la capacidad de absorber y descomponer contaminantes dentro de los tejidos vegetales mediante actividad enzimática interna. En la fitodegradación, los

contaminantes orgánicos se degradan directamente, mediante la liberación de enzimas de las raíces o mediante la actividad metabólica dentro de los tejidos de las plantas. Los contaminantes orgánicos son absorbidos por las raíces y convertidos en tejidos vegetales en compuestos menos peligrosos durante la fitodegradación. La descomposición de los contaminantes absorbidos por las plantas a través de procesos metabólicos dentro de la planta, o la descomposición de toxinas en el medio ambiente por la acción de enzimas producidas por la planta, se conoce como fitodegradación [87]. Las plantas pueden desarrollar enzimas que catalizan y aceleran el proceso de degradación. Como resultado, los contaminantes orgánicos se degradan a formas moleculares más simples y se incorporan a los tejidos vegetales para promover el crecimiento de las plantas [85].

- **Fitoestabilización.**

La fitoestabilización es un método en el que se utilizan especies de plantas particulares para inmovilizar contaminantes en el suelo y las aguas subterráneas. Las sustancias químicas secretadas por la planta inmovilizan los contaminantes en lugar de descomponerlos en este proceso. Dentro de la zona de las raíces, se les impide migrar a través del suelo, así como ser transportados por la erosión. Es eficaz para inmovilizar contaminantes solubles en agua y prevenir su migración [86].

- **Fitoextracción (Fitoacumulación).**

La fitoextracción es el proceso de captación/absorción y translocación de contaminantes por parte de las raíces de las plantas hacia los brotes u hojas de las mismas, que luego pueden cosecharse y metabolizarse para obtener energía y reciclar metales a partir de las cenizas. Durante este proceso, la rizosfera de las raíces de las plantas absorbe los contaminantes, así como otros nutrientes y agua [88]. El contaminante no se desintoxica sino que se almacena en partes de las plantas, como tallos y hojas. Este enfoque se utiliza más comúnmente para contaminantes como metales pesados e HC. Los metales

solubles en agua son absorbidos por especies de plantas seleccionadas por su capacidad para absorber cantidades significativas de plomo (Pb) [89].

- **Rizofiltración.**

La rizofiltración es un tipo de fitorremediación que elimina sustancias químicas peligrosas y el exceso de nutrientes mediante la filtración de aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas residuales contaminadas a través de las raíces. La rizofiltración es similar a la fitoacumulación, excepto que las plantas empleadas se cultivan en invernaderos con sus raíces en el agua en lugar de en el suelo [87]. El agua subterránea sube a la superficie para regar estas plantas y, durante ese tiempo, los contaminantes quedan atrapados en varias partes de las plantas. En los sistemas hidropónicos se suele utilizar un medio de suelo sintético, como arena mezclada con perlita o vermiculita. Las raíces se recogen y se eliminan tan pronto como se contaminan [88].

- **Fitovolatilización.**

Las plantas absorben agua de la litosfera que contiene contaminantes orgánicos y liberan las impurezas como componentes volátiles al aire a través de sus hojas. La fitovolatilización se define como la absorción y eliminación de un contaminante por una planta, seguida de la liberación del contaminante o una versión modificada del mismo a la atmósfera por la transpiración de la planta [80]. La fitovolatilización ocurre cuando los árboles en crecimiento y otras plantas absorben agua, así como toxinas en ella. En cantidades relativamente bajas, estos contaminantes viajan a través de las plantas hasta las hojas y se evaporan a la atmósfera. Las ventajas y desventajas de la técnica de fitorremediación se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Ventajas y desventajas de la fitorremediación [80, 88, 87]

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITO-REMEDIACIÓN.	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • La fitorremediación es una tecnología rentable ya que no requiere de equipos sofisticados o de gran tamaño. • Hace que los sitios de remediación sean más estéticos por la presencia de las plantas. • Debido a que utiliza organismos naturales y protege el ecosistema en una condición más natural, tiene el potencial de ser la estrategia menos destructiva. • Protege la capa superior del suelo, asegurando su fertilidad. • Mejora la salud del suelo, así como su rendimiento. • No se requiere eliminación de biomasa o material peligroso. • Evita la excavación y el transporte de masa contaminada, reduciendo así el riesgo de propagación de la contaminación. • Tiene potencial para tratar más de un tipo de contaminante en sitios contaminados. • No requiere un sitio de disposición. 	<ul style="list-style-type: none"> • La fitorremediación requiere de las condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas como el clima, la temperatura, la altitud, etc. • El éxito depende de la tolerancia de las plantas a los contaminantes. • Al absorber metales pesados, el metal puede unirse a la materia orgánica del suelo, haciendo imposible que la planta lo elimine. • El desarrollo de una zona extensa requiere tiempo. • Los contaminantes pueden ingresar a la cadena alimentaria y afectar el nivel ecológico de organización. • Es mucho más lento que otros métodos mecánicos.

2.9.2 Electro-fitorremediación.

Aunque la fitorremediación y la electro-remediación son tecnologías eficientes para eliminar contaminantes orgánicos del suelo, se puede obtener una intensificación significativa de la asociación de los mismos, potenciando el transporte masivo [90].

La combinación de la fitorremediación y la electro-remediación ha dado una alternativa híbrida donde se plantea que debido a la fuerza motriz producida por el paso de corriente eléctrica, los contaminantes pueden migrar a través del suelo, de ánodo a cátodo o viceversa, facilitando posteriormente la absorción de las partículas restantes de HC por las plantas. [4]

Estas páginas fueron eliminadas 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 2021, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021.

1. Llano, et al. (2017). *Ductos, ¿por dónde circulan los hidrocarburos en México?* [mapa]. Escala 1:3,500,000. México: CartoCrítica / Fundación Heinrich Böhl.
2. Méndez, E. (2012). *Effect in the Physical and Chemical Properties of Gleysol Soil after an Electro-kinetic Treatment in Presence of Surfactant Triton X - 114 to Remove Hydrocarbon*. International Journal of Electrochemical Science. Vol. 6, 1250 – 1268.
3. Shevnin V. et al. (2005). *Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, México*. Geofísica Internacional, 44, 251-263.
4. Acosta, S. et al. (2019). *Analysis of the biological recovery of soils contaminated with hydrocarbons using an electrokinetic treatment*. J. Hazard. Mater. 371, 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.015>
5. Tarbuck, E. et al. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed.
6. Cernansky, R. (2015). *Agriculture: State-of-the-art soil*. Nature News, 517(7534): 258. <https://doi.org/10.1038/517258a>
7. Stefan K. & Gурpal T. (2017). *The Composition of Soils and Sediments*. 10.1016/B978-0-12-809270-5.00014-5.
8. Morgan, R. (2013). *Soil, heavy metals, and human health*. Soils and human health, pp. 59–82.
9. Ditzler, C. & Scheffe, K. (2017). *Soil survey sand*. USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
10. Khan, A. et al. (2015). *The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review*. Environmental Science and Pollution Research, 22(18): 13772–13799. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4881-0>
11. Stanley, W., & McCracken, W. (1997). *Soil Genesis and Classification*. 4th ed. Iowa State University Press, Ames, ISBN 0-8138-2873-2
12. Vander, B et al., (2005). *Soils, Weathering, and Nutrients*. Global Change 1 Lectures. University of Michigan.
13. Eswaran, H. et al. (2002). *Soil classification: a global desk reference*. Boca Ratón, Fla: CRC Press.
14. Schad, S. et al. (2018). *Essentials of Soil Science. Soil formation, functions, use and classification (World Reference Base, WRB)*. Borntraeger Science Publishers, Stuttgart 2018. ISBN 978-3-443-01090-4.
15. IUSS Working Group WRB. (2014). *Base referencial mundial del recurso suelo, Informes sobre recursos mundiales de suelos*. FAO, Roma 2016. ISBN 978-92-5-308369-5.
16. Brady, C. & Ray, R. (2018). *Elements of the Nature and Properties of Soils*. Environment International. Elsevier 4, 95-99.
17. Gonzalez, et al. (2004). *The effect of fire on soil organic matter-a review*. Environment International. Elsevier 30, 855–870.
18. Foth, D. (1990). *Fundamentals of Soil Science 8th Edition*. Canada: John Wiley & Sons. p. 23. ISBN 0-471-52279-1.
19. Marshall, T. (1947). *Mechanical composition of soil in relation to field descriptions of texture*. Council for Scientific and Industrial Research, Bulletin No. 224, Melbourne.
20. Dexter, R. (1988). *Advances in characterization of soil structure*. Soil and Tillage Research. 11 (3–4): 199–238.
21. Cockroft, B. & Olsson, K. (2000). *Degradation of soil structure due to coalescence of aggregates in no-till, no-traffic beds in irrigated crops*. Australian Journal of Soil Research. 12, 121-125
22. Soil Survey Staff (2014). *Keys to Soil Taxonomy" (12th ed.)*. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Archived from the original on 2018-11-28. Retrieved 2023-05-02.
23. FAO (2006). *Guidelines for Soil Description*. Fourth Edition". FAO, Rome.
24. Sumner, E. (1999). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. 232-235. ISBN 978-0-8493-3136-7.
25. Laak, et al. (2006). *Freely Dissolved Concentrations of PAHs in Soil Pore Water: Measurements via Solid-Phase Extraction and Consequences for Soil Tests*. Environmental Science & Technology, 40: 1307–1313. <https://doi.org/10.1021/es0514803>
26. Håkansson, et al. (2000). *A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction*. Soil and Tillage Research. 53 (2): 71–85. doi:10.1016/S0167-1987(99)00095-1

27. Davidson, E. & Janssens, I. (2006). *Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedback to climate change*. Nature. 440 (9 March 2006): 165–73.
28. Moore, T. & Dalva, M. (1993). *The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils*. Journal of Soil Science. 44 (4): 651–664. doi:10.1111/j.1365-2389.1993.
29. Läuchli, A. & Grattan, S. (2012). *Soil pH extremes*. Plant stress physiology (1st ed.). Wallingford, United Kingdom: CAB International. pp. 194–209. doi:10.1079/9781845939953.0194
30. Gevaio, B. & Semple, K. (2000). *Bound pesticide residues in soils: a review*. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 108(1): 3–14.
31. Nyle C. et al. (2008). *The nature and properties of soils (14th ed.)*. Upper Saddle River, USA: Pearson.
32. Barker, D., et al. (2017). *Ohio Agronomy Guide, 15th Edition*. Ohio State University Extension Bulletin 472. agcrops.osu.edu/publications/ohio-agronomy-guide-15th-edition-bulletin-472
33. Havlin, J., et al. (2013). *Soil Fertility and Fertilizers, 8th Edition*. Pearson, New Jersey. ISBN 13: 9780135033739
34. Reganold P. & Harsh, M. (1985). *Expressing cation exchange capacity in milliequivalents per 100 grams and in SI units*. Journal of Agronomic Education 14(2): 84–90.
35. LaBarge, G. and Lindsey, L. (2012). *Interpreting a Soil Test Report*. Ohio State University Extension AGF-514. ohioline.osu.edu/factsheet/AGF-514
36. Doerge, T. & Lund, E. (1999). *Soil Electrical Conductivity Mapping*. SSMG-30. Site Specific Management Guidelines series was published by the Potash & Phosphate Institute (PPI). Retrieved from [ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C1EA593A941AC78C852579E50077879D/\\$FILE/SSMG-30.pdf](http://ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C1EA593A941AC78C852579E50077879D/$FILE/SSMG-30.pdf)
37. Ortiz, B. et al (2009). *Soil Electrical Conductivity Mapping: A Tool for Within-Field Soil Variability Assessment*. Auburn, AL: Alabama Cooperative Extension System, Precision Ag Series
38. Da Silva, H. (1979). *Trabajos Prácticos de Edafología y su fundamentación teórica*. Universidad Nacional de Catamarca. Facultad de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
39. Etchevehere, P. (1976). *Normas de reconocimiento de suelos*. Dto. de Suelos INTA, publicación 152, Castelar.
40. Forsythe, W. (1980). *Física de suelos; manual de laboratorio*. San José. C.R. IICA. 212p
41. Gavande, S. (1972). *Física de Suelos: Principios y Aplicaciones*. México. Editorial Limusa-Wiley 351 p
42. Hoorman, J. et al (2011). *The Biology of Soil Compaction*. Journal of No-till Agriculture, Volume 9, No. 2, pg. 583-587.
43. Ingham, E. (2009). *Soil Biology Primer, Chapter 4: Soil Fungus*. Ankeny IA: Soil & Water Conservation Society. Pg. 22-23. soils.usda.gov/sqi/concepts/soil_biology
44. Dick, R. (2009). *Lecture on Soil Bacteria in Soil Microbiology*. The Ohio State University School of Environment and Natural Resources, Columbus, OH.
45. Dick, W. (2009). *Lecture on Biochemistry Process in Soil Microbiology*. The Ohio State University School of Environment and Natural Resources, Columbus, OH.
46. Zech, W. et al. (2022). *Soils of the World*. Springer, Berlin 2022, Chapter 11.3.1. ISBN 978-3-540-30460-9
47. Brady, N. & Weil, R. (2016). *The Nature and Properties of Soils (15th ed.)*. Pearson Education, Inc.
48. Shedekar, V. (2023). *Soil health & water quality*. The Ohio State University, and Dr. Will Osterholz, USDA Agricultural Research Service.
49. George, R. et al. (2016). *Treatment Methods for Contaminated Soils – Translating Science into Practice*. International Journal of Education and Applied Research.
50. Olawoyin, R. et al. (2012). *Potential risk effect from elevated levels of soil heavy metals on human health in the Niger delta*. Ecotoxicology and Environmental Safety. 85: 120–130.
51. Snyder, C. (2005). *The dirty work of promoting "recycling" of America's sewage sludge*. Int J Occup Environ Health. 11 (4): 415–27. doi:10.1179/oeht.2005.11.4.415

52. Agarwal, A. & Liu, Y. (2015). *Remediation technologies for oil-contaminated sediments*. Marine Pollution Bulletin. 101 (2): 483–490.
53. Panagos, P. & Montanarella, L. (2013). *Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation Based on Data Collected through a European Network*. Journal of Environmental and Public Health In Press. doi:10.1155/2013/158764.
54. Hall, P. (2016). *Facing the Possibility of Leasing for Shale Gas Development on Your Land*. Ohio State University Extension. Retrieved from ohioline.osu.edu/factsheet/anr-30
55. Wright, P. et.al. (1986). *Oil and Gas Leases in Ohio*. Bulletin 732. Ohio State University Extension.
56. Shafy, A. & Mansour, I. (2016). *A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation*. Egyptian Journal of Petroleum, 25(1): 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
57. Basile, B. & Oró, J. (1984). *Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Murchison meteorite*. Organic Geochemistry, 5(4): 211–216. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(84\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0146-6380(84)90008-1)
58. Bayat, J. & Deihimfard, R. (2016). Fingerprinting aliphatic hydrocarbon pollutants over agricultural lands surrounding Tehran oil refinery. Environmental Monitoring and Assessment, 188(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5614-7>
59. Cachada, A. et al (2016). *Risk assessment of urban soils contamination: The particular case of polycyclic aromatic hydrocarbons*. Science of The Total Environment, 551–552: 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.012>
60. Conte, P. & Piccolo, A. (2001). *Increased retention of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils induced by soil treatment with humic substances*. Environmental Pollution, 112(1): 27–31. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00101-9)
61. Fritt-Rasmussen, J. et al. (2012). *Hydrocarbon and Toxic Metal Contamination from Tank Installations in a Northwest Greenlandic Village*. Water, Air, & Soil Pollution, 223(7): 4407–4416. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1204-7>
62. Atekwana, E. et al. (2000). *Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site*. Journal of Applied Geophysics, 44, 167-180.
63. Rodríguez, O. et al. (2006). *Geoelectrical characterization of a site with hydrocarbon contamination caused by pipeline leakage*. Geofísica Internacional, 45, 63-72.
64. Hernández, J. & Rodríguez, A. (2008). *Aplicación de métodos geoeléctricos para el diagnóstico de un sitio urbano contaminado por hidrocarburos*. Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis de licenciatura, 149 p.
65. Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Madrid, España, Editorial Paraninfo, 578 p.
66. Pellerin, L. (2002). *Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations*. Surveys in Geophysics, 23, 101-132.
67. Sauck, W. (2000). *A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments*. Journal of Applied Geophysics, 44, 151-165.
68. Ballukraya, P. & Baratan, R. (1983). *Breaks in Resistivity Sounding Curves as Indicators of Hard Rock Aquifers*. Nordic Hydrology, 14: 33-40. European Association of Exploration Geophysicists (1980).- Standards Graphs for Resistivity Prospecting.
69. Meyer, C. (1991). *Applications de la Géophysique aux recherches d'eau*. Lavosier, 183 pp.
70. Orellana, E. (1972). *Prospección Eléctrica en Corriente Continua*. Paraninfo, 523 pp.
71. Orellana, E. & Mooney, E. (1966). *Tablas y curvas patrón para Sondeos Eléctricos Verticales sobre terrenos estratificados*. Interciencia, Madrid.
72. Wightman, W. et al. (2003). *Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems*. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, Publication No. FHWA-IF-04-021.
73. Mumtaz, M. (1995). *Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. Atlanta, Ga, USA: U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
74. Guerin, T. (1998). *The extraction of aged polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) residues from a clay soil using sonication and a Soxhlet procedure: a comparative study*. Journal of Environmental Monitoring, p134-14.

75. Graham, M. & Allan, R. (2006). *Investigation of extraction and clean-up procedures used in the quantification and stable isotopic characterisation of PAHs in contaminated urban soils*. Science of the Total Environment. P181-189.
76. De la rosa, P. & Teuli, M. (2007). *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 3, 129-138.
77. Zhou, D. et al. (2004). *Advances in remediation technologies of contaminated soils*. Ecology and Environmental Sciences, 13(2): 234-42.
78. Qian, S. & Liu Z. (2000). *An overview of development in the soil-remediation technologies*. Chemical Industrial and Engineering Process, 4: 10-2, 20.
79. Xia, X. & Chen, J. (1997). *Advances in the study of remediation methods of heavy metals-contaminated soil*. Environmental Science, 18(3): 72-6
80. Bach, K. (2018). *Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta yaluzai (senecio rudbeckiaefolius) en la relavera de quiulacocha del distrito de simón bolívar de rancas*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
81. Acar, Y. & Alshwabkeh, A. (1993) *Principles of electrokinetic remediation*. Environ Sci Technol 27(13):2638–2647
82. Alshwabkeh, A. (2009). *Electrokinetic soil remediation: challenges and opportunities*. Sep Sci Technol 44:2171–2187
83. Pérez, M. (2016). *Electroremediation of hydrocarbon contaminated Vertisol type soil employing different electrode configurations*. Sustainable Environment Research., 23 Vol. 4, 285-288.
84. Sangabriel, W. et al. (2006). *Tolerancia y Capacidad de Fitorremediación de Combustóleo en el Suelo Por Seis Especies Vegetales*. Revista internacional de contaminación ambiental. 22(2006), 63-73.
85. Ali, H. & Sajad, M. (2013). *Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications*. Chemosphere 91:869–888.
86. Alkorta, I. et al. (2004). *Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic*. Reviews in Environmental Science and Biotechnology. 3:71–90.
87. Baghour, M. et al. (2001). *Influence of root temperature on phytoaccumulation of As, Ag, Cr, and Sb in potato plants (Solanum tuberosum L. var. Spunta)*. Journal of Environmental Science and Health, 36:1389–1401.
88. Bloom, A. et al. (1987). *Plant Responses to Multiple Environmental Factors*. Bioscience 37:49–57.
89. Chen, Y. et al. (2006). *Impacts of chelate-assisted phytoremediation on microbial community composition in the rhizosphere of a copper accumulator and non-accumulator*. Sustainable Environment Research.356:247–255. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.04.028
90. Bi, R. et al. (2011). *Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (Brassica napus) and tobacco (Nicotiana tabacum)*. Chemosphere, Volume 83, Issue 3. Pages 318-326, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.12.052>.
91. Delgado H. et al. (2006). *Geoelectrical characterization of a site with hydrocarbon contamination caused by pipeline leakage*. Geofísica Internacional, 45, 63-72.
92. Ramírez, D. (2010). *Caracterización y Posterior Remediación Electro-cinética de Suelo Tipo Vertisol Pélico Contaminado con Hidrocarburo Procedente de una Zona Industrial*. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQU).
93. Yang, G. C., & Long, Y. W. (1999). *Removal and degradation of phenol in a saturated flow by in-situ electrokinetic remediation and fenton-like process* Journal of hazardous materials. 1999, 69 (3) 259-271.
94. Li, A., Cheung, K.T. & Reddy, K.R. (2000). *Cosolvent-enhanced electrokinetic remediation of soils contaminated with phenanthrene*. Journal of Environmental Engineering. 126, 527-533.
95. Hernández, I., & Navas, G. et al. (2016). *Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extrapesado con megathyrus maximus*. Rev. Int. Cont., 33(2016), 495-503.
96. Yang, E. et al. (2002) *A new lead tolerant and accumulating ecotype-Sedum alfredii H*. Acta Bot. Sinica 44, 1365–1370.
97. Elhag et al. (2018). *Evaluation of Aloe vera L. as phytoremediator of heavy metals contaminated soils in arid environments*. Ecology and environmental research 16(5):6033-6045.

98. Corona, R. (2014) *Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D para el proyecto HAWC*. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ciencias e ingeniería.
99. Moreno, A & Galván, C. (2013). *Use of electrical resistivity tomography in the study of soil pollution caused by hydrocarbons: Case study in Puebla (Mexico)*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 65(2), 419-426. Recuperado en 28 de septiembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222013000200022&lng=es&tlng=.
100. INEGI. (2017) . *Tetepango, Hidalgo* . Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
101. Centro Estatal de Estudios Municipales del Estado de Hidalgo (1988). *Los Municipios de Hidalgo*. Colección Enciclopedia de los municipios de México. Secretaría de Gobernación.
102. Ramírez, P. (2022). *Pemex registra 176 derrames y fugas de alto impacto ambiental de 2018 a 2021*. Causa Natura. <https://causanatura.org/periodismo-cn/pemex-registra-176-derrames-y-fugas-de-alto-impacto-ambiental-de-2018-a-2021#top>.
103. Badillo, J. (2017). *El Triángulo Rojo, mina de 'oro negro' de huachicoleros*. Revista Milenio, edición Mayo 2017. Disponible en: <https://www.milenio.com/estados/triangulo-rojo-mina-oro-negro-huachicoleros>.
104. Expansión. (2019). General ligado a robo de combustibles es detenido en Guerrero. Revista Expansión. Edición de Julio. Disponible en: <Disponible en: <https://politica.expansion.mx/mexico/2019/07/18/detienen-a-socrates-alfredo-herrera-pegueros-huachicol>>.
105. PEMEX. (2018). *Reporte de tomas clandestinas en 2018*. Disponible en https://www.pemex.com/acerca/informes_publicaciones/Paginas/tomas-clandestinas.aspx.
106. Silvestre, V. & Gobierno Federal. (2002). *NORMA Oficial Mexicana NOM-021-REC/NAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.*,” Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
107. SEMARNAT, “NOM-021-SEMARNAT-2000,” D. Of. la Nación, 2002.
108. CIMMYT. (1999). *Manejo de los ensayos e informe de los datos para el programa de ensayos internacionales de maíz CIMMYT*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. ISBN: 970-648-045-5. México.
109. Fassio, A., et al. (1998). *Maíz: Aspectos sobre fenología*. INIA Uruguay. ISBN: 9974-38-095-2
110. Acuña A. et al. (2008) Caracterización de un proceso de biorremediación de hidrocarburos en deficiencia de nitrógeno en un suelo de Patagonia Argentina. *Ecosistemas* 17, 85–93.
111. Coria, I. & de la Vega, M. (2011). *Determinación de la Efectividad de la Remediación de Suelos Accidentalmente Contaminados con Ácido Sulfúrico mediante Métodos Geofísicos*. Información tecnológica, 22(1), 3-8. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000100002>
112. Núñez, R. et al. (2020). *Tensión de humedad del suelo, crecimiento, eficiencia en el uso del agua y rendimiento de maíz cultivado en el noroeste de México*. Terra Latinoamericana, 38(4), 805-815. Epub 12 de febrero de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.763>
113. Martínez, V. & López, M. (2001). *Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso*. Terra Latinoamericana, 19(1),9-17. ISSN: . Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57319102>
114. Wahid, F.; et al. (2020). *Sustainable management with mycorrhizae and Phosphate solubilizing bacteria for enhanced Phosphorus uptake in calcareous soils*. *Agriculture* 10, 334.
115. Metson, W. et al. (2016). *Feeding the Corn Belt: Opportunities for phosphorus recycling in U.S. agriculture*. *Sci. Total. Environ*, 542, 1117–1126.
116. Acosta, et al. (2005). *Actividad de la enzima deshidrogenasa en un suelo calciorthids enmendado con residuos orgánicos*. *Agronomía Tropical*, 55(2), 217-232.
117. William H. & Kruskal W. (1952) *Use of ranks in one-criterion variance analysis*. Journal of the American Statistical Association 47 (260): 583–621, December 1952.
118. Kendall, M. & Stuart, A. (1973) *The Advanced Theory of Statistics, Volume 2: Inference and Relationship*, Griffin. ISBN 0-85264-215-6 (Section 31.19)
119. Plank Z, et al. (2023) *Monitoring the efficiency of electro-kinetic soil remediation process with geophysical surveying method*. *Electrochimica Acta*. Volume 442. ISSN 0013-4686. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.141847>.

120. Abendroth, L. et al. (2011). *Corn growth and development*. Iowa State University.
121. Gómez B. et al. (2008). *Correlación y calibración del análisis de fósforo en suelos de Yucatán, México, para el cultivo de chile habanero*. *Agrociencia*, 42(1), 21-27. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000100003&lng=es&tlng=es.
122. Castro, A. et al. (2013). *Caracterización geoquímica y geoeléctrica de un sitio contaminado por hidrocarburos en el estado de Puebla, México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(2), 405-418.
123. Bouyoucos, G.J. (1936). *Directions for Making Mechanical Analysis of Soils by the Hydrometer Method*. *Soil Science* 4:225-228.
124. Wang, G. et al. (2022). *Contributions of Beneficial Microorganisms in Soil Remediation and Quality Improvement of Medicinal Plants*. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(23), 3200. <https://doi.org/10.3390/plants11233200>.
125. Zhou, N. et al. (2022). *Research progress of rhizosphere microorganisms in Fritillaria L. medicinal plants*. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 1054757. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1054757>
126. Porta, J., et al. (2003). *“Edafología para la agricultura y el medio ambiente”*. Mundi prensa, pp. 167-202.
127. Porta, J. (2005). *“Agenda de campo de suelos”*. Mundi prensa. Madrid.
128. Saña J. & More Ramos. (1996). *“La gestión y la fertilidad de suelos”*. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.